

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

---

## **ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

### **«ЭНЕРГИЯ-2013»**

VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

**г. Иваново, 23-25 апреля 2013 г.**

## **МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**ТОМ 4**

---

ИВАНОВО

ИГЭУ

2013

**ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ** // VIII международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 4. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2013. – 385 с.

Доклады студентов, аспирантов и молодых учёных, помещенные в сборник материалов конференции, отражают основные направления научной деятельности в области математического моделирования и информационных технологий.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов, интересующихся вопросами математического моделирования и информационных технологий.

Тексты докладов представлены авторами в виде файлов, сверстаны и при необходимости сокращены. Авторская редакция сохранена.

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

**Председатель оргкомитета:** **ТЮТИКОВ В.В.**, проректор по научной работе.

**Зам. председателя:** Макаров А.В., начальник управления НИРС и ТМ.

**Члены научного комитета:** Плетников С.Б. – декан ТЭФ; Андрианов С.Г. – декан ИФФ; Сорокин А.Ф., – декан ЭЭФ; Егоров В.Н. – декан ЭМФ; Кокин В.М. – декан ИВТФ; Карякин А.М. – декан ФЭУ; Гофман А.В. – рук. МС РНК СИГРЭ; Попель О.С. – заведующий лабораторией ОИВТ РАН, Клочкова Н.В. – председатель СМУС ИГЭУ.

**Координационная группа:** Смирнов Н.Н., Иванова О.Е., Можжухина В.В., Маршалов Е.Д., Ильченко А.Г., Шуина Е.А., Филатова Г.А.

## Секция 20. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Председатель – к.т.н., доцент **Чистосердов В.Л.**

Секретарь – старший преподаватель **Репин А.А.**

*А.С. Ушков, асп.; рук. А.Р. Колганов д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, Иваново)*

### ОГРАНИЧЕНИЕ ПУСКОВОГО ТОКА В КОРРЕКТОРЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Входной каскад цепи электропривода без корректора коэффициента мощности (ККМ) очень похож на импульсный источник питания с конденсатором большой емкости, сглаживающим выпрямленный постоянный ток из электросети. При первоначальной подаче питания в цепь электропривода происходит большой бросок тока, из-за того, что конденсатор на выходе диодного моста не заряжен. Этот бросок тока может повредить некоторые элементы электропривода: предохранители, паяные соединения или электронные компоненты.

Большинство производителей электроприводов для ограничения бросков пускового тока применяют терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом (negative temperature coefficient, NTC) (рис. 1). При первичном запуске NTC-резистор имеет достаточно высокое сопротивление и хорошо ограничивает величину пускового тока. После некоторого времени после пуска NTC-резистор нагревается из-за рассеивания на нем мощности. По мере нагрева его сопротивление постепенно снижается, что приводит к снижению ограничения тока.

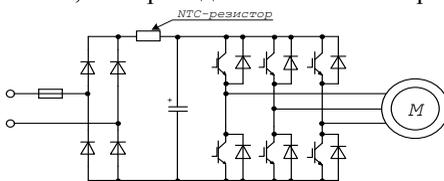


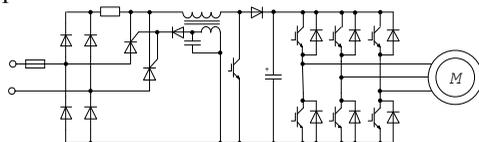
Рис. 1. Ограничение пускового тока с помощью NTC-резистора

Но использование NTC-резистора имеет ряд недостатков, которые могут отрицательно повлиять на надежность работы электропривода. Эффективность NTC-резистора зависит от температуры. Чем сильнее он нагревается, тем эффективнее проводит ток. NTC-резистор нельзя охлаждать с помощью радиатора для отвода тепла, поскольку в этом

случае нарушается принцип его работы. Это рассеяние мощности приводит к нагреву близлежащей области, где могут находиться другие полупроводниковые компоненты. А повышение температуры всего на  $10^{\circ}\text{C}$  может сократить срок службы полупроводников в два раза, что значительно снижает надежность привода.

Другая серьезная проблема, связанная с NTC-резистором, – это его тепловая инерция или время реакции. В случае, когда повторная подача питания на электропривод происходит достаточно быстро, после предыдущего отключения, NTC-резистор может не успеть охладиться и остается в состоянии низкого сопротивления. При этом он не сможет ограничить бросок пускового тока.

На рис. 2 показана реализация схемы, в которой решены многие проблемы, связанные с резистором NTC. В данной схеме может применяться как и NTC-резистор, так и обычный резистор с постоянной величиной сопротивления.



**Рис. 2. Ограничение пускового тока с помощью NTC-резистора**

При первоначальной подаче питания в цепь электродвигателя ток течет по диодному выпрямителю через пусковой резистор, что приводит к ограничению пускового тока. Через некоторое время происходит запуск ККМ, и он начинает коммутировать питание для MOSFET транзистора, который в свою очередь подает импульсный ток на повышающий индуктор. Этот импульсный ток напряжение во вспомогательной обмотке индуктора, которое используется для включения тиристоров. Они расположены в схеме таким образом, чтобы обеспечить протекание тока в обход двух верхних диодов мостового выпрямителя. Коэффициент трансформации вспомогательной обмотки индуктора необходимо выбирать так, чтобы создавалось достаточное напряжение для включения тиристоров при любых заданных пределах изменения сетевого напряжения.

#### Библиографический список

1. **Семенов Б.Ю.** Силовая электроника: от простого к сложному / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
2. **Алиберти Дж.** Ограничение пусковых токов в устройствах ККМ / Дж. Алеберти // Компоненты и технологии. – М.: Файн-Стрит, 2008. – Вып. 11. – С.92-94.

*К.С. Шишков, асп.; В.Е. Русаков, маг.;  
рук. В.Ф. Глазунов, д.т.н. проф.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ СНОВАЛЬНЫХ ВАЛОВ**

Качество формирования сновальных валов во многом определяет эффективность текстильного производства, влияя на уровень обрывности пряжи в ткачестве и ее угары в шлихтовании. В этой связи автоматизированный электропривод механизма формирования сновальных валов должен обеспечивать управление скоростью снования, режимами пуска с заданным ускорением, а также стабилизацию плотности формируемой паковки и длины намотанной основы.

В условиях традиционной конструкции сновальных машин решение указанных задач осложняется действием на нити основы неконтролируемых технологических возмущений в виде сил трения, а также несовершенством устройств измерения скорости снования и невозможностью оперативно контролировать плотность намотки. Так в процессе намотки каждая нить проходит через зону деформации, устройство контроля обрывов и нитенатяжной прибор, настраиваемый на определенную скорость снования. Бугристость и нецилиндричность намотки, разная удаленность перематываемых бобин от сновального вала, силы трения о воздух и нитепроводники вызывают неравномерность натяжения нитей по ширине сновального вала до 75 %.

Большая часть выполненных ранее работ, касающихся совершенствования технологического процесса снования, направлены на экспериментальные исследования влияния различных факторов, действующих на нити основы, их вытяжку и обрывность. При этом недостаточно внимания уделяется совершенствованию системы автоматизированного электропривода, на базе которого могут решаться задачи стабилизации плотности намотки и формирования паковок с заданной длиной наматываемой основы. В условиях действия в процессе намотки случайных факторов обеспечить требуемую при шлихтовании основы идентичность параметров сновальных валов не представляется возможным ввиду отсутствия необходимого числа управляющих воздействий, а также адекватной математической модели процесса намотки.

Известные модели напряженного состояния намотанной пряжи, построенные с использованием теории упругости, закона сохранения массы, позволяя оценить параметры намотанной основы, не учитывая

ют случайный характер действующих в процессе намотки возмущений и не могут быть использованы в системе динамического управления формированием сновальных валов.

В качестве математической модели, отвечающей требованиям непрерывного контроля процесса намотки, используется Архимедова спираль [1], связывающая угол поворота сновального вала  $\varphi$  с радиусом паковки  $r$  зависимостью:

$$r = a\varphi + r_0 = 2\pi na + r_0,$$

где  $r_0$  - начальный радиус намотки, м;  $n$  - число оборотов вала;

$a = \frac{dr}{d\varphi}$  - параметр спирали Архимеда, мрад<sup>-1</sup>.

При этом длина намотанной основы

$$L = \frac{a\varphi^2}{2} + r_0\varphi,$$

а плотность намотки

$$\gamma = \frac{mT}{2\pi aH},$$

где  $m$  - число нитей в заправке;  $T$  - линейная плотность пряжи, Текс;  $H$  - рассадка фланцев, м.

Принцип активного воздействия уплотняющим валом на намотку положен в основу формирования сновальных валов. На основе указанной модели разработан алгоритм управления движением уплотняющего вала, обеспечивающий необходимую скорость изменения параметра спирали Архимеда по полярному радиусу и равномерную плотность намотки. При этом уплотняющий вал отводится от тела намотки электроприводом в соответствии с алгоритмом управления на основе информации о действительном и вычисленном с помощью указанной модели радиусах намотки.

Таким образом, на основе координирующего управления движением уплотняющего и сновального валов обеспечивается постоянство параметра спирали Архимеда. На практике эта задача осложняется естественными вариациями параметров нити, действующих на нить натяжений, возможной нестабильностью частоты вращения сновального вала.

В качестве электродвигателей сновального и уплотняющего валов целесообразно использовать асинхронные с короткозамкнутыми роторами, получающие питание от преобразователей частоты с векторным управле-

нием координатами, которые позволяют выполнить все жесткие требования к динамическим и статическим характеристикам процесса наматывания [2].

Дискретный отвод уплотняющего вала может осуществляться под контролем тока электродвигателя сновального вала, что позволяет избежать его перегрузки, а также с учетом давления уплотняющего вала на сновальный [3]. При этом в процессе намотки основы происходит отклонение действительного радиуса сновального вала от теоретического, вычисляемого в соответствии с математической моделью. На основе полученной разности теоретического и действительного радиусов намотки задается давление уплотняющего вала на сновальный, реализуемое в замкнутой релейной системе.

В качестве критерия отвода уплотняющего вала от намотки может быть также принято отношение давления к числу оборотов сновального вала, изменяющего уставку реле, включающего отвод электропривода уплотняющего вала.

#### **Библиографический список**

1. Кутын А.Ю., Кутын Ю.К., Маховер В.Л. Новая безотходная технология формирования ткацкого навоя высокого качества // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. - 2005. - №3. С. 42-44.
2. Глазунов В.Ф., Виноградов А.Б., Шишков К.С. Асинхронный электропривод механизма формирования сновальных валов // Вестник ИГЭУ. - Иваново. - 2011. С. 83-87.
3. Устройство управления формированием сновальных валов: пат. № 2439218 от 09.11.2010., Рос. Федерация D02H 13/18 / Глазунов В.Ф.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ

*А.В. Щавелев, студ., А.А. Бурьлин, маг.;  
рук. М.С. Куленко, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАСШИРЕНИЙ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ МАТЛАВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССОРА NХТ**

Одной из важных проблем при выполнении исследований мехатронных систем является отсутствие удобных и, одновременно, полнофункциональных инструментов для программирования алгоритмов управления движением даже самых простейших конструкций.

В работе рассматриваются вопросы использования программных и аппаратных средств для исследования неустойчивых мехатронных систем. Основой для построения системы стал комплект Mindstorms NXT версия 2.0, управляемый с помощью персонального компьютера.

Стандартное программное обеспечение, входящее в комплект поставки робота, при всей его наглядности и простоте, не позволяет реализовать более сложные алгоритмы управления, поскольку поддерживает только линейное выполнение операций. Использование программного обеспечения сторонних разработчиков, как в текстовом, так и в графическом режиме, не всегда возможно по причине трудностей его сопряжения с уже имеющимися моделями и законами управления.

Поэтому проведено исследование возможности и эффективности применения в качестве программной среды для управления роботом комплекса MATLAB с использованием пакета расширения Mindstorms NXT Toolbox, распространяемого свободно и бесплатно, посредством последовательного интерфейса Bluetooth или через USB-соединение. Благодаря данному программному обеспечению возможно управлять роботом Mindstorms в реальном времени.

Примерами управления неустойчивым объектом выступили робот Segway (электрический самобалансирующийся двухколесный скутер) и двухколесный робот-велосипед с гиросtabilизатором. Важным элементом системы является датчик dIMU, определяющий ускорение, угол наклона и скорость вращения и сочетающий в себе гироскоп и акселерометр в одном устройстве. Оба датчика (и акселерометр и гироскоп) выдают показания по трем осям. Акселерометр имеет три предела измерения:  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ , and  $\pm 8g$ . Гироскоп также работает в трех различных пределах измерения:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ , and  $\pm 2,000$  градусов в секунду. Он имеет настраиваемую нулевую точку и очень малый дрейф.

Благодаря сочетанию аппаратных и программных средств на базе MatLab подготовлены и программно реализованы типовые алгоритмы управления движением неустойчивых объектов. Выявлена практическая целесообразность использования расширения системы MatLab для проведения исследований мехатронных систем и возможность использования его в учебном процессе.

*Д. А. Фролов, студент;  
рук. С. К. Лебедев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАТЕМАТИКЕ И ТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ»**

Цель дисциплины состоит в достижении студентами результатов обучения, среди которых навыки решения практических задач, связанных с использованием компьютерной техники, при разработке и анализе электротехнических и электромеханических объектов, а так же изучения основных концепций и принципов использования наиболее распространенных программных комплексов.

Лабораторный практикум по дисциплине содержит лабораторные работы:

1. *MathCAD*: арифметические, алгебраические, тригонометрические, комплексные и матричные операции. построение графиков (4 часа);
2. *MathCAD*: интегралы, производные, пределы функций, вычисление сумм и произведений. Решение дифференциальных уравнений и систем дифференциальных уравнений (4 часа);
3. *MathCAD*: символьные преобразования, решение уравнений. Матричные преобразования, Фурье и Лапласа (4 часа);
4. *Matlab*: окно и параметры моделирования; библиотека элементов: блоки математических операций, нелинейные элементы, порты и подсистемы, переключение и мультиплексирование сигналов. Графическая подсистема: виртуальные осциллографы и их параметрирование. Инструменты линейного анализа динамических звеньев и систем (16 часов);
5. *Matlab*: моделирование однофазных и трехфазных активных и пассивные элементы, измерительные приборы. Примеры моделирования однофазных и трехфазных цепей, цепей с распределенными параметрами (4 часа);

Разработаны программы лабораторных работ, принципы и набор вопросов входного тестирования, пакеты индивидуальных заданий РГР, шаблоны отчетов.

Выполнена апробация практикума, по ее результатам внесены коррективы и подготовлены фрагменты методического обеспечения лабораторного практикума.

*Р.А.Дерезжков, студ.;  
рук. А.В. Пруднов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ЭЛЕКТРОПРИВОД СЕГМЕНТНЫХ И ДОННЫХ ЗАТВОРОВ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ**

В настоящее время на ряде гидроэлектростанций проводится модернизация электрооборудования с целью повышения надежности и отказоустойчивости. При этом не остаются в стороне и системы электропривода технологических механизмов. В докладе рассматривается система электропривода сегментных и донных затворов водоотливной плотины.

Система управления подъемом/опусканием сегментных и донных затворов состоит из:

- шкафа силового АН1;
- пульта управления АД1;
- пульта управления АД2;
- пульта переносного кнопочного АД3;
- энкодеров абсолютного положения вала двигателя;
- конечных выключателей предельного положения механизмов.

Силовой шкаф состоит из защитного и коммутационного электрооборудования, а так же включает в свой состав тиристорные электроприводы.

Защитные устройства представляют собой автоматические выключатели, защищающие электрические цепи от токов короткого замыкания, а так же выполняющие функции защиты механизмов от перегруза по току. Коммутационное электрооборудование представляет собой электромагнитные реле, контакторы и пускатели, осуществляющие пуск и останов механизмов. Тиристорные электроприводы управляют электродвигателями в процессе подъема и опускания затворов.

Пульт АД1 включает в свой состав:

- модуль станции распределенной периферии ET200S со встроенным центральным процессором;
- модуль сети «Profibus», позволяющий модулю станции распределенной периферии ET200S опрашивать по сети «Profibus» энкодеры абсолютного положения вала двигателя;
- модуль дискретного ввода сигналов, который позволяет контролировать состояние основных механизмов. В частности в данной системе модуль отслеживает наличие команды переключения в полуавтоматический или ручной режим работы;
- модули дискретного вывода сигналов, позволяющие останавливать механизмы при достижении задаваемого с панели оператора уровня открытия/закрытия затворов, а так же производить коррекцию перекоса затвора путем перевода механизмов на пониженную скорость;
- модуль аналогового ввода сигналов, контролирующий значения токов электродвигателей;
- панель оператора, представляющую собой жидкокристаллическую резистивную «touch» панель с мембранными кнопками ввода информации. Панель оператора - отображает в удобной для человека форме информацию о положении затворов. Данная панель помимо отображения информации получаемой с программируемого логического контроллера, осуществляет выдачу команд на определенный перечень действий, как то:
  - масштабирование значений абсолютных энкодеров;
  - масштабирование значений тока двигателей затворов;
  - диагностику системы;
  - калибровку положений затворов;
  - задание значения перекоса для переключения скорости электродвигателя на 50%;
  - задание аварийного перекоса затвора и т.д.

Пульт AD1 также включает в свой состав- ключи управления механизмами и лампы сигнализации состояния оборудования Лампы сигнализации состояния оборудования – отображают текущее состояние оборудования. Лампы сигнализации связаны с электрической схемой управления подъемом/опусканием затворов.

Ключи управления механизмами – выдают команду на открытие/закрытие затворов. Ключи управления связаны с электрической схемой управления подъемом/опусканием затворов. Так же положение ключей заводится в программируемый логический контроллер.

Пульт AD2 включает в свой состав: - лампы сигнализации состояния оборудования, позволяющие контролировать: включение вверх/вниз затворов, конечные положения затворов, нажатие кнопки аварийного останова, готовность затворов к работе, положение автоматического выключателя, низкую температуру в пульте.

Пульт управления AD3 представляет собой переносную, кнопочную станцию управления, включающую в свой состав:

- кнопку аварийного останова механизмов;
- переключатели режимов работы механизмов.

Энкодеры абсолютного положения вала двигателей устанавливаются на валы двигателей и предназначены для контроля угла поворота вала. Данные устройства позволяют на каждый поворот вала двигателя передавать по сети «Profibus» в программируемый контроллер 16 384 импульса положения вала, а так же позволяют считать количество оборотов двигателя, максимальное значение счетчика 131 072 оборота.[1]

Конечные выключатели предельного положения механизмов построены на базе индуктивных датчиков производства компании «Сенсор», позволяющие отключать механизмы при необходимых случаях.

Система управления затворами обеспечивает синхронный подъем и опускание левых и правых сегментов затворов. В системе электропривода для обоих механизмов используются регуляторы скорости РСТ10-0,2. В качестве приводных электродвигателей механизма подъема/опускания левого и правого сегментных затворов применяются асинхронные двигатели с фазным ротором, на лапах с передним фланцем, с двумя цилиндрическими концами вала типа МТФ-411-6  $U=380$  В,  $f=50$  Гц,  $P=22$  кВт,  $I_c=55$  А,  $I_p=60$  А,  $n=965$ об/мин. В качестве приводных электродвигателей механизма подъема/опускания левого и правого донных затворов применяются асинхронные двигатели с фазным ротором, на лапах с передним фланцем, с двумя цилиндрическими концами вала типа МТФ-312-6  $U=380$  В,  $f=50$  Гц,  $P=15$  кВт,  $I_c=38$  А,  $I_p=46$  А,  $n=930$ об/мин.

Датчик абсолютного положения вала устанавливается непосредственно на вал двигателя. На валах двигателей сегментных затворов установлено по одному колодочному тормозу с гидротолкателями, а на двигателях донных затворов колодочные тормоза с гидротолкателями установлены с обеих сторон вала.

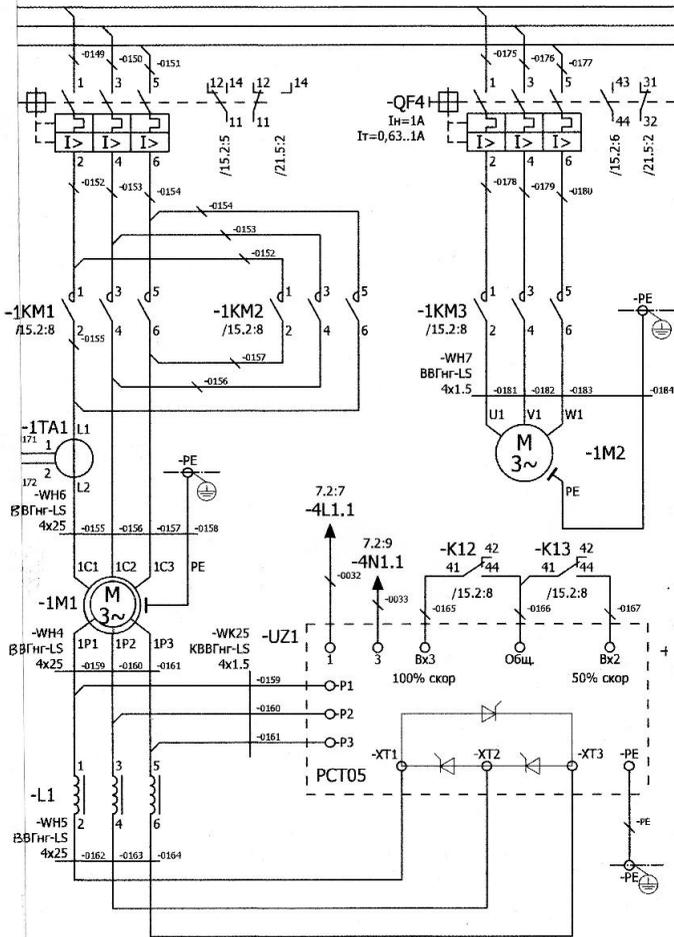


Рис.1. .Фрагмент силовой части принципиальной схемы электропривода

Фрагмент силовой части принципиальной схемы электропривода приведен на рис. 1.

Функции программируемого логического контроллера сводятся к сбору данных с абсолютных энкодеров, их обработке, слежение за предельными значениями открытия/закрытия, а так же устранение перекоса затворов, путем перевода механизмов на пониженную скорость.

**Библиографический список**

1. **Реконструкция** электрооборудования водосливной плотины. Рабочая документация. ОАО «Электроремонт ВКК» 2011.

*А.А. Исаков, студ.;*  
*рук. В.Л. Чистосердов к.т.н. доц.*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

**ПРОГРАММНАЯ ОБОЛОЧКА УПРАВЛЕНИЯ  
ИСПЫТАТЕЛЬНЫМ СТЕНДОМ ТЯГОВЫХ  
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Данная программная оболочка является частью разрабатываемого в настоящее время стенда для испытаний и наладки тяговых электроприводов ООО «Русэлпром-Электропривод».

Тяговые привода предназначены для использования в качестве элементов электромеханической трансмиссии транспортного средства, реализованной по последовательной гибридной схеме. В состав электромеханической трансмиссии входят:

- асинхронный электропривод, реализующий функции генератора. Вал данного двигателя соединен с коленчатым валом двигателя внутреннего сгорания транспортного средства;
- один или несколько асинхронных электроприводов, реализующих функции тяговых двигателей. В зависимости от используемой схемы их валы подсоединены к входному валу раздаточной коробки, к входному валу дифференциала ведущего моста либо непосредственно к колесному редуктору.

В настоящее время уже на протяжении нескольких лет разрабатываются и испытываются комплекты тяговых приводов, предназначенные для работы на колесных и гусеничных тракторах, автобусах и грузовых автомобилях.

Все электроприводы используют в качестве электрических машин асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, в качестве силовых преобразователей – транзисторные инверторы напряжения. Звенья постоянного напряжения силовых преобразователей электромеханической трансмиссии объединены.

В процессе испытаний различных комплектов электроприводов была выявлена необходимость разработки программной оболочки для персонального компьютера. Это объясняется следующими причинами:

1. Контроллеры управления электроприводами для ввода управляющих сигналов и считывания состояния имеют только цифровые коммуникационные каналы (предназначенные для работы в сети CAN).

2. Ручной процесс настройки приводов требует больших затрат времени, вследствие чего требуется автоматизация настройки.

Программная оболочка должна выполнять следующие функции:

1. Управление электроприводом и нагрузочным приводом при автономной наладке как в ручном, так и в автоматическом режиме;

2. Совместное управление всеми налаживаемыми электроприводами трансмиссии и нагрузочными электроприводами стенда в режиме совместной наладки и испытаний.

Программная оболочка является элементом испытательного стенда, включающего также нагрузочные электроприводы, имитирующие работу двигателя внутреннего сгорания и сопротивление тяговым двигателям в различных условиях работы.

*Н. Ю. Пономарев, Е. В. Романов, студ.;*

*рук. С. К. Лебедев, к.т.н., доц.*

*(ИГЭУ, Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНДАРТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО БИНОМУ НЬЮТОНА**

Биномиальное распределение корней характеристического полинома, базирующееся на биноме Ньютона, обеспечивает монотонные процессы. Поэтому такое распределение корней часто используют в системах позиционирования и многомассовых системах электропривода с нежесткой механикой и люфтами. Монотонность процессов при любом порядке должна обеспечивать отсутствие перегулирования в переходных процессах, как при синтезе регуляторов переменных электропривода, так и при использовании в наблюдателях состояния.

Рассмотрены свойства временных и частотных характеристик распределения по биному Ньютона для систем с порядком от 1 до 6, что покрывает наиболее распространенные случаи в электромехатронных системах современных электроприводов.

Основной проблемой при настройке систем является выбор среднегеометрического корня для обеспечения динамики, отвечающей техническому заданию по быстродействию.

Среднегеометрический корень может быть определен для системы по временным характеристикам, когда в техническом задании указывается время переходного процесса и погрешность регулирования.

Для удобства анализа переходных временных характеристик получены их аналитические выражения, используя обратное преобразование Лапласа в составе символических операций *MathCAD*.

Получены результаты для трех случаев точности регулирования: 5%, 1% и 0,1%. Определение производилось в программе *MathCAD* по графикам с использованием процедуры «трассировка».

Для проверки результатов и обоснованности алгоритма определения среднегеометрического корня примем время регулирования для всех порядков и погрешностей равным 1 секунде. Результаты моделирования показывают достижение заданной точки по времени и по уровню, соответствующему погрешности регулирования, для любого порядка. Это говорит о корректности алгоритма определения среднегеометрического корня по нормированным временным характеристикам.

К недостаткам такого подхода следует отнести следующее. Хотя время регулирования достигается системами любого порядка при сохранении монотонности, но чем выше порядок системы, тем больше мы получаем скорость нарастания положения. А на скорость движения накладываются жесткие и обоснованные ограничения.

Во многих промышленных системах управления, а особенно, в системах промышленного электропривода, таких как электроприводы станков и промышленных роботов, для оценки динамики всей системы и ее компонент используют частотные характеристики. ГОСТ на электроприводы станков и промышленных роботов рекомендуют для оценки динамики на этапе технического задания и при синтезе использовать понятие полосы пропускания, граница которой определяется меньшей из двух частот:

- частота, при которой ЛАЧХ с увеличением частоты пересекает уровень  $-3$  дБ;
- частота, при которой ЛФЧХ с увеличением частоты пересекает уровень  $-90$  градусов.

Получены выражения и графики нормированных характеристик для порядков с 1 по 6. Полученные результаты позволяют рассчитать требуемое значение среднегеометрического корня по заданному зна-

чению полосы пропускания. Но графическое определение среднегеометрического корня по графикам обладает определенной погрешностью в связи с конечным шагом частоты в расчете характеристик.

Для более точного вычисления среднегеометрического корня следует использовать аналитические выражения для частотных характеристик. В результате получены аналитические выражения, позволяющие связать полосу пропускания и среднегеометрический корень. Для полосы пропускания 1 Герц по рассчитан среднегеометрический корень для всех порядков по аналитическим выражениям. Приведены результаты расчета временных характеристик, которые показывают, что выбранные по заданной полосе пропускания характеристики систем различного порядка проходят с меньшим разбросом, чем графики систем, рассчитанных по времени регулирования, резко не выделяясь по скорости нарастания.

Выполненные исследования характеристик динамики по биному Ньютона и полученные результаты моделирования позволяют рекомендовать к широкому использованию алгоритмы определения среднегеометрического корня при синтезе систем с различными формами задания требований к динамике.

*С.А. Добротин, маг.;*  
*В.Ф. Глазунов, д.т.н, проф.*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

## **К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСЕВЫМ НАКАТОМ**

Машины для осевой намотки ткани в рулон представляют собой двухдвигательный агрегат, в состав которого входят осевой накат и подающая ткань валковая пара [1]. Электропривод позволяет обеспечить контроль и управление натяжением наматываемой ткани и плотностью  $\Delta$  формируемого рулона, которая может быть определена по формуле:

$$\Delta = q \frac{pN^2}{L - 2pR_0N}, \quad (1)$$

где  $q$  – масса одного кв. метра ткани, кг/м<sup>2</sup>;  $N$  – число витков материала в рулоне;  $L$  – длина намотанной ткани, м;  $R_0$  – начальный радиус намотки, м.

За показатели плотности намотки обычно принимают вес единицы объема намотанного рулона, определяемого единичным приращением его радиуса и средним значением толщины полотна. Оценка плотности по соотношению (1) не отражает реального распределения напряжений по сечению рулона, связанных с натяжением полотна и его физико-механическими свойствами, а показывает некоторое среднее значение плотности.

Часто оценку показателей процесса намотки выполняют по изменяющимся в процессе намотки конструктивным параметрам рулона и весовым показателям ткани. Сюда относятся начальный  $R_0$  и конечный радиусы рулона, число витков  $N$ , длина намотанного материала  $L$ , его ширина  $B$  и толщина  $\delta$ , которую определяют по формуле:

$$\delta = \frac{L - 2pR_0N}{pN^2}, \quad (2)$$

$$L = 2\pi N \left( R_0 + N \frac{\delta}{2} \right). \quad (3)$$

где

Оценки показателей плотности (1-3) могут быть выполнены с помощью устройства измерения параметров намотки, функциональная схема которого представлена на рис.1.

Контроль отработки заданного числа слоев рулона обеспечивает блок управления цифровой системой измерения 11, который управляет также блоком счетчиков 12, измеряющих длину материала в контролируемых слоях.

Устройство позволяет оператору выбирать уставки программного останова намотки по одному из контролируемых параметров ( $L$ ,  $N$ ,  $\delta$ ).

Показатели качества намотки рассчитываются по приведенным соотношениям (1-3) на основании показаний приборов.

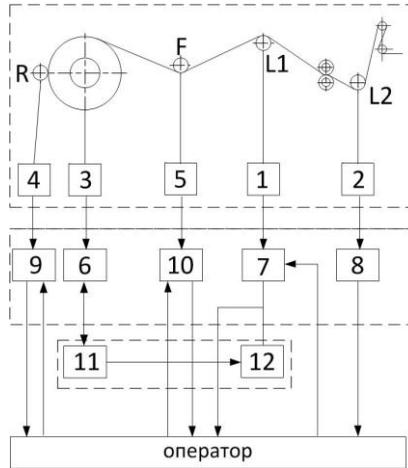


Рис. 1 Функциональная схема стабилизации плотности

1,2 – частотные датчики длины полотна; 3,4,5 – датчики числа витков  $N$ , радиуса  $R$  рулона и натяжения  $F$  полотна; 6,7 – цифровые программные устройства числа витков и длины полотна; 8 – цифровое измерительное устройство; 9,10 – аналоговые измерители радиуса и натяжения полотна; 11 – блок управления цифровой системой измерения; 12 – блок счетчиков.

По усредненным результатам измерений рассчитаны длины для 5 контрольных зон и определены средние значения  $\delta$  и  $\Delta$  для ткани арт. 06235 ( $B=0.8\text{м}$ ,  $q=0.25\text{кг/м}^2$ ,  $R_0=0.35\text{м}$ ,  $v=1.6\text{м/с}$ ,  $F=100\text{Н}$ ) и построены зависимости измеренных параметров от числа витков  $N$  (рис.2)

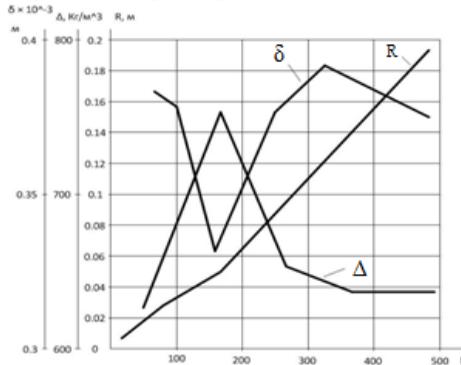


Рис. 2 Зависимость толщины ткани, плотности и радиуса рулона от числа витков

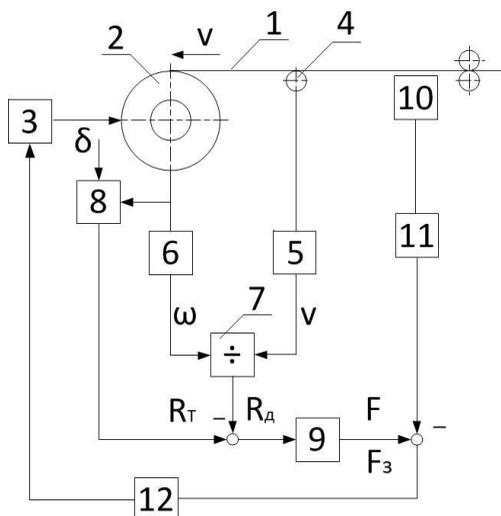


Рис. 3 Функциональная схема системы управления натяжением материала

1 – материал; 2 – рулон; 3 – электропривод; 4 – датчик скорости намотки; 5 – преобразователь; 6 – частотный датчик; 7 – делитель; 8 – блок вычисления теоретического радиуса; 9 – блок задания натяжения; 10 – датчик натяжения; 11 – преобразователь; 12 – регулятор натяжения.

Анализ результатов измерений показал повышенную плотность намотки в большей части первой половины рулона.

Стабилизация плотности намотки может быть достигнута в системе управления натяжением наматываемого материала, функциональная схема которой представлена на рис. 3.

В основу построения системы управления положена математическая модель намотки, реализованная на базе спирали Архимеда.[2] Теоретический радиус  $R_T$  вычисляется блоком, как произведение толщины  $\delta$  полотна на число витков  $N$ . Разность теоретического  $R_T$  и реального  $R_d$  радиусов подается на блок задания натяжения 9, изменяющего уставку натяжения, измеряемого датчиком 10 и преобразователем 11. Полученная разность  $F_3 - F$  подается на регулятор натяжения 12, изменяющий частоту вращения рулона и натяжение материала, приводя, таким образом, параметры намотки в соответствие с математической моделью.

**Библиографический список**

1. **Бельцов В.М.** Технологическое оборудование отделочных фабрик текстильной промышленности. / В.М. Бельцов. – Л.: Машиностроение., 1974г.
2. **Кутын Ю.К.** Математическая модель формирования сновальной паковки. / Ю.К. Кутын, Л.П. Беляев // Текстильная промышленность, 1991г. №1

*Малафеев Н.В., Суханов Н.В., студ.;  
рук. А.Н. Ширяев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

**ЭЛЕКТРОПРИВОД РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ  
ФИРМЫ «AUMA»**

Регулирующая арматура - это вид трубопроводной арматуры, предназначенной для регулирования параметров рабочей среды. В понятие регулирования параметров входит регулирование расхода среды, поддержания давления среды в заданных пределах, смешивание различных сред в необходимых пропорциях, поддержание заданного уровня жидкости в сосудах и некоторые другие.

Выполнение всех своих функций регулирующая арматура осуществляет за счёт изменения расхода среды через своё проходное сечение. В зависимости от конкретных условий эксплуатации применяются различные виды управления регулирующей арматурой, чаще всего при этом используются внешние источники энергии и управление по команде от датчиков, фиксирующих параметры среды в трубопроводе. Используется также автоматическое управление непосредственно от рабочей среды.

В зависимости от параметров рабочей среды (давления, температуры, химического состава и др.) к каждому виду регулирования предъявляются различные требования, что привело к появлению множества конструктивных типов регулирующей арматуры. С точки зрения автоматизации промышленных предприятий каждый из них рассматривается как элемент системы автоматического управления технологическим процессом, протекающим с участием жидких и газообразных рабочих сред и регулирующимся под воздействием получаемой командной информации. Существует ряд фирм, например такие, как Shiebel, Auma, EMCo, Elesi, выпускающих регулирующие арматуры, основные параметры которых приведены в табл.1.

**Таблица 1. Основные параметры регулирующей арматуры**

Название фирмы	Обратная связь (4...20мА)	ModBus	Температурный диапазон	IP
Auma	Есть	Есть	-40;+40	67
Shiebel	Нет	Profibus	-25;+60	68
Emico	Есть	Есть	-40;+40	65
Elesi	Нет	Есть	-40;+70	67

Регулирующие арматуры указанных фирм имеют сходную конструкцию и близкие параметры, однако наибольшее применение в нашей стране находит арматура фирмы Auma.

Электроприводы AUMA, выполненные на базе взрывозащищенных электродвигателей переменного тока, современных преобразователей частоты и микроконтроллеров, предназначены для управления промышленной арматурой, например, клапанами, задвижками, заслонками, кранами и др.

Как стандарт, средства управления приводами AUMA устанавливаются непосредственно на привод. Если доступ к приводу затруднен или обусловлен экстремальными условиями, например, сильная вибрация или высокая температура окружающей среды, которая может повлиять на электронику, блок управления электроприводом AUMATIC (рис.1.) можно установить отдельно с креплением на стене. Управление двигателем может осуществляться как с местного пульта управления, так и удалённо.



**Рис.1. Блок управления электроприводом AUMATIC**

В составе электропривода блок обеспечивает выполнение следующих функций:

- открытие, закрытие и остановка в промежуточном положении запорного органа арматуры;
- отключение электродвигателя при превышении заданных крутящих моментов;
- программируемая диаграмма задания скорости перемещения и крутящих моментов;

- измерение положения выходного звена электропривода независимо от наличия электропитания;
- формирование аналогового сигнала (4-20) мА, соответствующего положению запорного органа;
- пакет защит (от заклинивания запорного органа, провалов напряжения, короткого замыкания в нагрузке, времятоковая защита);
- работу при обрыве одной фазы питающей сети;
- дистанционное управление по последовательному (RS-485) или дискретному интерфейсу (220 В АС, 24 В DC);
- управление по аналоговому входу;
- блокировку от несанкционированного управления и изменения параметров;
- фиксирование основных событий блока (команды, аварии, достижение конечных положений) в постоянно-запоминающем устройстве с указанием времени и даты события;
- задание параметров и считывание журнала событий по инфракрасному каналу связи.

*О.В. Лебедев, студ.;  
рук. А.Н. Ширяев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД РАЗРЫВНОЙ МАШИНЫ**

Распространенным методом определения механических свойств материалов являются испытания на разрыв, производимые на разрывных машинах. В результате этих испытаний определяют модуль упругости, предел пропорциональности, предел прочности материалов и т.д.

На разрывных машинах проводят также испытания материалов на малоцикловую усталость при нагружении образца по различным законам. Из опыта практического применения материалов и различных исследований известно, что на достоверность определения свойств материалов существенно влияет методика проведения испытаний.

Характеристики используемых в испытательных машинах приводов во многом определяют степень воспроизводимости и повторяемо-

сти режимов испытаний, что влияет на достоверность сравнения физико-механических свойств тестируемых материалов и создает предпосылки для принятия обоснованных решений по выбору конкретного материала.

Поэтому к электроприводам современных испытательных машин предъявляются требования обеспечения высокой точности, широкого диапазона регулирования скорости, многократной повторяемости режимов испытаний.

Характерной особенностью нагружающих устройств разрывных машин является высокая жесткость элементов, необходимая для минимизации их влияния на результаты испытания. Механические узлы выполняются с большими запасами прочности и имеют достаточный срок службы, в течение которого установленное силовое электрическое и электронное оборудование успевает морально устареть и стать неремонтопригодным.

Большинство существующих отечественных разрывных машин оснащено электроприводами постоянного тока, которые, в связи с появлением на рынке частотно-регулируемых электроприводов переменного тока, становятся физически и морально устаревшими. Поэтому в последние годы в испытательной технике наметилась тенденция замены электропривода постоянного тока электроприводом переменного тока на базе синхронных и асинхронных электродвигателей.

В работе рассматриваются вопросы модернизации электропривода разрывной машины модели Р-5, которая используется для испытания на растяжение образцов сварных металлических конструкций.

Электропривод нагружающего механизма машины построен на базе двигателя постоянного тока серии ПБСТ и тиристорного управляемого выпрямителя. Дальнейшая эксплуатация такого электропривода становится экономически невыгодной, так как электродвигатель почти выработал свой ресурс и его замена на другой двигатель постоянного тока является проблематичной из-за отсутствия на отечественном рынке подобных машин постоянного тока. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможности использования в разрывной машине электропривода переменного тока.

В результате анализа требований к электроприводу модернизируемой разрывной машины Р-5 и существующих на отечественном рынке частотно-регулируемых электроприводов, а также на основе опыта модернизации и производства испытательной техники ООО «ЗИП»

(г. Иваново) в качестве силового преобразователя электропривода выбран преобразователь частоты KEB COMBIVERT (Германия), а в

качестве исполнительного электродвигателя – отечественный трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и импульсным датчиком положения.

Электропривод обеспечивает диапазон регулирования скорости испытания до 2000:1 и погрешность ее стабилизации, удовлетворяющие требованиям испытаний сварных металлических конструкций.

Систему автоматики машины также целесообразно модернизировать на базе специализированной платы автоматики производства ООО «ЗИП», осуществляющей обработку сигналов датчиков и связь с персональным компьютером. Такой подход к модернизации машины позволяет использовать обычный персональный компьютер, снабженный соответствующим программным обеспечением, для управления электроприводом, процессом испытаний и анализа их результатов.

*С.М. Васильев, студ.; М.А. Захаров, соискатель;  
рук. А.М. Захаров, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Одной из важнейших стратегических задач страны на данный момент является сокращение энергоемкости отечественной экономики на 40% к 2020 году.

Ряд конкретных механизмов, направленных на экономию энергии и ресурсосбережение, влияют:

1. Перестройка топливно-энергетического комплекса и снижение энергоемкости экономики;
2. Применение энергосберегающих технологий;
3. Повышение эффективности использования энергии и применение энергоэкономичного оборудования в электроэнергетике, транспорте, промышленности и секторе ЖКХ

При этом наиболее важным направлением является энергосбережение в жилищно-коммунальном хозяйстве, так как именно в этом секторе нерационально расходуются огромные энергетические ресурсы. Потенциал энергосбережения ЖКХ составляет 30 %.

До 55% всей электроэнергии потребляют электроприводы и осуществляют практически все технологические процессы. Сегодня сэкономить единицу энергетических ресурсов, например 1 т топлива в условном исчислении, вдвое дешевле, чем ее добыть.

Для ее реализации необходимо создание совершенной системы управления энергоэффективностью и энергосбережением.

Одним из элементов решение данной проблемы является решение комплексной задачи по оптимизации работы насосной станции.

Наряду с обеспечением напора и подачи, предусмотренных графиком водопотребления или водоотведения, и удовлетворением требований по бесперебойности работы, при сооружении и оборудовании насосных станций необходимо при наименьших затратах на их строительство и эксплуатацию обеспечивать комфортные условия работы обслуживающего персонала, широкое применение автоматики и телемеханики. Не следует допускать излишеств в составе и размерах сооружений, кубатуре зданий, основном и вспомогательном оборудовании, архитектурном оформлении.

В то же время необходимо учитывать, что состав сооружений и оборудования, так же как и вся схема водоснабжения или водоотведения в целом, должны отвечать условиям эксплуатации при возрастающих объемах водопотребления.

Конструкция насосной станции предусматривает возможность модернизации и расширения, замены установленного оборудования на более мощное, обеспечивающее увеличение подач и напоров.

В качестве исследуемого объекта был выбран водоканал. Для насосной станции II подъема был рассчитан и выбран частотный электропривод. Опыт внедрения частотно-регулируемых электроприводов на насосных станциях показывает их весомые преимущества, в сравнении с нерегулируемым электроприводом насоса. Далее представлен перечень преимуществ регулируемого электропривода в насосных системах:

1. Снижение энергопотребления до 60%
2. Снижение расхода воды на 25%
3. Устранение гидроударов, разрушающих систему водоснабжения
4. Срок окупаемости нового оборудования 5-6 месяцев
5. Снижение аварийности сети и снижение аварийности электрооборудования за счет устранения ударных пусковых токов
6. Удобство автоматизации
7. Удобство и простота внедрения

Кроме применения ЧПП так же приняты меры по разработке автоматической системы управления технологического процесса перекачки воды.

Разработана система предназначенная для удаленного мониторинга состояния станций водоснабжения, и управления ее работой.

Информация о функционировании станций доставляется в диспетчерскую по сетям ETHERNET и GPRS/3G и отображается на экране оператора.

Система обеспечивает получение следующей информации в режиме реального времени:

- Состояние станции (контроль питания, охраны, подтопления и т.д.);
- Режим ее работы;
- Режим работы насосных агрегатов и их состояние;
- Время наработки насосов;
- Неисправность отдельных узлов и агрегатов станции (насосов, ПЧ, УПП, пускателей, контакторов, датчиков);

В ходе работы была выбрана насосная станция холодного водоснабжения, питающая часть города. Для выполнения мер энергоэффективности и ресурсосбережения, был произведён ряд работ:

1. Расчет и выбор частотно регулируемого привода для насосов насосной станции;
2. Выбор современной запорно-регулирующей и предохранительной арматуры и расчет места ее установки;
3. Выбор датчиков и регуляторов сетевого давления и расчет места их установки на ответвлениях сети;
4. Оптимизация работы системы водоснабжения. Работы по диспетчеризация и автоматизация управления сетями.

По результатам работ создано логико-математическое описание взаимосвязи перечисленных выше компонентов и характеристик системы водоснабжения участка города. Разработана автоматическая система управления водоснабжения.

*М.А. Сольхуа, студ.;  
рук. А.М. Захаров к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ ЗАСЛОНКОЙ**

Карбюраторные двигатели внутреннего сгорания Отто в настоящее время вытесняются инжекторными, но до сих пор они находят широкое применение в различных отечественных автомобилях и иномарках. В качестве базового используется карбюратор ДААЗ 2108-1107010 «Solex», который имеет следующие достоинства:

- в отличие от остального модельного ряда карбюраторов ДААЗ «Solex» является универсальным по своей конструкции и может быть установлен на всех легковых автомобилях отечественного производства и большей части иномарок, вне зависимости от расположения привода автомобиля;
- карбюратор можно охарактеризовать, как экономичный с хорошими динамическими показателями, хорошими пусковыми качествами, и чувствительностью к качеству топлива;
- в отличие от импортных карбюраторов, он не уступает по характеристикам и стоимостным показателям.

Карбюраторы имеют свои «минусы». Наиболее распространённый – холодный пуск двигателя (машина глохнет и заводится не с первого раза из за неравномерного смешивания горючей смеси или многократного нажатия на педаль акселератора, что приводит к "заливанию" свечи накаливания). Что бы устранить это «положение» и облегчить жизнь автолюбителям, необходимо модифицировать карбюратор.

Целью данной работы является модификация базового карбюратора. В качестве модификации выступает автоматическое управление воздушной заслонкой карбюратора с помощью шагового двигателя, который открывает воздушную заслонку двигателя в зависимости от температуры двигателя и температуры окружающей среды, и тем самым обеспечивается плавный пуск двигателя в любую погоду.

Использование шагового двигателя наиболее рационально в этой модификации. Шаговый двигатель упрощает управление заслонкой, т.к. зная точный угол шага двигателя можно максимально точно настроить его на определённое количество шагов при определённой температуре. Обширный модельный ряд шаговых двигателей позволяет выбрать наиболее подходящий двигатель для этой модификации. Шаговый двигатель выбирается по моменту скручивания возвратной

пружины. При выборе двигателя также учитывается температура окружающей среды (под капотом).

Управление шаговым двигателем производится в автоматическом режиме с помощью контроллера. Температура двигателя снимается с датчика охлаждающей жидкости, который при изменении температуры жидкости меняет своё сопротивление, что позволит при наличии определённой таблицы довольно точно определить температуру, а так же с высоковольтной катушки зажигания снимаются показания скорости вращения коленчатого вала двигателя, что позволит контролировать холостой ход двигателя с минимальными выбросами углекислого газа во время пуска двигателя и его прогрева. Система автоматического управления воздушной заслонки карбюратора исключает использование ручного подсоса, с помощью которого сложно регулировать положение воздушной заслонки, вследствие этого существенно возрастает расход топлива и увеличивается степень износа двигателя (максимальный износ двигателя происходит при пуске). Система автоматического управления с высокой точностью постепенно открывает воздушную заслонку карбюратора, изначально закрытую (до температуры двигателя  $+15^{\circ}\text{C}$ ), не давая двигателю заглохнуть, тем самым обеспечивая минимальный расход топлива и уменьшение степени износа при пуске.



**Рис. 1. Положение шагового двигателя (моторредуктора) относительно карбюратора и его монтаж на «лапку» воздушной заслонки.**

**Библиографический список**

**1. Тюфяков А.С.** Карбюраторы семейства "Солекс". Устройство, ремонт, регулировка: Практ. пособ. - М.: ЗАО "КЖИ "За рулем", 2003. 80 с.

*И.А. Балакирев, маг.;*  
*рук. Б.С. Курнышев*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

**РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРОВ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

Современный регулируемый электропривод как постоянного, так и переменного тока содержит силовые преобразователи электрической энергии, выполненные на силовых полупроводниковых ключах и являющиеся дискретными устройствами. Рост установленной мощности преобразовательных агрегатов и связанное с принципом их работы ухудшение электромагнитной обстановки обострили проблему обеспечения нормального функционирования других потребителей, подключенных к общей с преобразователями сети, т.е. электромагнитную совместимость.

Работа вентилях входного (сетевых) выпрямителя преобразователя частоты вызывает ухудшение качественных показателей электрической энергии в точке их подключения к питающей сети. Это объясняется, во-первых, скачкообразным изменением параметров цепи во время коммутационных процессов в вентиляхной группе и, во-вторых, изменением величины тока нагрузки и связанным с этим падением напряжения на индуктивном сопротивлении сети в коммутационном интервале. Нормы на качество электрической энергии оговаривают допустимые величины колебаний действующего напряжения сети и его коэффициента несинусоидальности. Работа силовых активных элементов преобразователя частоты в ключевых режимах с короткими фронтами импульсов напряжения и тока с частотой следования до нескольких кГц является источником промышленных радиопомех. Это в меньшей степени относится к работе выпрямительного моста преобразователя, где с высокой скоростью, но низкой частотой происходит обрыв обратного тока выходящих из работы диодов и тиристоров. Основным источником радиопомех — работа биполярных транзисторов инверторного звена, переключающихся с высокой частотой и очень крутыми фронтами.

Нормы допустимых промышленных радиопомех определяют диапазон частот и величины допустимых радиопомех, средой распространения которых являются проводящие электрический ток предметы (провода, кабели, оболочки и т. д.). Такие помехи называются помехами проводимости, или кондуктивными. Их уровень определяется напряжением помех на зажимах сети, выраженным в децибелах.

*А.В. Дошлыгин, маг.;*  
*рук. Б.С. Курнышев*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Работа силовых активных элементов преобразователя частоты в ключевых режимах с короткими фронтами импульсов напряжения и тока с частотой следования до нескольких килогерц является источником промышленных радиопомех. Это в меньшей степени относится к работе выпрямительного моста преобразователя, где с высокой скоростью, но низкой частотой происходит обрыв обратного тока выходящих из работы диодов и тиристоров. Основной источник радиопомех – работа биполярных транзисторов инверторного звена, переключающихся с высокой частотой и очень крутыми фронтами.

Нормы допустимых промышленных радиопомех определяют диапазон частот и величины допустимых радиопомех, средой распространения которых являются проводящие электрический ток предметы (провода, кабели, оболочки и т. д.). Такие помехи называются помехами проводимости, или кондуктивными. Их уровень определяется напряжением помех на зажимах сети, выраженным в децибелах.

Уровень промышленных радиопомех для высоковольтных сетей не нормируется.

В отдельных случаях для сетей 380 В оговаривается площадь допустимых коммутационных провалов.

Обычно при расчете уменьшения действующего напряжения сети принимают во внимание реактивную мощность преобразователя и относят ее к мощности короткого замыкания питающей сети. В этом случае преобразователь является обычным потребителем синусоидального тока.

Если выпрямитель преобразователя выполнен на тиристорах, что характерно для инверторов тока, реактивная мощность преобразовате-

ля и снижение действующего напряжения сети будут максимальными при угле управления  $\alpha = \pi/2$ . Этому соответствует близкий к углу  $\pi/2$  сдвиг между напряжением и током питающей сети и, соответственно, низкий коэффициент мощности на входе установки.

Этих недостатков лишен преобразователь с инвертором напряжения, у которого выпрямительный мост выполнен на диодах или собранных по диодной схеме включения тиристорах. В этом случае коммутация тока с прибора на прибор происходит с углом естественной коммутации, т. е.  $\alpha = 0$ . При реальных токовых нагрузках преобразователя (кратность перегрузки не более 1.2) и малых индуктивностях на его входе ( $U_k \leq 6\%$ ) коэффициент сдвига в точке подключения агрегата к сети не ниже 0,98, соответственно мала и реактивная мощность. Это позволяет даже не рассматривать вопрос о снижении действующего значения напряжения сети при использовании инвертора напряжения.

Методика расчёта содержит несколько этапов.

Определяется полная мощность короткого замыкания  $R_{кз}$  на шинах подключения преобразователя. При определении  $R_{кз}$  необходимо учитывать и наличие синхронных машин, сверхпереходной реактанс которых обычно не превышает 20÷25%. Как правило, значение  $R_{кз}$  известно, так как оно используется при выборе защитной и коммутационной аппаратуры.

Приведенное значение э. д. с. короткого замыкания преобразователя частоты  $U_{кп}$  может быть определено через номинальную мощность на выходе звена постоянного тока преобразователя  $P_{дн}$ .

Определяют относительное значение ЭДС короткого замыкания  $U_k$ , куда входит вся цепь коммутации вентилях выпрямителя преобразователя частоты.

Независимо от схемы соединения вторичных обмоток сетевого трансформатора относительное значение коммутационного провала на шинах питания определяется параметрами делителя напряжения, состоящего из индуктивных сопротивлений  $X_c$  и  $X_p$ .

Степень искажения напряжения сети зависит не только от мгновенного значения коммутационного провала, но и от его длительности, определяющейся углом коммутации  $\gamma$ , который при углах естественной коммутации.

Очевидно, что коммутационные искажения сетевого напряжения могут быть исследованы в зависимости от двух обобщенных параметров.

Определяют площади коммутационных провалов. Фазные питающие напряжения при начале отсчета от угла естественной коммутации с фазы С на фазу А.

Импульс коммутационного провала (искажения) в напряжении фазы А на входе выпрямительного моста преобразователя можно представить как разность между коммутационной кривой фаз А и С и неискаженной кривой напряжения фазы А.

Площадь коммутационных провалов обычно выражается в процентах, умноженных на электрический градус (% эл. град.)

Для некоторых потребителей, подключенных к сетям 380 В, оговаривается допустимая площадь коммутационных провалов.

*А.В. Дудов, студ.;*  
*рук. М.А. Соломаничев*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

## **ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА ПОПЕРЕЧНОЙ ПОДАЧИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ СЕРИИ ЭПВ**

Основным вектором развития электроприводов подач металлорежущих станков в последнее время является упрощение их кинематики и приближение электродвигателя к исполнительному органу, что связано с необходимостью совершенствования самого электродвигателя. Таким образом, при производстве электроприводов имеет место тенденция создания комплектных тиристорных и транзисторных электроприводов подачи металлорежущих станков.

В последнее время во многих отраслях промышленности находят широкое применение электроприводы подач металлорежущих станков, построенные на базе синхронных электродвигателей (СЭД) при питании их статорных обмоток от полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ). Данные электродвигатели не имеют щеточно-коллекторного узла (в отличие от электродвигателей постоянного тока), что делает их более надежными и повышает их эксплуатационно-технические характеристики.

В связи с вышесказанным, к основным преимуществам электроприводов по системе ПЧ–СЭД следует отнести [1]:

– улучшенные массогабаритные показатели СЭД;

- повышенный коэффициент мощности электродвигателя (позволяет получить более высокое отношение между электромагнитным моментом электродвигателя и током на выходе ПЧ);

- пониженный момент инерции (позволяет повысить предельные динамические показатели электропривода).

Указанные выше особенности развития и преимущества современных электроприводов подачи металлорежущих станков по системе ПЧ–СЭД определяют актуальность темы и позволяют сформулировать цель дипломного проекта, выполняемого автором настоящего доклада. Цель заключается в расчете параметров и выборе системы комплектного электропривода, обеспечивающей требуемые показатели качества технологического процесса, выполняемого механизмом поперечной подачи (вдоль оси  $X$ ) многоцелевого обрабатывающего центра ИР500ПМФ4. Данный горизонтально-расточной станок оборудован системой числового программного управления (ЧПУ), имеющей класс точности П [2].

В соответствии с целью проекта необходимо:

- сформулировать и обосновать основные требования к электроприводу подачи металлорежущего станка;

- определить номинальный момент электродвигателя, выбрать комплектное электрооборудование (СЭД и ПЧ) для управления механизмом поперечной подачи станка и изучить состав и принцип действия его основных элементов;

- выполнить математическое моделирование и анализ расчетных характеристик выбранной системы электропривода;

- обосновать экономическую эффективность от внедрения проекта и сделать оценку безопасности и экологичности принятых в проекте решений при эксплуатации рассматриваемого электропривода механизма поперечной подачи станка.

Для решения указанных выше задач автором доклада (в соответствии с заданием на проект) выполняются следующие этапы дипломного проектирования:

- разработка технического задания на проектирование электропривода механизма поперечной подачи обрабатывающего центра ИР500ПМФ4;

- указание общей характеристики и основных технических параметров рассматриваемого металлорежущего станка;

- формулировка и обоснование требований к электроприводу подачи станка;

– определение необходимого номинального момента электродвигателя механизма поперечной подачи, выбор комплектного электрооборудования в составе СЭД и ПЧ; описание устройства и принципа работы электропривода поперечной подачи металлорежущего станка;

– расчет параметров системы электропривода (контуров регулирования тока и скорости СЭД) поперечной подачи станка;

– разработка и построение вычислительно-математической модели электропривода механизма поперечной подачи станка ИР500ПМФ4; постановка имитационного эксперимента для получения динамических характеристик электропривода поперечной подачи;

– расчет экономической эффективности от внедрения, освещение вопросов и оценка безопасности и экологичности принятых в проекте решений при эксплуатации электропривода механизма поперечной подачи станка ИР500ПМФ4;

Основные требования к электроприводу поперечной подачи станка формулируются в дипломном проекте на основании ГОСТ 27803-88 [3].

Определение номинального момента электродвигателя и его выбор на начальном этапе расчета электропривода подачи металлорежущего станка выполняется по методике, изложенной в [1]. В результате выбирается СЭД производства фирмы *Lenze* типа *MCS12D20 – C40B0B19NST5S00NR0SU* ( $P_n = 1,1$  кВт,  $U_n = 345$  В,  $n_n = 1950$  об/мин,  $n_{max}$

$= 6000$  об/мин,  $M_n = 5,5$  Н·м,  $M_{max} = 18$  Н·м,  $I_n = 2,6$  А,  $I_{max} = 10$  А,  $J_{дв} = 4$  кг·см<sup>2</sup>,  $f_n = 140$  Гц) [4] с возбуждением от постоянных магнитов.

Исходя из типа и параметров выбранного электродвигателя, для питания его статорных обмоток выбирается ПЧ серии ЭПВ типа ЭПВ – ТТПТ – 10 – 380 – 3СП – УХЛ4 ( $P_{ном} = 6,5$  кВт,  $U_{вх} = 380$  В,  $U_{вых} = (0÷380)$  В,  $I_{ном} = 10$  А,  $I_{max} = 13$  А,  $f_{пч} = (48÷63)$  Гц,  $f_{вых} = (0÷400)$  Гц,  $f_m = (2,5÷16)$  кГц) [5] исполнения 3 с векторным управлением переменными СЭД и импульсным датчиком угловых перемещений, установленным на валу электродвигателя.

Описание устройства и принципа действия электропривода поперечной подачи станка ИР500ПМФ4 приводится в дипломном проекте на основе информации, изложенной в [5].

Синтез системы ПЧ–СЭД электропривода поперечной подачи станка выполняется в проекте по методике, изложенной в [6]. При этом, за основу принимается динамическая модель СЭД с постоянными магнитами в системе координат  $(d, q)$  [5], ориентированной по магнитной оси ротора электродвигателя. Расчет параметров и определение передаточных функции регуляторов тока и скорости в контурах регулирова-

ния соответствующих переменных СЭД выполняются по известному принципу подчиненного регулирования с учетом метода компенсации нелинейных связей [6]. Таким образом, получены передаточные функции ПИ-регуляторов тока и скорости СЭД.

Функциональная схема рассматриваемой в дипломном проекте системы векторного управления переменными СЭД с ПЧ серии ЭПВ для электропривода поперечной подачи обрабатывающего центра ИР500ПМФ4 соответствует схеме, приведенной в [5]. Структурная схема (рис. 1) системы электропривода поперечной подачи станка, рассматриваемая в проекте, соответствует указанной функциональной схеме.

Разработка и построение вычислительно-математической модели системы векторного управления ПЧ–СЭД электропривода поперечной подачи станка ИР500ПМФ4 в проекте выполняются на основе приведенной структурной схемы (рис. 1). Расчетные динамические характеристики, полученные в проекте при постановке имитационного экспе-

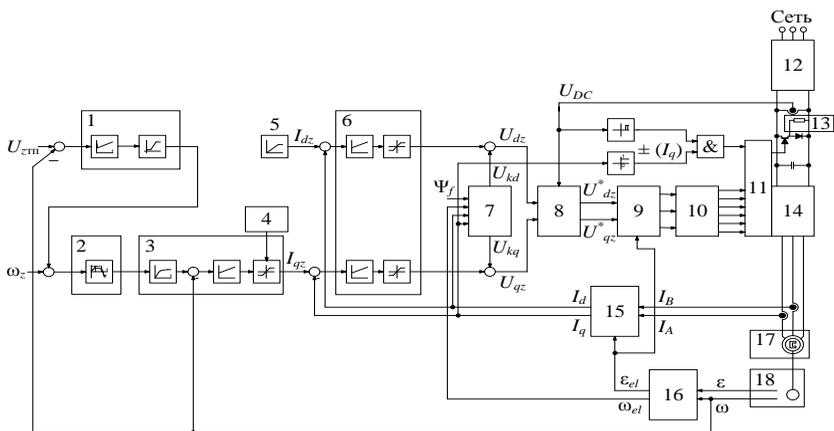


Рис. 1. Структурная схема электропривода поперечной подачи станка:

1 – технологический регулятор; 2 – датчик интенсивности; 3 – ПИ-регулятор скорости; 4 – блок ограничения выходного сигнала регулятора скорости; 5 – блок формирования сигнала задания по току  $I_d$ ; 6 – ПИ-регуляторы тока по осям  $d$  и  $q$ ; 7 – блок компенсации перекрестных связей; 8 – формирователь напряжений по осям  $d$  и  $q$ ; 9, 15 – преобразователи координат из 3-х фазной системы ( $A, B, C$ ) в ортогональную систему ( $d, q$ ) (снизу) и обратно (сверху); 10 – векторный модулятор; 11 – блок драйвера платы управления ПЧ; 12 – неуправляемый выпрямитель; 13 – балластный резистор; 14 – автономный инвертор напряжения; 16 – блок вычисления электрической скорости и положения ротора СЭД; 17 – СЭД с возбуждением от постоянных магнитов; 18 – датчик скорости СЭД

римента на указанной вычислительно-математической модели, позволяют сделать вывод о возможности использования системы ПЧ–СЭД с точки зрения качества переходных процессов в динамических режимах работы электропривода поперечной подачи станка.

Результаты расчета экономической эффективности от внедрения в производство электропривода на базе СЭД с ПЧ серии ЭПВ и оценка уровня его безопасности и экологичности показывают целесообразность его применения для управления механизмом поперечной подачи обрабатывающего центра ИР500ПМФ4.

#### Библиографический список

1. **Справочник** по автоматизированному электроприводу / под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. **Обрабатывающий центр ИР500ПМФ4**. Руководство по эксплуатации. РЭ 500МФ4.000.001.
3. **ГОСТ 27803-88**. Электроприводы регулируемые для станкостроения и робототехники. Общие технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1988.
4. **Servo motors** by Lenze Drive Systems GmbH. Germany 042008 Version 1.0 (English).
5. **Виноградов А.Б., А.Н. Сибирцев, С.В. Журавлев** Электроприводы с преобразователями частоты серии ЭПВ (исполнение 3): Практ. пособие по проектированию / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2007.
6. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008.

*К.С. Медведев, студ.; А.В. Пруднов к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В СХЕМЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА ТКАЦКОГО ЦЕХА

Влажность в текстильной промышленности является существенным фактором, влияющим на качество изготавливаемой продукции. Низкая влажность в текстильном производстве, а впоследствии и при хранении материалов, может привести к серьезным негативным последствиям:

- происходит обрыв нитей из-за того, что текстильные волокна в процессе трения теряют эластичность и прочность, становятся более тонкими и хрупкими;
- снижение количества проходов челнока;
- затруднение движения нитей и тканей;

- повышение температуры при трении и электростатического напряжения, ведущих к росту пожароопасности в цехах;
- снижение веса и качества материала во время хранения;
- повышенное содержание пуха в воздухе, создающее недопустимую санитарно-гигиеническую обстановку и влияющее на производительность и срок эксплуатации оборудования для текстильного производства;
- изменение геометрических размеров ткани;
- увеличение содержание пыли, остатков текстильных волокон в воздухе приводит к ухудшению самочувствия работающего персонала, возникновению респираторных заболеваний, аллергических реакций.[1]

Стабилизация влажности воздуха в ткацком цехе способствует максимизации прибыли с одновременным улучшением климата для работы персонала на производстве. Увеличение прибыли происходит потому, что при идеальном уровне влажности воздуха возрастает прочность на растяжении фактически всех натуральных волокон. За счёт повышения производительности и сокращения отходов растёт рентабельность текстильного производства. Как уже отмечалось пряжа при низкой влажности теряет свою эластичность, становится менее прочной и проявляет склонность к обрывам. При прохождении волокон через ткацкий станок, в случае пересушки они становятся ломкими и рвутся, приводя к простоям, снижению производительности труда и браку, который в ряде случаев достигает десятков процентов.

Поддержание определенной влажности создает благоприятные условия для работающего персонала, поскольку исключается попадание пуха и пыли в легкие обслуживающего персонала, что снижает заболеваемость и в результате повышается эффективность производства.

В ряде производств текстильной промышленности для нормального протекания технологического процесса применяются системы кондиционирования воздуха представляющие собой совокупность технических средств, служащих для приготовления, перемещения и распределения воздуха, а также автоматического регулирования его параметров.

Основным элементом системы кондиционирования воздуха является центральный кондиционер.

Центральный кондиционер состоит из отдельных типовых секций, герметично соединенных между собой. На рис. 1 представлена секция увлажнения оросительного типа. С помощью насоса подается вода, которая распыляется через форсунки в проходящем воздухе. В секции увлажнения обычно устанавливают поплавковый клапан, который предотвращает перелив воды в данной секции и тем самым исключает попадание воды в другие секции кондиционера.

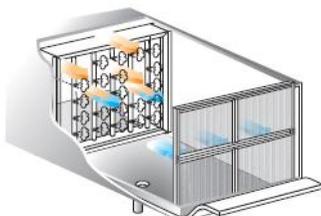


Рис.1. Секция увлажнения оросительного типа

Функциональную схему АСР влажности в ткацком цехе можно представить следующим образом рис. 2:

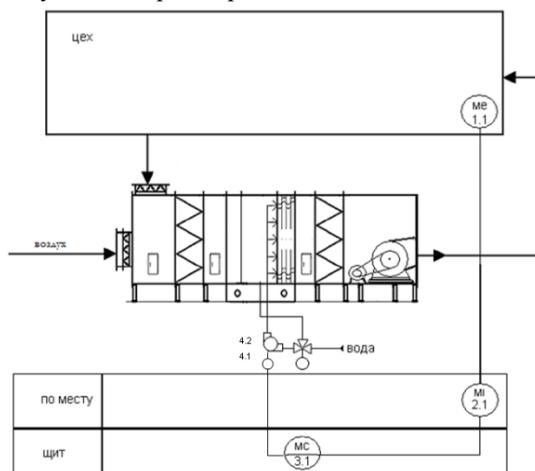


Рис.2. Функциональная схема АСР влажности в ткацком цехе

В цехе установлен датчик влажности ME (1.1), измеряющий относительную влажность воздуха, которая отображается на показывающем приборе MI (2.1). Сигнал с датчика влажности поступает на преобразователь частоты MC (3.1), тот в свою очередь обрабатывает и формирует сигнал управления, который идет на привод (4.1) центробежного насоса (4.2). Привод управляет центробежным насосом, тот в свою очередь подает, из поддона камеры орошения, воду в кондиционер. Вода, пройдя по трубам, равномерно распыляется с помощью форсунок. Кондиционируемый воздух проходит через оросительную камеру и тем самым увлажняется, в дальнейшем попадая в ткацкий цех необходимой влажности.

На предприятии установлен центральный кондиционер фирмы «ВЕЗА» тип КЦКП-20, где расход воды в камере орошения  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$  при давлении воды перед форсунками  $150 \text{ кПа}$ .

Режим работы центробежного насоса определяется тремя величинами: подачей  $Q$ , напором  $H$ , и угловой скоростью  $\omega$ . Эти величины также определяют момент сопротивления движению и мощность на валу механизма. В качестве насоса выбран консольный насос F 40/160С фирмы Pedrollo имеющий следующие технические характеристики:

- подача  $6\text{-}36 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- напор  $32\text{-}20 \text{ м}$ .

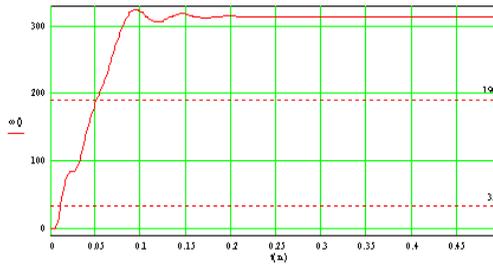
Двигатель выбирается исходя из технических характеристик насоса.

В качестве приводного двигателя центробежного насоса выбран асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором АИР80В2, питающийся от частотного преобразователя напряжения.

Применение системы частотно регулируемого электропривода замкнутой по влажности позволяет обеспечить все те положительные эффекты о которых говорилось в начале статьи. Система обеспечивает также непрерывность процесса регулирования, исключает динамические удары.

С использованием математической модели выполнено исследование динамических характеристик электродвигателя (рис. 3).

Временная диаграмма пуска двигателя  $\omega=f(t)$ :



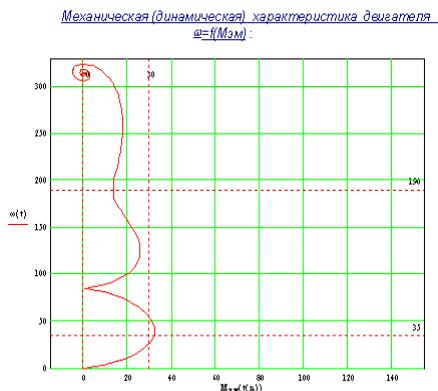


Рис.3. Динамические характеристики системы электропривод

#### Библиографический список

1. Автоматизация производственных процессов текстильной промышленности: В 3-х т. /Под ред. Д.П. Петелина. –М.: Легпромбытиздат 1994.

*А.А.Чернов, студ.;*  
*рук. А.В. Пруднов к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

## ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРА УДАЛЕНИЯ СТРУЖКИ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕХА

Для создания нормальных и безопасных условий труда, предотвращения выделения пыли от оборудования в производственном помещении, а также для транспортирования различных сыпучих материалов, применяются системы аспирации и пневмотранспорта. Аспирация характеризует принцип действия инженерных систем, состоящий в очистке воздуха от технологического оборудования. Эти системы имеют санитарно-гигиеническое, экологическое и технологическое назначения, а также позволяют обеспечить взрыво- и пожаробезопасность. Качество обработки на деревообрабатывающих производствах возможно только в том случае, если система аспирации - пылеудаления является качественной и надежной. Работа любого деревообрабатывающего станка сопровождается выделением большого количества древесных отходов (стружка, опилки, пыль), поэтому система

аспирации - неперенный атрибут деревообрабатывающих производств. Грамотно спроектированная аспирационная система позволяет очистить цех от пыли и производить более качественную продукцию. Основной функцией современных систем аспирации является эффективное и надежное обеспыливание, очистка воздуха от пыли в рабочей зоне производственных помещений и охрана атмосферного воздуха от загрязнения пылевыми выбросами с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами.

Используемая на объекте аспирационная система является по характеру циркуляции воздуха-прямоточная. Прямоточные системы аспирации - это системы, в которых аспирационный воздух забирается из объема производственного помещения и после очистки воздуха от пыли в пылеулавливающих агрегатах выбрасывается в атмосферу.

По характеру гидравлического режима - система с переменной производительностью. По характеру связи с технологическим оборудованием - централизованная система аспирации.

К централизованным относятся системы аспирации, к которым подключено несколько рабочих органов деревообрабатывающего оборудования с независимым включением и выключением. Эти рабочие органы могут принадлежать как нескольким единицам технологического оборудования, так и одной, но в любом случае одновременность их работы не является обязательной.

Немало важным элементом системы аспирации является циклон.

Это аппарат, в котором отделение твердых частиц от воздуха осуществляется за счет использования центробежной силы, развивающейся при вращательно-поступательном движении материаловоздушного потока и прижимающей частицы к стенке циклона. При этом частицы теряют кинетическую энергию потока и под воздействием силы тяжести опускаются в направлении выгрузного отверстия. До конца прошлого века циклоны были наиболее распространены в деревообрабатывающих производствах, это было связано с простотой их изготовления и обслуживания, а также небольшими капитальными затратами. Однако их существенные недостатки (ограниченные возможности очистки от пыли, не отвечающие современным требованиям; необходимость их монтажа вне производственных помещений, что приводит к удалению теплого воздуха из помещений) значительно сузили область их применения в настоящее время.

В цехе организовано удаление отходов деревообработки от 4-х стороннего продольно-фрезерного станка, модель «BEAVER 532B»; 4-х стороннего продольно-фрезерного станка, модель «BEAVER 415B»;

шлифовального станка модель «ALTESA», серии «SP-RP 1100A»; рейсмусового одностороннего станка, модель «MB 1013E».

Аспирация организована системой трубопроводов, вентилятором ВЦП 7-40 №8, циклоном УЦ-38-8 с частотно-управляемым приводом асинхронного двигателя 5АИ180М4У3, типа «ХЬЮНДАЙ» модель «N 300-P», рис.1.

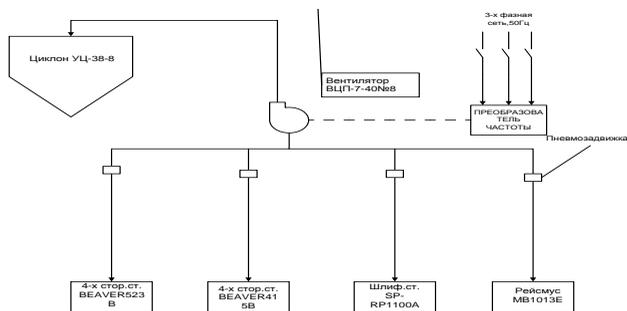


Рис.1. Технологическая схема установки

На каждом ответвлении трубопровода к станкам установлены пневмозадвижки, которые открываются с помощью электромагнитов, срабатывающих при включении станка.

Предлагается система удаления отходов при обработке древесины на станках, построенная на регулировании частоты вращения двигателя вентилятора в зависимости от давления воздуха в трубопроводе. Сигнал от датчика давления подаётся в систему частотно-регулируемого электропривода.

В настоящее время частота вращения двигателя, приводящего в движение вентилятор, устанавливается в зависимости от числа и типа включённого технологического оборудования. Эта зависимость получена в результате экспериментальных исследований системы удаления отходов при обработке древесины на станках.

Преобразователь частоты работает в многоскоростном режиме, который задаётся четырёхбитным числом в двоичном коде.

**Таблица 1. Уставка частоты в зависимости от типа и числа включенного оборудования**

Скорость многоскоростного режима	Двоичный код	SP-RP 1100A	MB 1013E	BEAVER 532B	BEAVER 415B	Уставка частоты, Гц
Скорость 0	0000	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	0
Скорость 1	0001	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	38
Скорость 2	0010	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	42
Скорость 3	0011	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	43
Скорость 4	0100	ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	38
Скорость 5	0101	ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	43
Скорость 6	0110	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	42
Скорость 7	0111	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	43
Скорость 8	1000	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	40
Скорость 9	1001	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	42
Скорость 10	1010	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	45
Скорость 11	1011	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	46
Скорость 12	1100	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	42
Скорость 13	1101	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	45
Скорость 14	1110	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	46
Скорость 15	1111	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	ВКЛ	47

Технические данные центробежного вентилятора ВЦП 7:

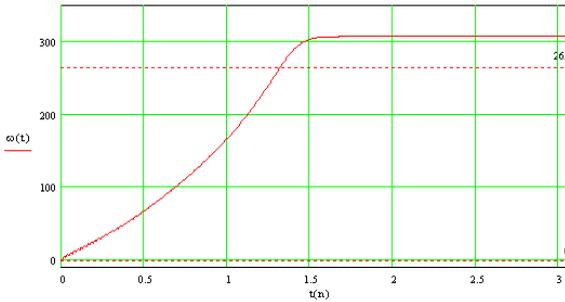
- частота вращения на рабочем колесе 1470(об/мин);
- производительность  $(8.7 \div 22) * 1000$  (м<sup>3</sup>/час);
- полное давление 2450÷3200 (Па).

Технические данные электродвигателя 5АИ180М4УЗ:

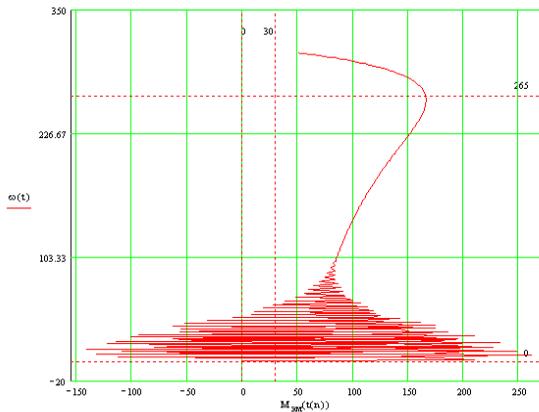
- мощность двигателя 30 (кВт);
- напряжение сети 380/660 (В);
- частота сети 50Гц;
- номинальный ток 58/33,4 (А);
- класс изоляции «F»;
- число оборотов 1470 (об/мин);
- КПД = 91,4%;
- соединение обмоток Δ/ Y;
- $\cos \psi = 0,86$ ;
- масса 195кг.

Проведены исследования динамических характеристик электродвигателя с использованием математической модели. Результаты исследований приведены на рис.2.

*Временная диаграмма пуска двигателя  $\omega = f(t)$  :*



*Механическая (динамическая) характеристика двигателя  $\omega = f(M_{эм})$  :*



**Рис.2. К исследованию динамических характеристик электродвигателя**

*А.М. Кочетков, студ.;  
рук. А.В. Пруднов к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

В работе рассматриваются вопросы электропривода и автоматизации насосной станции, включающей в состав 3 центробежных насоса типа К100-65-250С со следующими техническими характеристиками:

подача (расход, производительность) 100 м<sup>3</sup>/ч;напор 80 м;  
обороты 2900 об./мин.

В соответствии с техническими характеристиками рассчитывается мощность и выбирается асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором типа 5А200L2У3 с параметрами:

мощность 45 кВт; частота вращения 2940об./мин.; ток статора 81,5А; коэффициент мощности 0,9.

Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения, называемое иногда частотным, находит в настоящее время широкое применение в приводах механизмов с изменяющейся нагрузкой, к числу которых относятся центробежные насосы с переменным расходом жидкости.

Для вентиляторного характера нагрузки, которой обладают центробежные насосы,  $M_c \propto \Omega^2$ , где  $M_c$  - статический момент нагрузки,  $\Omega$  - частота вращения, основной закон регулирования имеет вид:

$U/f^2 = \text{const}$ , где  $U$ -фазное напряжение,  $f$  - частота напряжения, однако следует отметить, что эта зависимость относится к насосу, работающему на постоянное гидравлическое сопротивление. При этом напор пропорционален второй степени скорости, а расход - первой степени, мощность - третьей степени скорости. Поскольку предполагается, что система привода насосов будет работать по замкнутой схеме со стабилизацией напора при переменном расходе, то в этом случае  $M_c = \text{const}$  и основной закон регулирования имеет вид  $U/f = \text{const}$ . Такой привод является мощным энерго- и ресурсосберегающим средством. так как кроме экономии электроэнергии сберегается ресурс двигателя и насоса из-за снижения скорости, сокращаются потери воды в трубопроводах.

На рис.1,а представлена схема насосного агрегата при стабилизации давления (напора) и переменном расходе. А рис. 1,б показаны характеристики насоса при различных скоростях (кривые 1', 2', 3') и сопротивлениях системы (кривые 1, 2, 3).Если расход изменяется от  $Q_A$  до  $Q_B$  и  $Q_C$ , то рабочая точка  $H-Q$  при регулировании перемещается

по искусственным характеристикам насоса из А в С, сохранив постоянный напор  $H_3$ . При регулировании расхода дросселированием скорость  $\Omega = \Omega_1 = \text{const}$ , рабочая точка перемещается по характеристике 1' насоса в С'. В этом случае излишки напора  $\Delta H = H'_c - H_3$ , потерянная гидравлическая мощность насоса  $\Delta P = \Delta H \cdot Q$ . На рис. 1, в приведены зависимости потребляемой приводом насоса мощности от относительного расхода при регулировании дросселированием ( $\Omega = \text{const}$ ) и при стабилизации напора путем регулирования угловой скорости электродвигателя. [1]/

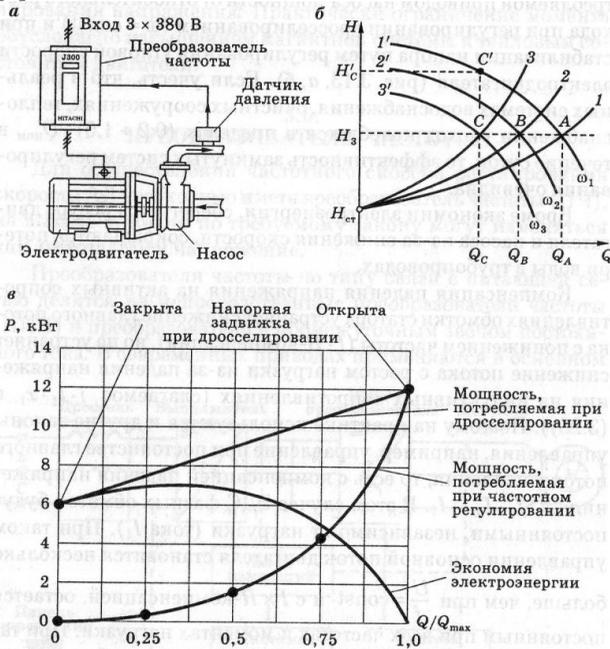


Рис.1 Схема насосного агрегата при стабилизации напора ( $H = \text{const}$ ) и  $Q = \text{var}$  (замкнутая система) (а); характеристики насоса при различных скоростях (б); зависимости потребляемой приводом мощности при различных способах регулирования расхода (в)

На рис.2 представлена силовая часть принципиальной схемы электропривода насосной станции. В качестве преобразователя частоты применен специализированный преобразователь Е1-Р7002-020Н фирмы «ВЕСПЕР» для управления приводами механизмов с вентилятор-

ной характеристикой. Частотный преобразователь «ВЕСПЕР» использует IGBT транзисторы.

Система привода работает по замкнутой по давлению схеме. Датчик давления выдает выходной сигнал 4...20 мА или 0...10 В. Для управления электроприводом может применяться программируемый контроллер. Система управления электроприводом работает в двух режимах управления: автоматическом и ручном. Автоматический режим является основным. В автоматическом режиме производится автоматическое поддержание давления на заданном уровне. Ручной режим используется при выходе из строя преобразователя частоты, контроллера, датчика давления или в иных случаях, например, при проведении регламентных работ. В ручном режиме каждый насос работает непосредственно от сети, регулирование давления производится с помощью задвижек.

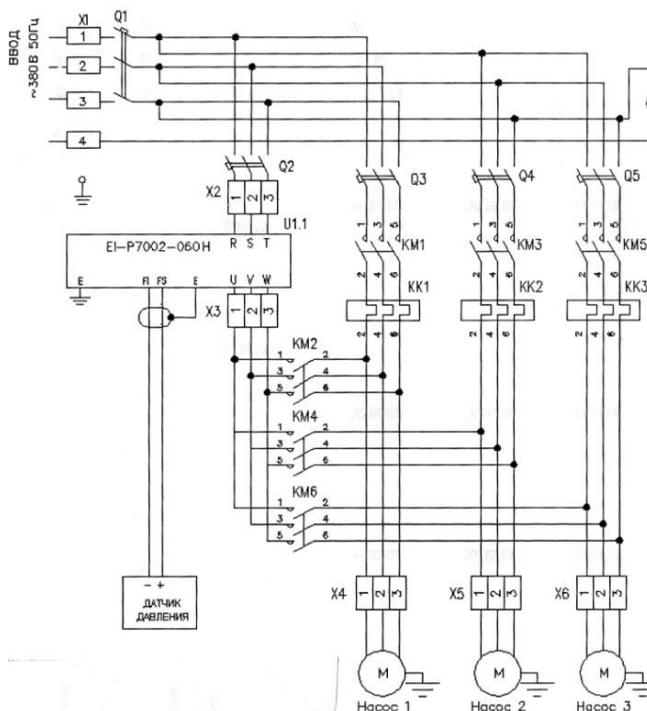


Рис. 2. Силовая часть принципиальной схемы электропривода насосной станции

Защита электродвигателей двигателей при коротком замыкании осуществляется автоматическими выключателями Q3, Q4, Q5, а при перегрузке - электротепловыми реле КК1, КК2, КК3.

Последовательность включения насосов (статус насосов) может быть любой, при условии: не допускается присваивать различным насосам одинаковый статус (порядковый номер). В случае неверной комбинации задания статуса насосов контроллер выдает аварийный сигнал (пуск не производится). Если статусы насосов определены правильно, то контроллер подключает силовой выход преобразователя частоты к двигателю основного насоса. Опрос статуса насосов производится один раз при пуске.

Если коммутация пускателя произошла неправильно, контроллер выдает также аварийный сигнал. Опрос состояния пускателей производится постоянно во время работы системы управления. В случае самопроизвольного изменения состояния пускателей выдается аварийный сигнал и все пускатели отключаются. Перед последующим пуском необходимо определить и устранить причину переключения (несрабатывания) пускателя. После проверки правильности коммутации основной насос плавно разгоняется, и производится набор давления воды в магистрали и дальнейшее автоматическое поддержание давления на заданном уровне.

Задание уровня давления  $P_{(атм.)}$ , поддерживаемого в автоматическом режиме, осуществляется с передней панели системы управления задатчиком давления – переменным резистором со шкалой, отградуированной в % от максимального рабочего давления датчика. При возрастании расхода воды производительности одного насоса не хватает для создания требуемого давления. Давление начинает уменьшаться. При этом насос работает с максимальной производительностью преобразователя частоты выдает в контроллер сигнал «Низкое давление». Если сигнал «Низкое давление» удерживается в течение времени  $t = \{10с \text{ плюс временная задержка потери обратной связи}$  основной насос отключается от преобразователя частоты и подключается напрямую к сети, а первый дополнительный насос подключается к преобразователя частоты. Если производительности двух насосов не хватает для создания требуемого давления, аналогичным образом первый дополнительный насос подключается напрямую к сети, а второй дополнительный насос к преобразователя частоты. Таким образом, в любой момент времени только один насос работает от преобразователя частоты, а остальные насосы работают напрямую от сети или отключены. Если давление, создаваемое несколькими насосами, становится больше заданного, то появляется сигнал «Высокое давление». При удержании данного сигнала в течение 10с контроллер отключает дополнительные насосы в обратной последовательности.

Разработана коммутационная программа для программируемого контроллера.

**Библиографический список**

1. **Епифанов А.П.** Основы электропривода: Учебное пособие-СПб: Издат. «Лань», 2009.-192с.

*С. М. Пискунов, студ.; рук. А.В. Пруднов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СЕГМЕНТНЫХ И ДОННЫХ  
ЗАТВОРОВ**

Задачей системы управления является обеспечение согласованной работы электродвигателей, расположенных с правой и левой сторон, как донных так и сегментных затворов. Для решения этой задачи и применяется программируемый логический контроллер, организованный на базе интеллектуальной станции ET200S производства компании «Siemens». Модуль программируемого логического контроллера - осуществляет опрос абсолютных энкодеров, контролирующих положение валов двигателей и производящих подсчет числа оборотов двигателей, с целью получения значения позиций валов двигателей в текущий момент времени, а так же количества посчитанных оборотов двигателей. Связь осуществляется посредством использования модуля сети «Profibus» По этой же сети, осуществляется связь между программируемым логическим контроллером и жидкокристаллической панелью оператора.

Взаимодействие компонентов системы управление подъемом/опусканием затворов осуществляется следующим образом:

Модуль программируемого логического контроллера - осуществляет опрос абсолютных энкодеров с целью получения значения позиции вала двигателя в текущий момент времени, а так же количества посчитанных оборотов двигателя.

Модуль сети «Profibus» - осуществляет связь между программируемым логическим контроллером и абсолютными энкодерами по сети, так же осуществляет связь между программируемым логическим контроллером и жидкокристаллической панелью оператора. [1/

Управление процессом в общем случае сводится к подъему и опусканию затворов. Особенность данной системы заключается в синхронном подъеме/опускании левой и правой сторон затвора. Однако принципы устранения перекоса при подъеме и опускании отличаются.

При подъеме затвора перекося затвора устраняется путем перевода обгоняющей стороны на пониженную скорость до момента выравнивания сторон. При опускании перекося затвора устраняется путем остановки обгоняющей стороны с наложением тормоза с последующим ожиданием отставшей стороны.

Система управления позволяет реализовать пять режимов работы подъема/опускания затворов: ручной; полуавтоматический, автоматический; ремонтный; дожим.

Разница между автоматическим, полуавтоматическим и ручным режимами работы заключается в том, что в автоматическом и полуавтоматическом режимах работы программируемый логический контроллер отслеживает значение перекося затвора и пытается его устранить путем воздействия на скорость вращения электродвигателей. В автоматическом режиме система управления контролирует предельное положение затворов, чего не происходит в полуавтоматическом режиме. Так же в полуавтоматическом режиме не предусмотрена остановка механизма при достижении предварительно задаваемого с панели оператора значений открытия/закрытия затворов.

В ручном режиме работы можно выделить совместный и раздельный режимы. При исправной системе автоматического управления процессом подъемом/опусканием затворов ручной совместный режим и полуавтоматический режим – это тождественные понятия. В случае выхода из строя системы автоматического управления подъемом/опусканием затворов в ручном совместном режиме работы, подъем /опускание затворов производится одновременно, как левой стороны, так и правой, при этом контроль перекося осуществляется оператором в ручную, путем перевода механизмов в ручной раздельный режим с последующей коррекцией перекося.

В ручном (раздельном) режиме работы программируемый контроллер не задействован.

Контроль перекося в ручном (раздельном) режиме осуществляется визуально, его устранение производится путем включения и выключения требуемых электродвигателей.

Ремонтный режимы работы – это режим, при котором шунтируются конечные выключатели: 1) Перегруз цепи, 2) Крайнее верхнее положение затвора, 3) Крайнее нижнее положение затвора, 4) Аварийный перекося затвора

Режим дожима – это режим, при котором происходит шунтирование конечных выключателей предельного нижнего положения донных затворов. В режиме дожима персонал контролирует процесс дожима

по значениям тока двигателей отображаемых на амперметрах, расположенных на пульте управления АД1.

На рис.1 представлена главная страница панели оператора.

Режим работы указывается в верхней части экрана на панели оператора. Направление движения двигателя показывается красными стрелками.

Ток каждого двигателя можно оценить на экране панели оператора.

Положение каждой стороны затвора в миллиметрах относительно нулевой точки (задается при калибровке), а так же величину перекоса, можно также оценить на экране панели оператора.

Скорость двигателя (100% или 50%) отображается рядом с изображением электродвигателя.

В режиме подъема затвора, при достижении затвором предельного положения задаваемого с панели оператора, оба электродвигателя будут отключены. Останов электродвигателей производится одновременно (если хотя бы один механизм достиг предельного значения). На панели оператора отобразится сообщение «верхняя позиция».

В режиме опускания затвора останов электродвигателей в нижнем положении производится:

- для донного затвора - путем контроля тока упора электродвигателей каждым двигателем в отдельности, причем для исключения ложного отключения с выдачей сообщения «нижняя позиция» всегда контролируется позиция энкодера (наличие нижнего положения затвора при наличии тока упора). В случае наличия тока упора без наличия нижней позиции энкодера, производится останов электродвигателей с выдачей аварийного сообщения. Значение тока упора задается в режиме настройки.

- для сегментного затвора - останов электродвигателей в нижнем положении производится при достижении затвором нижнего положения определяемого на этапе калибровки.

Калибровка положений затворов необходима для определения нижних позиций затворов, а так же коррекции расчетного значения величины подъема/опускания, обусловленной погрешностями кинематической цепи.

Полученные в режиме калибровки позиции затворов в автоматическом режиме работы будут приняты системой автоматики как предельно нижние значения положения затворов.

Система управления предусматривает введение токов упора каждого двигателя. По данному значению будет производиться останов вращения двигателей затворов при упоре в дно или в другое препятствие

Вводится также предельное значение перекоса, при котором производится перевод опережающего двигателя на 50% скорости при подъеме затвора и останов опережающего двигателя при опускании затвора, задается аварийное значение перекоса, при котором производится остановка автоматического режима работы с выдачей аварийного сообщения. Так же задается время запуска двигателей, фактически данное значение является задержкой аварийного отключения электродвигателей по току упора при запуске двигателей.

Управление механизмами в ручном рабочем режиме осуществляется с переносного пульта. Предельные положения затворов в данном режиме контролируются конечными выключателями.

Имеется возможность управления механизмами затворов как в раздельном режиме (отдельно управляется подъемное устройство левой и правой стороны), так и в совместном режиме (подъемное устройство левой и правой стороны управляются совместно).

Коррекция перекоса производится следующим образом:

При подъеме затвора визуально контролируется наличие перекоса. При обнаружении перекоса останавливаются двигатели обеих сторон. Затем производится опускание обогнавшей стороны до уровня, при котором происходит выравнивание затвора.

При опускании затвора визуально контролируется наличие перекоса. При обнаружении перекоса останавливаются двигатели обеих сторон. Затем производится опускание отставшей стороны до уровня, при котором происходит выравнивание затвора.

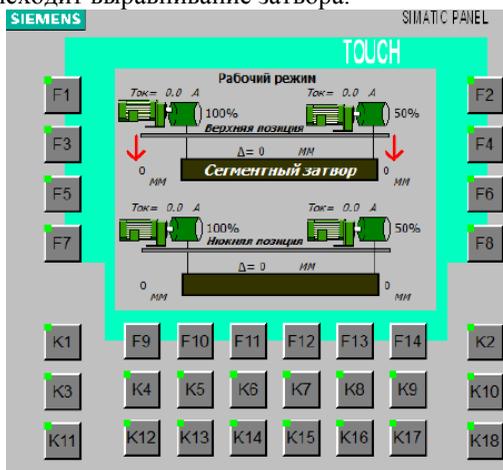


Рис.1 Главная страница панели оператора

**Библиографический список**

1. **Реконструкция** электрооборудования водосливной плотины. Рабочая документация. ОАО «Электроремонт ВКК». 2011.

*А.В. Каблуков, студент; рук. Ю.П. Спичков,  
к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

**ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ  
ПОТОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Достижения в области разработки новых технологий обработки текстильных материалов врасправку является основой для создания технологического оборудования нового поколения, отличающегося высокой производительностью, большей экономичностью и меньшими габаритами.

Одной из актуальных проблем здесь является проблема снижения натяжения ткани. Вытягивание ткани на всех стадиях обработки приводит к бытовой усадке, которая является одним из качественных показателей готовой ткани.

В данной работе рассматривается поточная линия ЛПСС-140 для обработки текстильных тканей. Главная роль в решении задачи совершенствования этой линии принадлежит автоматизированному электроприводу, являющемуся основой для создания автоматической системы регулирования и стабилизации натяжения обрабатываемых материалов.

Системы электропривода непосредственно осуществляют синхронизацию движения рабочих машин во всех технологических режимах, производят стабилизацию заданных скоростей и их соотношения, создают условия для управления важнейшими физико-механическими параметрами ткани (натяжением, вытяжкой и т.п.).

Замена нереверсивного электропривода постоянного тока реверсивным асинхронным приводом на основе частотных преобразователей, который обеспечивает работу электродвигателя в режиме оптимального к.п.д. во всем диапазоне регулирования скорости линии, позволяет существенно снизить энергопотребление и при этом отпали проблемы пуска и останова линии в рабочих режимах. Наиболее подходящим для решения поставленной задачи является векторно-

управляемый электропривод с асинхронными двигателями, и в частности отечественные электропривода ЭПВ.

Достигнутые показатели работы электропривода в значительной степени определяют уровень развития технологического оборудования и качество выпускаемой ткани.

В тоже время совершенствование приводных устройств поточных линий, вызывает повышенные требования к системе автоматического регулирования натяжения обрабатываемой ткани (АСР НТ), одним из элементов которой является зона ее обработки.

При этом обеспечение основного фактора качественной обработки ткани малого натяжения зависит от рационального выбора конструкции тканеведущих узлов технологического оборудования, а также структуры взаимосвязанного электропривода.

В работе приведены методы конструктивной модернизации АСР НТ и показано, что это можно достичь за счет рационального выбора параметров датчика натяжения (ДН) и места его установки в зоне обработки транспортирования материалов. В работе показано, что в условиях увеличения ширины технологического оборудования и связанного с этим возрастание массы измерительного ролика  $m_p$  и его момента инерции  $J_p$  необходимо учитывать инерцию вращения измерительного ролика, а также его расположения относительно приводных валов.

Выбор места установки ДН в зоне деформации определяет как динамические характеристики автоматической системы регулирования, так и рациональную конструкцию технологической машины в целом.

В настоящее время имеются отдельные литературные данные по проектированию систем электропривода, в том числе и рекомендации по конструктивному совершенствованию таких систем.

Это обуславливает необходимость разработки обобщенной комплексной методики разработки АСР НТ с учетом особенностей работы электропривода, конструкции оборудования и физико-механических свойств ткани.

В ней также должны учтены вопросы согласованного аварийного останова машин линии в условиях применения частотно-регулируемых электроприводов.

Большое значение в этих условиях приобретает и вопрос разработки математических моделей расчета таких АСР НТ.

Так как поточная линия - это совокупность локальных АСР натяжения ткани, то вытекает также и задача анализ многосвязной системы электропривода и методы улучшения за счет оптимизации его структуры динамических характеристик.

Апробация представленной методики расчета АСР натяжения ткани в поточном оборудовании текстильной промышленности в данной работе показана на примере локальной зоны "отжим- промывная ванна" первой секции линии ЛПСС-140.

*А.А. Копач, студент; Ю.П. Спичков, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **АСИНХРОННЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА**

В настоящее время значительно расширилась область применения регулируемых электроприводов переменного тока и прежде всего в тех областях, где ранее использовались электроприводы постоянного тока.

Сейчас в промышленности наиболее распространен тип электропривода с двигателем переменного тока, который включает в себя приводной преобразователь на основе преобразователя частоты со звеном постоянного тока и инвертором с широтно-импульсной модуляцией.

В данной работе рассматривается электропривод механизма подачи шпиндельной бабки копировально-фрезерного станка модели 6В445., где движение подачи обуславливает перемещение инструмента.

Традиционно в подобных механизмах традиционно предполагалось использование электропривода с синхронным двигателем, обеспечивающего стабильную работу во всем диапазоне изменения скорости механизма подачи. Однако использование синхронных двигателей существенно удорожает стоимость электропривода.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором на сегодняшний день является самым распространенным типом электрической машины, в основном за счёт его простой конструкции, высокой надежности и малой их стоимостью.

Главным недостатком регулируемого асинхронного электропривода являются сравнительно небольшой общий диапазон регулирования скорости из-за неравномерности вращения на низких скоростях.

Копировально-фрезерный станок имеет небольшой уровень рабочих скоростей и, следовательно, небольшой их диапазон, но имея при этом высокий уровень быстрые установочные перемещения. Изделие и копир в процессе обработки остаются неподвижными, а перемещается лишь шпиндельная бабка, имеющую небольшую массу. В следствия этого момент нагрузки привода подачи шпиндельной бабка (ось Z) в установочных режимах не большой (в 3-4 раза меньше рабочего) и практически постоянен.

Учитывая эту особенность работы привода подачи шпиндельной бабки, было принято решение использовать электропривод с асинхронным двигателем, работающего в режиме двухзонного регулирования скорости. При этом область рабочих скоростей покрывается работой двигателя в первой зоне (от скорости  $\omega_{\min}$  до  $\omega_{\text{ном}}$ ), а скорости установочных перемещений –второй зоной при частотах (скоростях) выше номинальной.

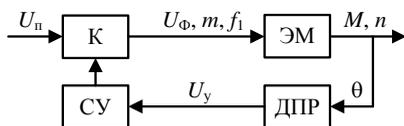
В ходе проводимых в рамках данной работы исследований электропривода механизма подачи показана целесообразность применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода, и в частности отечественного векторно-управляемого электропривода ЭПВ, исп.2.

Сравнение статических и динамических характеристик приводов подачи, их надежности и стоимости, условий эксплуатации с двигателями постоянного тока и с синхронными двигателями, а также с асинхронными двигателями показали преимущества последних

*Д.В. Горчаков, студ.;*  
*рук. В.В. Лыготчиков д.т.н., проф.*  
*(филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

## **БЕЗДАТЧИКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛА СИГНАЛА ПРОТИВО-ЭДС**

Вентильный двигатель представляет собой электромеханическую систему, состоящую из электрической машины (ЭМ) и полупроводникового коммутатора фазных обмоток (К), управление ключами которого производится системой управления (СУ) в зависимости от положения ротора. Для получения информации о положении ротора традиционно используется датчик положения ротора (ДПР) (рис.1).



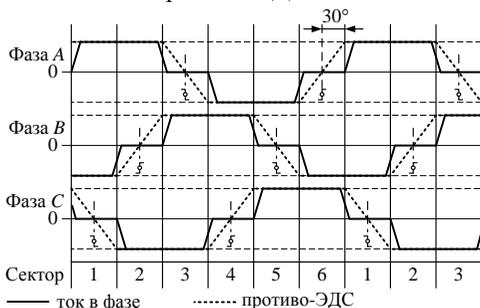
**Рис. 1. Вентильный двигатель**

Для повышения надежности и снижения стоимости электропривода можно использовать алгоритмы бездатчикового управления. При этом информация о положении ротора определяется косвенным путем.

Один из известных и наиболее часто используемых на практике алгоритмов бездатчикового управления ВД основан на определении положения ротора по прохождению через ноль противо-ЭДС в отключенной фазе [2].

Как правило, при бездатчиковом управлении ВД используется шестишаговый (или трапецеидальный) алгоритм коммутации, когда каждая фаза возбуждается на время, пока ротор поворачивается на 120 эл. градусов [1]. При вращении ротора вентильного двигателя каждая обмотка генерирует противо-ЭДС, которая действует навстречу напряжению источника, приложенному к фазе. На рис.2 представлены диаграммы противо-ЭДС и токов в обмотках двигателя при трапецеидальной коммутации. Каждый сектор на рис.2 имеет длину 60 эл. градусов. Коммутация фаз происходит на границе каждого из секторов. Таким образом, для определения момента коммутации достаточно обнаружить границы секторов. Как показано на рис.2, между моментом перехода через ноль сигнала противо-ЭДС и границей сектора существует смещение 30 эл. градусов.

Таким образом, для обеспечения работы ВД по шестишаговому алгоритму коммутации требуется точно определить момент перехода через ноль сигнала противо-ЭДС.



**Рис. 2. Диаграммы противо-ЭДС и токов в обмотках двигателя при трапецеидальной коммутации**

Управление двигателем реализуется следующим образом: сигнал противо-ЭДС каждой фазы двигателя сравнивается с потенциалом нейтральной точки, и с момента их равенства отсчитывается задержка, за которую ротор двигателя поворачивается на 30 эл. градусов, для определения момента коммутация фаз.

В пакете Simulink была построена модель описанной системы. И получен сигнал противо-ЭДС, содержащий импульсные помехи, вызванные коммутацией обмоток (рис.3). Под действием этих помех нарушается последовательность включения фаз в работу и происходит сбой в работе привода.

Для получения сигнала противо-ЭДС, не содержащего импульсных помех можно использовать различного рода фильтры. Простейшим способом борьбы с такого рода помехами является применение внешних RC-фильтров. Однако использование таких фильтров приводит к сдвигу выходного сигнала противо-ЭДС относительно реального, в результате чего появляется ошибка в определении положения ротора, величина которой зависит от частоты вращения, как показано на рис.3.

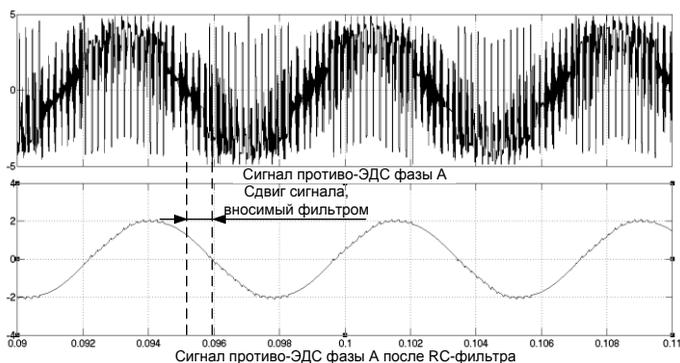


Рис. 3. Сигнал противо-ЭДС

Для устранения влияния помех в сигнале противо-ЭДС предлагается определять момент коммутации, анализируя не сам сигнал противо-ЭДС, содержащий высокочастотные помехи, а его интеграл.

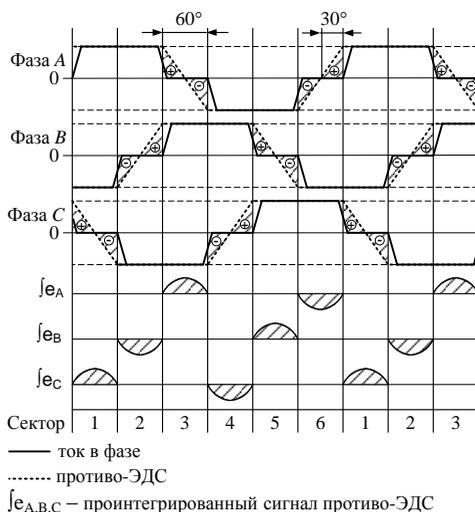


Рис. 4.

Метод заключается в следующем: если начать интегрирование сигнала противо-ЭДС в момент отключения фазы от источника, интеграл противо-ЭДС ( $e_{A,B,C}$  на рис.5) будет сначала расти (по модулю), а затем (при смене знака противо-ЭДС) – уменьшаться и станет равным нулю в момент равенства площадей под графиком противо-ЭДС фазы (заштрихованные треугольники). При допущении, что за время, пока ротор двигателя совершает поворот на 60 эл. градусов его частота вращения не изменяется, можно утверждать, что это как раз тот момент, когда необходимо включить эту фазу с противоположной полярностью.

Важным достоинством метода является не только то, что импульсные помехи хорошо фильтруются интегратором, но также при данном способе управления не возникает сдвиг противо-ЭДС, как при применении RC-фильтра.

Для проверки предложенного метода была составлена модель системы электропривода в пакете Simulink (рис.5). Моделирование системы, представленной на рис.5, показало, что применение данного способа управления полностью устраняет указанный недостаток алгоритма оценки положения ротора ВД по противо-ЭДС отключенной фазы (рис.5) и, в отличие от RC-фильтра, позволяет определять положение ротора двигателя без погрешности.

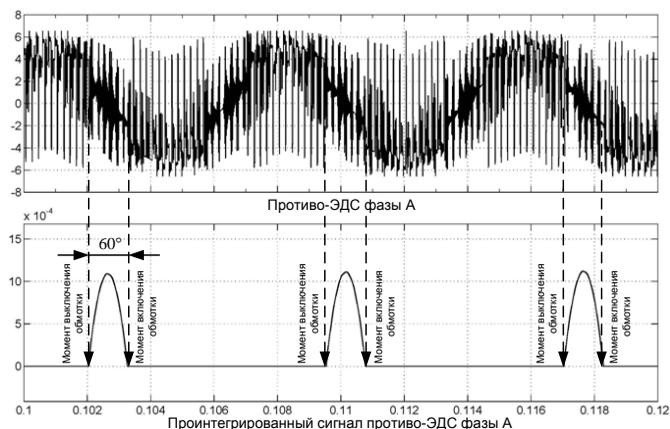


Рис. 5.

Еще одним важным достоинством такого алгоритма управления является возможность его реализации на базе микроконтроллера, когда сигналы противо-ЭДС подаются на входы АЦП, а их интегрирование производится программно. Программная реализация предложенного алгоритма позволяет улучшить систему управления без использования дополнительных компонентов (RC-фильтры, активные фильтры и др.), т.е. не увеличивая стоимость системы вентильного ЭП в целом.

#### Библиографический список

1. **Kaliappan E., Chellamuthu C.** A Simple Sensorless Control technique for PMSBLDC Motor Using Back EMF Zero Crossing// EuroJournals Publishing, Inc. – ISSN 1450-216X Vol.60 No.3 (2011), pp.347-360. – 2011.
2. **Torres D.** Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function // Microchip Technology Inc. – DS0AN1160. – 2008.

*В.В. Гуляев, студ.;  
рук. И.С. Саватеева, к.т.н., доц.  
(Филиал МЭИ в г. Смоленске)*

## **ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ**

В общем случае задачей оптимизации динамики систем электропривода (СЭП) является получение наиболее экономичным способом переходных процессов в системе, удовлетворяющих заданным требованиям. Обычно эти требования сводятся к реализации быстропротекающих и малоколебательных переходных процессов при управляющих и возмущающих воздействиях. При выборе структур СЭП и настроек регуляторов следует учитывать режимы работы электроприводов, жесткости связей, характер внешних и внутренних возмущений и соотношение динамических параметров объекта регулирования.

В реальных системах электропривода механические связи не являются абсолютно жесткими, поэтому представление СЭП как одномассовой может привести к существенным ошибкам. Упругие элементы могут стать причиной возникновения резонансных режимов, появления больших динамических перегрузок в механических передачах, развития усталостных напряжений и отказов.

Если при синтезе систем не учитывать упругие связи, это приведет к отличию характера движения исполнительного органа и вала электродвигателя от расчетных, то есть к нарушению заданного режима работы механизма. Влияние упругих связей делает практически невозможным реализацию присущего тиристорным электроприводам высокого быстродействия и установку стандартных для жесткой системы настроек регуляторов. Последнее особенно актуально для приводов предельного быстродействия.

Целью данной работы является исследование динамики СЭП с упругой связью и способов уменьшения негативного влияния упругости на переходные процессы в СЭП. В качестве управляемого источника энергии использовался тиристорный преобразователь. Принцип управления – двухконтурная система подчиненного регулирования с контурами тока и скорости. Рассматривались настройки регуляторов на модульный оптимум (МО) с пропорциональным (П) регулятором скорости (РС) и на симметричный оптимум (СО) с пропорционально-интегральным (ПИ) РС.

Одним из способов уменьшения влияния упругой связи является коррекция путем придания требуемых динамических свойств регуляторам контуров. При выборе настройки следует учитывать требования предъявляемые к СЭП, т.к. настройка на МО дает невысокое быстродействие и малую жесткость статических характеристик системы, а настройка на СО, в свою очередь, дает большое перерегулирование в переходных процессах. Поэтому для удовлетворения требованиям применяют настройку на промежуточный оптимум.

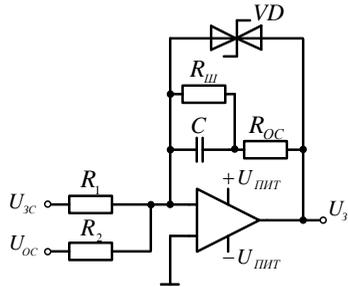


Рис. 1. Принципиальная схема регулятора скорости

Регулятор скорости (рис. 1) при настройке на промежуточный оптимум будет иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{pc}(p) = \frac{R_{OC}}{R_1} \cdot \frac{\rho+1}{\rho} \cdot \frac{\frac{R_{OC} \cdot C \cdot p}{\rho+1} + 1}{\frac{R_{OC} \cdot C \cdot p}{\rho} + 1}$$

Изменяя значение  $\rho = R_{OC}/R_{ш}$ , можно достичь требуемого характера переходных процессов.

Однако настройкой регуляторов не всегда удается в достаточной степени снизить влияние упругой связи, поэтому эффективнее использовать последовательную коррекцию при помощи включения пассивных и активных фильтров или параллельную коррекцию с введением гибких обратных связей от выходных величин [1].

При последовательной коррекции корректирующее звено должно быть фильтром с ограниченной полосой пропускания [2]. Основными требованиями к такому фильтру являются: подавление частот механического резонанса, плавное и независимое изменение частоты

настройки и добротности фильтра, высокая стабильность работы. Этим требованиям могут удовлетворять как пассивные, так и активные корректирующие звенья. Однако использование пассивных фильтров практически затруднительно ввиду весьма низких частот упругих колебаний. Поэтому более целесообразным является применение активных фильтров, выполненных на базе операционных усилителей или эмиттерных повторителей.

Активный полосно-заграждающий (режекторный) фильтр вводится на выход РС и имеет частотную характеристику инверсную по отношению к резонансному пику логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАХ) объекта. В результате ЛАХ объекта не содержит пика, что дает возможность существенно повысить быстродействие СЭП.

Параллельная коррекция систем с упругими связями может быть выполнена различными способами как с прямым, так и с косвенным измерением регулируемых параметров. Наиболее простым и эффективным способом является введение дифференцирующих отрицательных обратных связей по скорости двигателя, поскольку при таком соотношении параметров амплитуда упругих колебаний якоря двигателя превосходит амплитуду колебаний механизма [2]. Этот способ сводится к включению гибкой обратной связи (ГОС) на вход регулятора тока якоря. Корректирующее звено представляет собой пропорционально-дифференциальное звено.

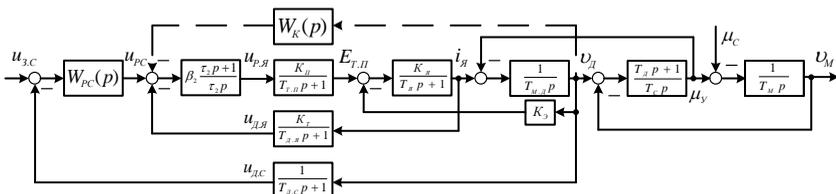


Рис. 2. Структурная схема системы электропривода

В пакете прикладных программ Matlab Simulink на базе структурной схемы подчиненного регулирования (рис. 2) была разработана модель двухмассовой системы электропривода, учитывающая влияние упругих связей на быстродействие, колебательность и перегрузочную способность механизма. На базе созданной модели анализировались пути уменьшения влияния упругих связей в переходных процессах на поведение системы.

Исследования показали, что степень подавления упругих колебаний и реально достижимое быстродействие СЭП при последовательной коррекции с использованием активных фильтров и при параллельной коррекции с введением ГОС по скорости двигателя приблизительно одинаковы. Но в условиях возможного изменения параметров (коэффициента передачи тиристорного преобразователя, момента инерции механизма, частоты упругих колебаний) следует использовать параллельную коррекцию, так как она обеспечивает более стабильную работу СЭП.

#### Библиографический список

1. **Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г.** Тиристорные системы электропривода с упругими связями. Л.: Энергия, Ленингр.отд-ние, 1979.
2. **Егоров В.Н., Шестаков В.М.** Динамика систем электропривода. Л.: Энергоатомиздат., Ленингр.отд-ние, 1983.
3. **Полецук В.И.** Инвариантная оптимизация упругой двухмассовой системы с подчиненным регулированием // Электричество, 1997, № 3.

*С.Г. Карпенков, Д.С. Макеева, студ.;  
рук. В.В. Рожков, к.т.н., доц.  
(Филиал МЭИ в г. Смоленске)*

## РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В современных частотно-регулируемых приводах чаще всего используются преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока по схеме неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор тока (НВ-АИН). В преобразователях этого типа используется двойное преобразование электрической энергии выпрямление и инвертирование [1].

Преобразователи упомянутого типа подходят для большинства применений в общепромышленном электроприводе, но имеют и ряд недостатков, которые условно можно разделить на две группы. К первой группе недостатков относятся широко используемые способы торможения. Это либо динамическое торможение (торможение постоянным током), организуемое при помощи специального

алгоритма управления ключами АИН, либо торможение с выделением энергии на внешнем сопротивлении, организуемое дополнительным ключом. Оба способа торможения нельзя отнести к энергоэффективным. Вторая группа недостатков – внедрение в сетевое напряжение нелинейными искажениями, вносимых как работой неуправляемого выпрямителя на входе, так и АИН.

Для обеспечения энергетически более выгодного рекуперативного торможения разработаны и предлагаются потребителю рекуперативные модули. В этом варианте НВ заменяется активным выпрямителем, работающим в режиме рекуператора [2]. Это пока еще достаточно дорогостоящее решение, требующее тщательного технико-экономического обоснования для применения в каждом конкретном случае. Для уменьшения влияния второй группы недостатков сейчас интенсивно разрабатываются динамические компенсаторы нелинейных искажений или так называемые «кондиционеры сети» [3]. Однако, оба эти устройства можно совместить в одном многофункциональном, что предлагается сделать в [4].

Целью настоящей работы является создание имитационной компьютерной модели на принципах [4] для отработки предложенных решений и исследования режимов, возможных в многофункциональном устройстве.

В предлагаемом решении функции двух схем с рекуператором и кондиционером сети объединяются. Силовая схема этого варианта приведена на рис.1.

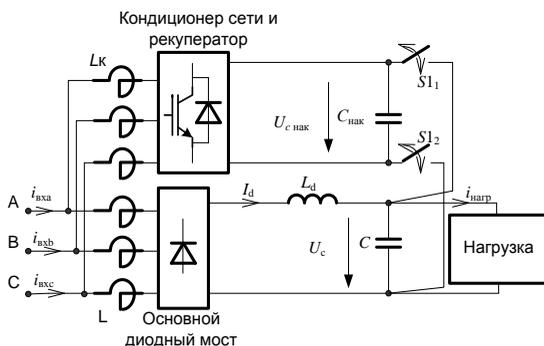


Рис. 1. Силовая схема комбинированного варианта преобразователя

Схема рис.1 содержит два дополнительных силовых ключа  $S_{11}$  и  $S_{12}$ , дополнительный накопительный конденсатор  $C_{\text{нак}}$ . Остальное усложнение касается лишь системы управления мостом, который в зависимости от происходящих в схеме энергетических режимов подключает либо систему управления по алгоритму рекуператора, либо систему управления по алгоритму кондиционера сети.

На основании изложенных в [4] соображений по построению системы управления комбинированным вариантом активного выпрямителя, автором разработана имитационная модель в среде MatLab, показанная на рис.2.

Схема рис.2 содержит модель силовой цепи, аналогичную рис.1, системы управления активным выпрямителем в режиме рекуператора (совмещающего в себе также функцию компенсатора реактивной мощности) и в режиме кондиционера сети. В режиме рекуператора система автоматического регулирования содержит внешний контур стабилизации напряжения звена постоянного тока с пропорциональным регулятором (его выход задает активную составляющую тока), векторный блок прямого преобразования координат с заданием реактивной составляющей тока на нулевом уровне и внутренний быстродействующий релейный регулятор тока. При возникновении режима торможения напряжение в звене постоянного тока превышает уставку, и на внутренний подчиненный контур подается задание активной составляющей тока со знаком «минус». При работе схемы в режиме «кондиционера сети» фильтрами высокого порядка (в разработанной модели – четвёртого) выделяется первая гармоника тока сети и быстродействующий релейный регулятор тока «стремит» поддержать реальный ток преобразователя близким по форме к первой гармонике.

Один из проведенных опытов на модели рис.2 показан на рис.3.

Проведенный компьютерный эксперимент содержал подключение различной нагрузки к выходу активного выпрямителя, работающего на первых двух этапах в выпрямительном режиме при разной нагрузке, на третьем этапе – в инверторном режиме при рекуперации.

До момента 0,1 с подключена активно-индуктивная нагрузка определенной величины, с момента 0,2 с – в два раза большая (зашунтирована часть омического сопротивления в звене постоянного тока). С момента 0,25 с активный выпрямитель нагружен на противо-ЭДС.

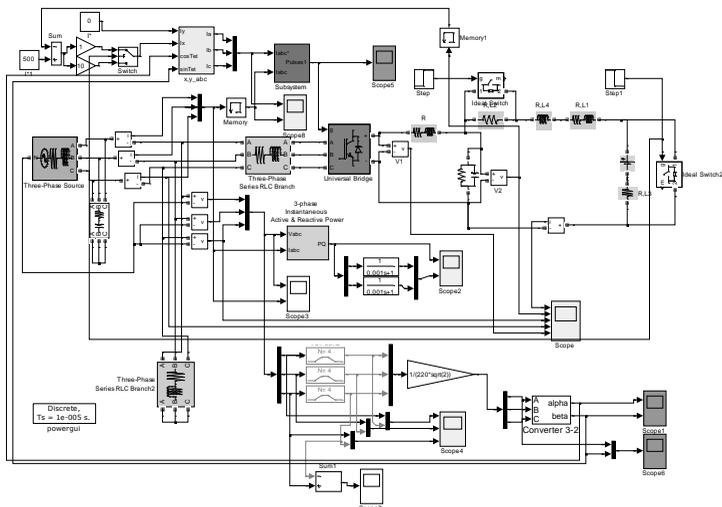


Рис. 2. Модель комбинированного варианта преобразователя в среде MatLab

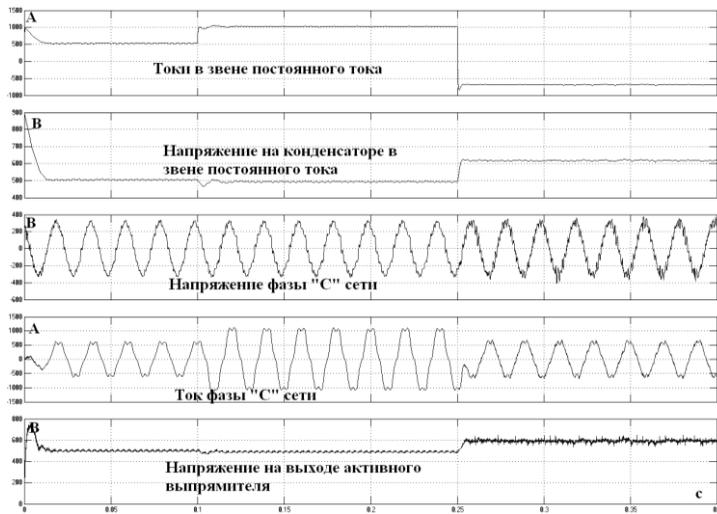


Рис. 3. Осциллограммы компьютерного моделирования различных режимов работы активного выпрямителя

Видно, что до момента 0.25 с на приведенной осциллограмме ток и напряжение одной из фаз сети синфазны, а начиная с момента 0.25 с – в противофазе. Энергия торможения с этого момента, таким образом, направляется в сеть, то есть идет рекуперация. Кроме того, по сравнению с исходной схемой с обычным диодным выпрямителем, фазный ток гораздо ближе к синусоидальной форме.

Анализ работы предлагаемой многофункциональной схемы на разработанной модели показал, что предложенная схема с активным фильтром работоспособна. Схема выполняет поочередно функции кондиционера сети в двигательном режиме и компенсатора реактивной мощности в режиме рекуперативного торможения, что дает возможность реализации четырехквadrантного электропривода с рекуперацией энергии в питающую сеть, и не загружающего эту сеть дополнительными нелинейными искажениями в двигательном режиме.

#### **Библиографический список**

1. **Соколовский Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
2. **Розанов Ю.К.** Силовая электроника: учебник для вузов/ Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский, А.А. Кваснюк. - М: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
3. **Волков А.В., Волков В.А.** Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением. Электротехника, №3, 2008, с. 2-10.
4. **Крутиков К.К., Рожков В.В.** Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода. Электричество, №2, 2011. С.32-38.

*Ю.Н. Митрофаненков, асп.; Д.С.Исаев, студ.;*  
*рук. А.Е. Малиновский д.т.н, проф.*  
*(филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

## **МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕЗДАТЧИКОВЫМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

В последнее время в нашей стране и зарубежном интенсивно разрабатывается вентильно-индукторный электропривод (ВИП), очень простой, надежный и дешевый, весьма перспективный для широкого круга применений. Одна из особенностей ВИП в традиционной комплектации – наличии датчика положения ротора, усложняющего конструкцию и снижающего надежность электропривода.

В публикациях [1], [2], [3] и [4] подробно рассмотрен метод бездатчикового определения углового положения ротора результаты исследования данного метода, силовой вентильный коммутатор. Целью данной работы является разработка системы управления способной обеспечить работу вентильно-индукторной машины (ВИМ) в режиме двигателя и датчика углового положения одновременно по рассмотренному в данных публикациях методу.

Для использования ВИМ в качестве датчика углового положения необходимо создавать в двух катушках, расположенных в разных фазах, квадратурные измерительные токи частотой 10 кГц. Так как магнитные проводимости под полюсами фаз двигателя различны и соотношения магнитных проводимостей зависит от углового положения ротора двигателя, то потоки, вызванные измерительными токами, суммируются в магнитной системе с разными амплитудами. В результате получаем измерительный магнитный поток, фаза которого зависит от углового положения ротора двигателя, следовательно, имея информацию о фазе измерительного потока можно вычислить текущее угловое положение ротора. Анализировать фазу потока можно по фазе ЭДС наводимой измерительным потоком в отключенных обмотках машины[1]. Так как ВИМ должна работать в режиме двигателя и датчика углового положения одновременно, то для определения углового положения необходимо использовать только не задействованные в данный момент времени (не участвующие в формировании электромагнитного момента) катушки ВИМ. Более подробно данный метод рассмотрен в [1].

Рассмотрим более подробно систему управления реализующую работу данного привода.

Функциональная схема бездатчикового ВИП приведена на рисунке 1. Функциональная схема состоит из вентильно-индукторной машины ВИМ, коммутатора, двух квадратурных источников тока, фильтра, компаратора, и двух микроконтроллеров. Обозначим назначение элементов функциональной схемы.

Коммутатор производит подключение катушек ВИМ к источнику питания или к одному из источников тока, или датчику напряжения, состоящего из полосового фильтра и компаратора. Источники тока формируют квадратурные измерительные токи, получая от микроконтроллера 2 синхронизирующие сигналы. Фильтр представляет собой полосовой активный фильтр, который выделяет из ЭДС, измеренной на одной из отключенных катушек ВИМ, гармонику частотой 10 кГц, компаратор преобразует выделенную гармонику в последовательность импульсов. Микроконтроллер 1, является контроллером управления привода, он, измеряя фазовый сдвиг между синхронизирующим сигналом от микроконтроллера 2 и импульсом от компаратора, рассчитывает текущее угловое положение ротора ВИМ, и, формируя сигналы управления ключами коммутатора, производит управления ВИП. Микроконтроллер 2 генерирует сигналы синхронизации для двух источников тока и задает точку отчета фазы измерительной ЭДС микроконтроллеру 1.

В качестве микроконтроллера 1 используется микроконтроллер фирмы *microchip* PIC18F4321. В качестве микроконтроллера 2 используется контроллер PIC12F629.

Рассмотрим более подробно структуру микроконтроллера 1 - контроллера управления бездатчиковым ВИП. Структурная схема контроллера приведена на рис. 2.

В микроконтроллере часть функций возложена на аппаратные средства контроллера, часть функций реализована программно. Обозначим назначение аппаратных средств микроконтроллера. Модуль АЦП, подключенный к датчикам тока, расположенным внутри коммутатора и фиксирующим силовые токи в фазах ВИМ, служит для ввода информации в контроллер информации текущих силовых токов в фазах ВИМ. Модули CCP1 и CCP2 работающие в режиме захвата служат для измерения фазы измерительной ЭДС, которая используется для определения углового положения ротора ВИМ. Последовательные интерфейс I2C используется для связи с дополнительными периферийными устройствами, такими как дисплей и тд. Интерфейс USART используется для обмена информацией с ПК по RS232 интерфейсу.



Рис. 1. Функциональная схема бездатчикового ВПД

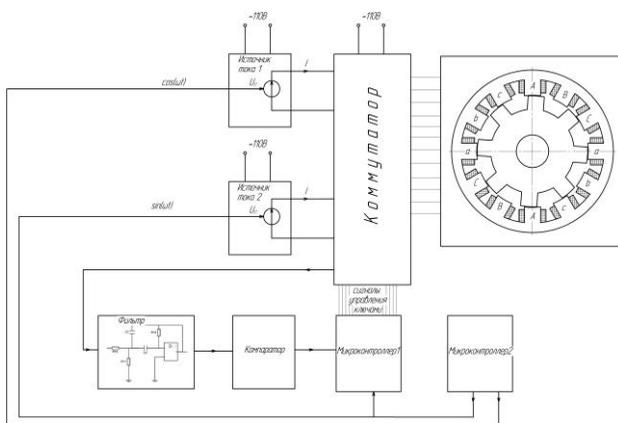


Рис. 2. Структурная схема контроллера управления бездатчиковым ВПД

Работает программно - аппаратная часть микроконтроллера по следующему алгоритму. Системный таймер ведет отчет интервала дискретизации. По прерыванию от системного таймера, на высоком приоритете происходит расчет скорости, путем дифференцирования текущего углового положения, происходит расчет выходных сигналов регуляторов скорости и тока, формирование сигналов управления ключами коммутатора и запуск модуля АЦП на измерения тока, результаты измерения тока используются в следующем цикле дискретизации (в следующем прерывании от системного таймера). По прерыванию от АЦП происходит сохранение результатов измерения токов. По прерыванию от модуля ССР1 происходит сохранение результата захвата значения таймера отчета фазы. По прерыванию от модуля ССР2 происходит сохранения результата захвата значения таймера отчета фазы, расчет разности сохраненных значений результатов захвата произошедших при текущем прерывании и при прерывании от модуля ССР1. Рассчитанная разность пропорциональна фазе измерительной ЭДС. По таблице преобразования фаза-угол, расположенной в табличной части программного обеспечения, происходит расчет текущего углового положения ротора ВИМ. По прерывание от последовательных интерфейсов происходит сохранение в программных буфер приемника принятых данных и загрузка из программного буфера передатчика данных для последующей передачи. В фоновой задаче происходит работа с пользовательским интерфейсом и обработка запросов от ПК.

Рассмотренная микропроцессорная система управления позволяет реализовать бездатчиковое управление ВИП с использованием структур с различными типами обратных связей (по скорости, току, положению), а так же, при необходимости, за счет обновления ПО, быстро модернизировать структуру ВИП, корректировать обратные связи, изменять настройки регуляторов.

Результаты исследования, проведенные при математическом моделировании в среде matlab, и исследования на лабораторном стенде подтвердили работоспособность разработанного метода определения углового положения ротора ВИП и разработанной микропроцессорной системы управления. Разработанный метод бездатчикового определения углового положения дополняет существующие и может использоваться в электроприводах.

#### **Библиографический список**

1. **Малиновский А.Е.**, Митрофаненков Ю.Н. Бездатчиковый вентильно индукторный электропривод// сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф.: «Энергетика, информати-

ка, инновации -2011» Т.1. Смоленск: РИО филиала ГОУВПО МЭИ(ТУ) в г. Смоленске-2012.

2. **Митрофаненков Ю.Н.** Бездатчиковый вентильно индукторный электропривод//сб. материалов областного конкурса студенческих научных работ 2011 года. – Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2011.

3. **Митрофаненков Ю.Н.** Исследование информационной системы бездатчикового вентильно-индукторного электропривода//Сб. трудов 9-ой Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика» Т2. Смоленск – 2012

4. **Митрофаненков Ю.Н.,** Малиновский А.Е. Коммутатор для бездатчикового вентильно-индукторного электропривода// сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф.: «Энергетика, информатика, инновации -2012» Т.1. Смоленск: филиал МЭИ в г. Смоленске.-2012

5. **Овчинников И.Е.** Вентильные электрические машины и привод на их основе (малая и средняя мощность)/И.Е.Овчинников: Курс лекций – СПб.:КОРОНА-Век,2007

*М.П. Страшинский, студ.;  
рук. В.А. Барышников, к.т.н., доц.  
(СФМЭИ, г. Смоленск)*

## **МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПО СИСТЕМЕ РАБОЧЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВАЛА**

Можно выделить три основные схемы электрического вала: 1) с уравнительными машинами, или уравнительный электрический вал; 2) с асинхронным преобразователем частоты и машинами двойного питания – дистанционный электрический вал; 3) с общим реостатом – рабочий электрический вал (РЭВ).

Из систем электрического вала наименьшее количество машин требуется в схеме РЭВ.

Принципиальная схема РЭВ с общим реостатом изображена на рис.1. РЭВ состоит из двух ( $M1$  и  $M2$ ) или нескольких одинаковых асинхронных машин с фазным ротором, статорные цепи которых подключены параллельно к сети, а роторные обмотки соединены встречно друг другу и замкнуты на общий реостат  $R_p$ , регулируемый, как правило, ступенчато. Этот способ построения электрического вала относительно дешев, поскольку главные приводные двигатели выполняют одновременно функции как рабочих, так и уравнительных машин [1,2].

К недостаткам РЭВ можно отнести небольшой диапазон регулирования скорости, составляющий  $(2\div 3):1$ , ступенчатость регулирования,

невозможность получения устойчивой пониженной скорости при изменении нагрузки в широких пределах и невысокие динамические

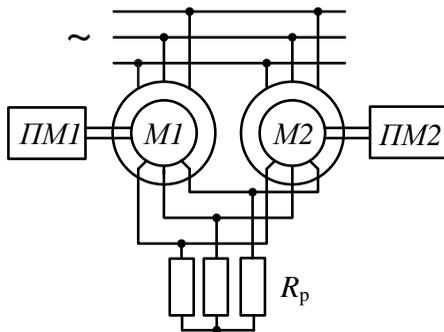


Рис.1. Принципиальная схема РЭВ с общим реостатом

свойства электропривода. Для устранения этих недостатков РЭВ можно модернизировать, используя вместо общего реостата два других схемных варианта [3]:

- 1) управляемый трехфазный мостовой выпрямитель с активной нагрузкой;
- 2) импульсный регулятор, коммутирующий активно-емкостную  $RC$ -цепь на выходе неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя.

В первом варианте (фазовое регулирование) достигается эффект плавного изменения индуктивного сопротивления при переменном угле управления, а во втором варианте (импульсное регулирование) – активного сопротивления при переменной скважности коммутации импульсного регулятора.

Схемы силовой части для этих вариантов РЭВ представлены на рис.2 применительно к двухдвигательному электроприводу. Они содержат асинхронные двигатели с фазным ротором  $M1$  и  $M2$ , статорные обмотки которых подключены параллельно к сети, а роторные цепи объединены встречно. При фазовом регулировании (рис.2,а) в общую роторную цепь двигателей подсоединен управляемый трехфазный мостовой выпрямитель  $UZ$ , нагруженный на активную  $R_d$ -цепь. В случае импульсного регулирования (рис. 2,б) выпрямитель  $UZ$  неуправляемый, нагрузкой его служит  $R_d R_{dl} C_d$ -цепь, причем активно-емкостная

$R_d I C_d$ -цепь коммутируется регулятором (коммутатором)  $UR$ . Работа управляемого выпрямителя или коммутатора приводит к изменению эквивалентного индуктивного или активного сопротивления в объединенной роторной цепи, что позволяет получить семейства искусственных статических характеристик.

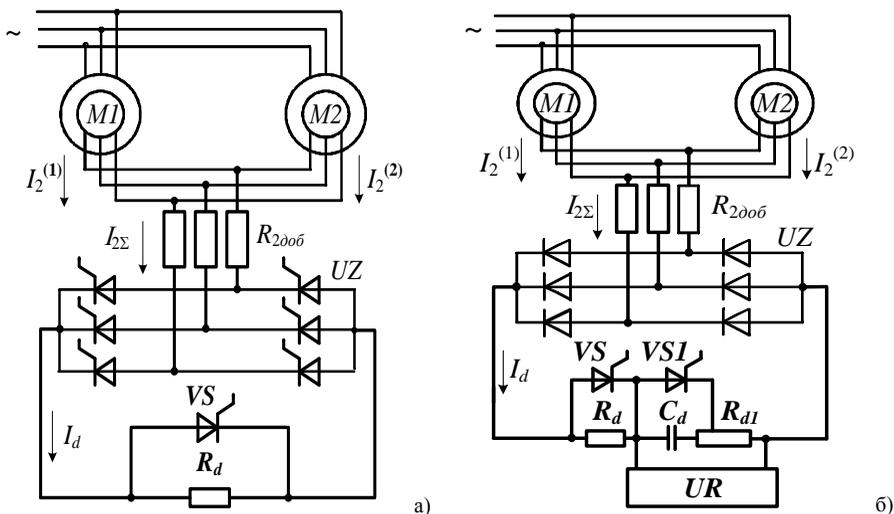


Рис.2. Схемы силовой части для двух вариантов системы РЭВ: *а* – при фазовом регулировании; *б* – при импульсном регулировании

В объединенную роторную цепь переменного тока должны быть включены добавочные резисторы  $R_{2доб}$ , обеспечивающие уравнильный момент системы при закороченном выпрямителе. В противном случае, когда мост закорочен, машины будут работать независимо друг от друга на основных характеристиках со скоростями, которые соответствуют разным моментам нагрузки, т.е. синхронность нарушится. В замкнутой системе при недостаточных значениях  $R_{2доб}$  синхронизация на высокой скорости вращения машин, когда нагрузка на валах неравномерна, может быть получена путем соответствующего снижения сигнала задания скорости.

Замкнутая система РЭВ позволяет сформировать жесткие характеристики пониженной скорости в диапазоне 20:1 и выше, обеспечить плавный пуск двигателей с заданным ускорением, существенно улучшить управляемость привода. Для замыкания электропривода, напри-

мер, обратной связью по скорости можно использовать датчик скорости только одного двигателя, что упрощает систему управления.

Переходные и установившиеся процессы при фазовом и импульсном регулировании близки друг другу и свидетельствуют о том, что их применение в РЭВ способствует устранению указанных выше недостатков, которые присущи схеме с общим реостатом.

Наибольшая суммарная мощность машин в схеме дистанционного электрического вала, приблизительно равная утроенной суммарной мощности всех машин МДП.

Наименьший КПД имеет схемы с РЭВ. Наименьшей динамической устойчивостью обладает схема с преобразователем частоты и машинами двойного питания, так как в ней имеется лишь незначительный демпферный эффект, обусловленный вихревыми токами.

По сравнению с системой электрического вала с уравнительными машинами синхронизирующий момент РЭВ меньше при одном и том же скольжении, т.е. РЭВ допускает синхронизацию при меньшем неравенстве нагрузок на валах двигателей.

#### **Библиографический список**

1. **Чиликин М.Г. и др.** Основы автоматизированного электропривода/ –М.: Энергия, 1974.
2. **Чиликин М.Г.,** Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода/ М.: Энергия, 1979.
3. **Данилов П.Е.,** Барышников В.А., Шабентов В.О. Динамические режимы асинхронных электроприводов с импульсным регулятором в цепи выпрямленного тока ротора. М.: Изд-во МЭИ, 1990.

## **Секция 21. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТАНОВКИ**

Председатель – д.т.н., профессор **Кзаков Ю.Б.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Караулов В.Н.**

*А.В. Гук, студ.; рук. Д.И. Баловнев, к.т.н., доцент  
(НИУ МЭИ, г. Смоленск)*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА АЭС**

На атомных электростанциях в большом количестве применяются асинхронные электродвигатели мощностью 0,25-150кВт. Они находят свое применение для вентиляторов, насосов, приводов заглушек, транспортных систем, приводов перегрузочных машин реакторов, подъемного оборудования. Для их надежной работы существует система плано-предупредительных ремонтов, а также набор диагностических мероприятий. При этом диагностика неисправностей, занимает относительно большую часть времени ремонта и требует немало человеческих ресурсов. Поэтому актуальной является задача разработки эффективных методов диагностики неисправностей электродвигателей.

В настоящее время одними из самых используемых видов диагностики является вибродиагностика [1]. Этот метод предоставляет наиболее полную информацию о техническом состоянии объекта и основывается на анализе временных и спектральных характеристиках. Главным недостатком этого метода является необходимость контактирования датчика с машиной, а также жесткие требования к его расположению. Второй наиболее важный метод это диагностика на основе измерения фазных токов и напряжений. При этом, в отличие от вибродиагностики, не требуется устанавливать датчики на какой-либо определенный элемент электрической машины, это происходит благодаря применению токовых клещей, что также позволяет не разрывать цепь и не отключать машину. Также информацию о техническом состоянии объекта диагностирования можно получить на основе информации о поле рассеяния, существующего вблизи электрической машины. Применение этого метода в качестве дополнительного источника информации позволит повысить достоверность оценок состояния диагности-

руемого устройства. Но, как показывает анализ литературы, влияние дефектов на характеристики поля рассеяния мало изучено, а данный диагностический параметр практически не используется для оценки технического состояния электрических машин [1]. Все это делает актуальной разработку методов диагностики, которые бы позволяли измерять вышеперечисленные параметры, а также проводить обработку полученных данных в цифровом виде при помощи ЭВМ. При многократном сборе данных с одного и того же двигателя можно будет формировать базу данных, которая поможет отслеживать динамику развития повреждений и даст возможность заблаговременно планировать выведение оборудования на ремонт или делать выводы о том, что оборудованию не требуются ремонтные мероприятия, что в свою очередь позволит сэкономить средства и время [2]. Рост производительности компьютерной техники позволяет нам подумать о разработке методов диагностики основанных на сложных математических вычислениях. Немаловажной задачей является поиск не только средств обработки сигналов, но и также оборудования, которое бы позволяло в максимально короткие сроки получать определенную информацию с двигателя.

Произведена классификация факторов, которые влияют на асинхронные двигатели в процессе эксплуатации. А также произведен анализ основных видов неисправностей, которые можно разделить на внешние и внутренние, причины их возникновения, а также признаки, по которым неисправность можно выявить с помощью датчиков индуктивного типа. Рассмотрены известные способы обнаружения и устранения неисправностей асинхронных электродвигателей, применяемых на АЭС. Разработаны алгоритмы поиска неисправностей в зависимости от различных признаков. Разрабатываются методики диагностических мероприятий на месте эксплуатации электродвигателей, которые бы позволили сократить сроки диагностических мероприятий, что напрямую бы повлияло на уменьшение сроков ремонта и, следовательно, на его стоимость.

#### **Библиографический список**

1. **Знаков В.Е.,** Цырлин А.И., Яковлев А.В. Вибродиагностика скрытых дефектов работающих генераторов // Энергетик. 2001, - №8, - с. 32-35.
2. Сивокобыленко В.Ф., Нури Абделбассет. Диагностика состояния короткозамкнутых роторов асинхронных машин. // Электричество. 1997, №3. –с. 25-26.

*Н.К. Швецов, магистрант; рук. Ю.Б. Казаков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ**

В настоящее время питание асинхронных двигателей (АД) зачастую производится от преобразователей частоты с формированием питающего напряжения по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Сигнал на выходе преобразователя частоты помимо основной гармоники содержит спектр высших гармоник, которые являются причиной появления дополнительных потерь в меди и стали двигателя, что ведет к повышенному энергопотреблению. С учетом того что АД являются основными потребителями электрической энергии, расчет дополнительных потерь при питании двигателя от преобразователя частоты с ШИМ напряжения является актуальной задачей.

Существуют следующие основные формы импульсного напряжения: с постоянной шириной импульсов, с синусоидально изменяющейся шириной импульсов, с синусоидально изменяющейся высотой импульсов, с импульсно ступенчатой высотой импульсов. Основными параметрами ШИМ являются скважность  $\gamma$  и число импульсов на полупериоде основной частоты  $N$ .

Предлагаемая методика расчета дополнительных потерь от высших гармоник основана на разложении формы импульсного напряжения в ряд Фурье с последующим расчетом схемы замещения двигателя для каждой гармоники [1]. Магнитные поля, создаваемые высшими гармониками, вращаются относительно ротора с большой скоростью, следовательно двигатель для таких гармоник находится в режиме короткого замыкания. Это позволяет пренебречь намагничивающим контуром в  $T$  – образной схеме замещения двигателя. В качестве упрощения можно принять, что в двигателях средней и большой мощности, вследствие выраженного действия эффекта вытеснения тока в пазах, активные и индуктивные сопротивления обмоток для каждой гармоники прямо пропорциональны номеру гармоники. Можно считать, что электромагнитные моменты от высших гармонических уравновешивают друг друга, и вся потребляемая ими активная мощность выделяется в виде потерь.

Энергоэффективность работы двигателя от преобразователя частоты можно оценить, введя понятие коэффициента увеличения потерь – отношения потерь при питании импульсным напряжением к потерям при питании синусоидальным напряжением [1].

Коэффициент увеличения электрических потерь:

$$K_{эл} = (P_{эл.ном} + \sum_{\nu=5}^{\infty} P_{эл.\nu}) / P_{эл.ном} = 1 + K_n^2 \sum_{\nu=5}^{\infty} \left[ \frac{1}{\nu} \left( \frac{U_{\nu}}{U_1} \right)^2 \right],$$

где  $P_{эл.ном}$ ,  $P_{эл.n}$  – электрические потери от действия первой и n-той гармоник соответственно,  $K_n$  – кратность пускового тока,  $U_n$ ,  $U_1$  – амплитуды n-той и первой гармоник соответственно. Коэффициент увеличения потерь в стали:

$$K_{ст} = (P_{ст.ном} + \sum_{\nu=5}^{\infty} P_{ст.\nu}) / P_{ст.ном} = 1 + K_{высш.гарм.ст} \sum_{\nu=5}^{\infty} \left[ \frac{1}{\nu^{0.7}} \left( \frac{U_{\nu}}{U_1} \right)^2 \right],$$

где  $P_{ст.ном}$ ,  $P_{ст.n}$  – потери в стали от действия первой и n-той гармоник соответственно,  $K_{высш.гарм.ст}=2\pi 3$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали при перемагничивании по частичным циклам. Коэффициент суммарного увеличения потерь АД от действия высших гармоник напряжения и тока:

$$K_{сумм} = \frac{P_{эл.ном}}{P_{сумм.ном}} \cdot K_{эл} + \frac{P_{ст.ном}}{P_{сумм.ном}} \cdot K_{ст},$$

где  $P_{сумм.ном}$  – сумма электрических потерь и потерь в стали от действия первой гармоники.

В качестве объекта исследования был взят тяговый асинхронный двигатель со следующими номинальными данными:  $P_{ном}=170$  кВт,  $U_{ном}=530$  В,  $f=43$  Гц,  $z_{ном}=0,92$ ,  $K_n=7$ ,  $P_{эл.ном}=10704,64$  Вт,  $P_{ст.ном}=2027,74$  Вт,  $P_{мех}=1435,66$  Вт. Параметры ШИМ  $N=36$   $g=0,542$ .

Для получения более точных значений коэффициента увеличения электрических потерь необходимо располагать более точными зависимостями активных и индуктивных сопротивлений обмоток от частоты. Для этого целесообразно использовать современные пакеты программ, позволяющих реализовать численный расчет электромагнитного поля в пазовой зоне машины. На рис. 1 приведены зависимости активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора от частоты, полученные в результате численного расчета поля пазового рассеяния стержня ротора. Активное сопротивление обмотки нелинейно увеличивается под

действием эффекта вытеснения тока. Индуктивность рассеяния несколько падает, что обуславливает нелинейную зависимость индуктивного сопротивления от частоты.

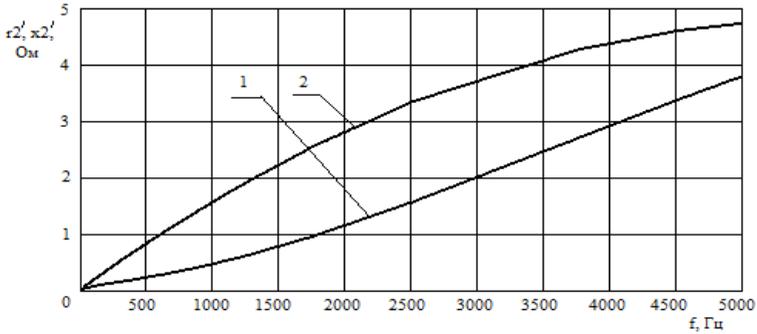


Рис. 1. Зависимости активного (1) и индуктивного (2) сопротивлений приведенной обмотки ротора от частоты

Коэффициент увеличения электрических потерь в случае использования уточненных зависимостей параметров двигателя от частоты можно определить из следующего соотношения:

$$K_{эл} = \frac{P_{эл.ном} + \sum_{v=5}^{\infty} \frac{3 \cdot U_v^2 \cdot (r_{1v} + r'_{2v})}{2 \cdot ((r_{1v} + r'_{2v})^2 + (x_{1v} + x'_{2v})^2)}}{P_{эл.ном}}$$

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты увеличения потерь в АД при параметрах ШИМ N=36, r=0.542

	U <sub>m</sub> , В	U <sub>1m</sub> , В	з, о.е. (з <sub>уточн</sub> , о.е.)	K <sub>эл</sub> (K <sub>эл.уточн</sub> )	K <sub>ст</sub>	K <sub>сумм</sub> (K <sub>сумм.уточн</sub> )
Синусоидальное напряжение	432,7	432,7	0,92	1	1	1
Постоянная ширина импульсов	626,0	432,4	0,835 (0,834)	2,709 (2,746)	1,22	2,471 (2,502)
Синусоидальная ширина импульсов	509,0	432,8	0,90 (0,898)	1,375 (1,421)	1,06	1,325 (1,364)
Синусоидальная высота импульсов	801,0	432,9	0,896 (0,894)	1,448 (1,499)	1,07	1,388 (1,430)
Импульсно-ступенчатая высота импульсов	325,5	432,5	0,879 (0,880)	1,790 (1,771)	1,08	1,677 (1,661)

Как видно из таблицы, увеличение суммарных потерь в двигателе может составлять от 36,4 до 150,2 % в зависимости от формы питающего напряжения. Расхождение значений коэффициентов суммарного увеличения потерь, полученных с использованием упрощенных и уточненных зависимостей параметров двигателя от частоты, не превышает 3,4%, что позволяет сделать вывод о корректности использования упрощенных зависимостей параметров двигателя от частоты при расчете дополнительных потерь.

Причиной различия коэффициентов увеличения потерь при различных способах модуляции является разный гармонический состав питающего напряжения (рис. 2).

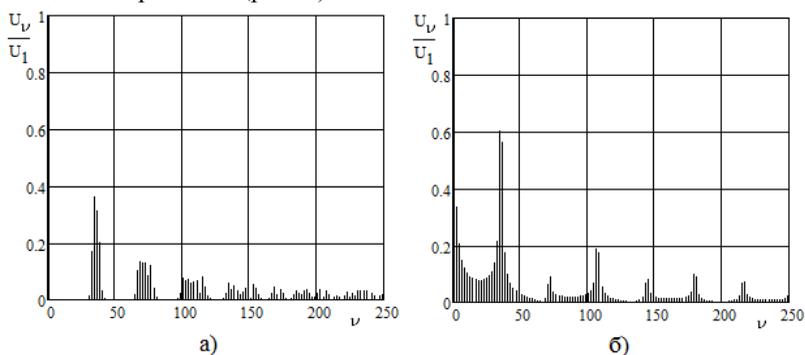


Рис. 2 – Спектр гармоник напряжения на выходе ПЧ с ШИМ. а – с синусоидальной шириной импульсов; б – с постоянной шириной импульсов

Наиболее благоприятной с точки зрения энергоэффективности является ШИМ с синусоидально изменяющейся шириной импульсов, наименее благоприятной – ШИМ с постоянной шириной импульсов. Полученные значения коэффициентов увеличения потерь могут быть использованы для прогнозирования увеличения потерь в данном двигателе при его питании от преобразователя частоты с ШИМ напряжения при заданных параметрах  $N$  и  $g$ .

#### Библиографический список

1. Казаков Ю.Б., Швецов Н.К. Влияние способов и параметров широтно-импульсного модулирования напряжения на дополнительные потери в асинхронном двигателе// Труды VII Междунар. науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу «АЭП-2012»/ Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – С. 117-120.

*И. А. Балагуров, студ.;  
рук. Ю.Б. Казаков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ТОРЦЕВОЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПОЛЫМ РОТОРОМ

В современном производстве все чаще возникает необходимость в электромеханических преобразователях, сконструированных под конкретные задачи. Машины общей серии и конструктивного исполнения уже не в состоянии успешно справиться с возникающими проблемами. Это, в частности, относится к низкооборотному электроприводу. Наличие механической передачи – редуктора, между исполнительным механизмом и электромеханическим преобразователем существенно влияет на энергетические и габаритные показатели привода в целом.

Целью данной работы является проектирование специального электромеханического преобразователя для смесителя сыпучих материалов<sup>[1]</sup>.

В исходном варианте рис. 1, смеситель сыпучих материалов представляют собой патрубки для загрузки и выгрузки смеси, корпус, внутри которого вращаются лопасти, расположенные на длинном валу. Вал приводится во вращение электродвигателем через редуктор. Скорость вращения постоянная.

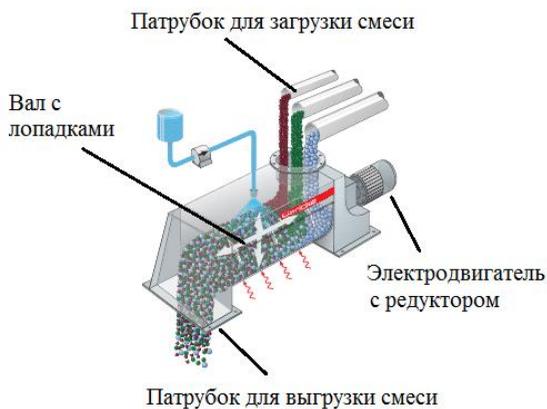


Рис. 1. Смеситель сыпучих материалов

К достоинствам этой конструкции стоит отнести простоту исполнения и надежность.

Однако недостатком такого типа смесителя является:

- отсутствие вала в зоне смешивания (уменьшение полезного объема);
- относительно низкая равномерность перемешивания вследствие отсутствия обратной связи;
- нерациональное распределение мощности на единицу длины;
- наличие механической передачи – редуктора;
- практически полное отсутствие регулирования скорости перемешивания.

Желание устранить недостатки традиционного смесителя привели к разработке лопастного смесителя с независимым приводом<sup>[2]</sup>. Основной частью этой конструкции (рис. 2) является лопаточный узел, содержащий ось, жестко связанную с корпусом, на которой установлены с возможностью свободного вращения лопаточные колеса, разделенные фиксаторами, каждое из которых выполнено в виде втулки с лопатками, снабженными на кромках ферромагнитными наконечниками; вокруг каждого лопаточного колеса на внешней поверхности корпуса установлен индуктор, выполненный в виде статора с обмоткой возбуждения, подключенной через преобразователь частоты к источнику трехфазного тока с возможностью переключения фаз.

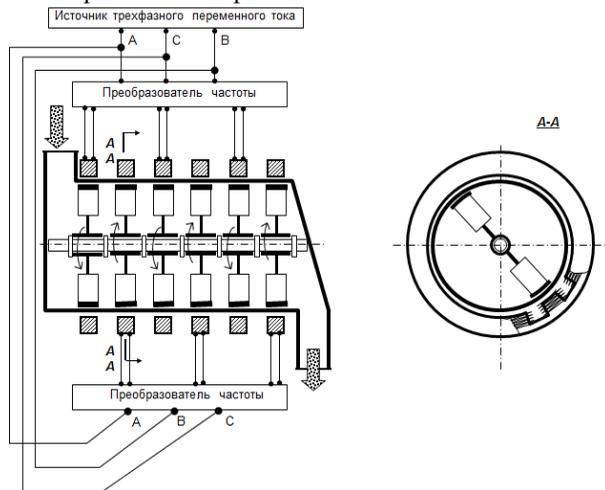


Рис. 2. Лопастный смеситель с независимым приводом

Дальнейшим совершенствованием вышеописанной конструкции является торцевой вентильный электромеханический преобразователь с полым ротором.

Вентильные торцевые машины имеют ряд преимуществ<sup>[3,4]</sup>, перед машинами традиционного исполнения:

- отсутствие коллекторно-щеточного узла;
- простота реализации различных видов механических характеристик, требуемых исполнительными механизмами;
- высокие энергетические показатели (КПД и  $\cos\phi$ );
- компактность;
- возможность реализации низкооборотных высокомоментных машин без применения механической передачи.

Торцевой вентильный электромеханический преобразователь с полым ротором представляет собой (рис. 3) электрическую машину с аксиальным магнитным потоком, ротор которой представляет собой кольцо из постоянных магнитов аксиальной намагниченности, во внутренней части которого расположены лопатки, а внешняя часть связана с корпусом через подшипники скольжения. С торцевых сторон ротор соединен с корпусом при помощи уплотнений. Вокруг ротора, с торцевых сторон установлены статоры, содержащие магнитопровод, тороидальные обмотки, и датчик положения ротора. Датчик положения ротора соединен с электронной системой ключей, управляющих коммутацией катушек статора.

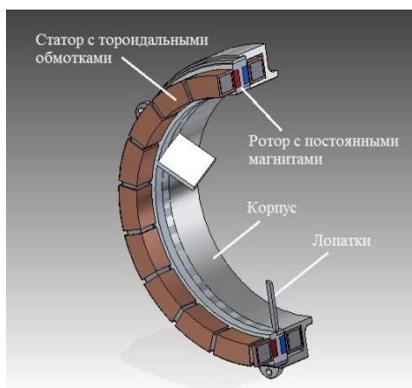


Рис. 3. Торцевой вентильный электромеханический преобразователь с полым ротором

Каскад из таких торцевых машин, вместе с патрубками для загрузки и выгрузки компонентов смеси, образуют смеситель сыпучих материалов с независимым приводом.

**Библиографический список.**

1. Сайт <http://www.gericke.net>
2. Мизонов В.Е., Казаков Ю.Б., Шелатонова К.А., Балагуров И.А. Патент RU №119642 от 07.03.2012 МПК В01F 13/08
3. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / : Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с. : ил.
4. Ганджа, С.А. Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным потоком. Вестник ЮУрГУ, № 32, 2010.

*А.В. Мартынов, асп.;*  
*рук. А.И. Тиханов, д.т.н., проф.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

**СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ИНЖЕНЕРНЫХ  
РАСЧЕТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В  
ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИИ**

Основным критерием при производстве трансформаторов – это его цена и трудозатраты на его изготовление. Особое внимание уделяется инженерно-конструкторской подготовке документации для сборки серии или единичного трансформатора. В связи с этим весьма актуальной является проблема сокращения времени работы инженера над проектом посредством различного программного обеспечения. Время на проектирование – это время, которое инженер тратит на расчет, конструирование и полного описания изделия, его частей, материалов и пр. с помощью конструкторской документации, которая включает в себя чертежи, спецификации, эскизы, расчетные листы и т.д., а также последующего его сопровождения на всех стадиях производства.

Сокращение времени проектирования в настоящее время осуществляется посредством [1]

- автоматизации оформления документации;
- информационной поддержки и автоматизации процесса принятия решений;
- использования технологий параллельного проектирования;
- унификации проектных решений и процессов проектирования;

- повторного использования проектных решений, данных и наработок;
- стратегического проектирования;
- замены натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием;
- повышения качества управления проектированием;
- применения методов вариантного проектирования и оптимизации.

В последнее время основная работа при проектировании происходит с помощью различного рода программного обеспечения, которое способно обеспечить:

- расчет или составление сметы проекта;
- конструирование узлов проекта и составление конструкторской документации;
- оптимизация проекта;
- проверочные операции.

Для решения данных задач на сегодняшний день разработано множество продуктов, в частности, COMSOL, ANSYS, Solidworks, Pro/ENGINEER и другие. Рассмотрим несколько популярных, применяемых на различных предприятиях трансформаторостроения.

Ведущим мировым разработчиком программного обеспечения для моделирования физических полей является компания ANSYS [2] (рис. 1). Набор программных продуктов ANSYS для электромагнитного анализа нацелен на улучшение конструкции благодаря совмещению возможностей передовых решателей электромагнитных полей с средствами моделирования нагруженных цепей и систем. Эта мощная методология позволяет эффективно вести автоматическую разработку, оптимизацию электронных и электромеханических изделий без необходимости создания дорогостоящих физических прототипов.

Продукт Pro/ENGINEER разработан компанией PTC (Parametric Technology Corporation) и входит в состав CAD – систем PTC для проектирования различных изделий. Pro/ENGINEER позволяет компаниям оптимизировать их продукты через создание цифровых прототипов. Они включают в себя концепцию исходного продукта и стили в 2D и 3D дизайна, моделирование и анализ, а также инженерных расчетов [3]. Pro/ENGINEER включает в себя модель Mechanica для расчета механических усилий. Данный модель может пригодиться при возникновении спорных вопросов при создании проекта, такие как прочность, растяжение и выявление наиболее уязвимых мест проекта.

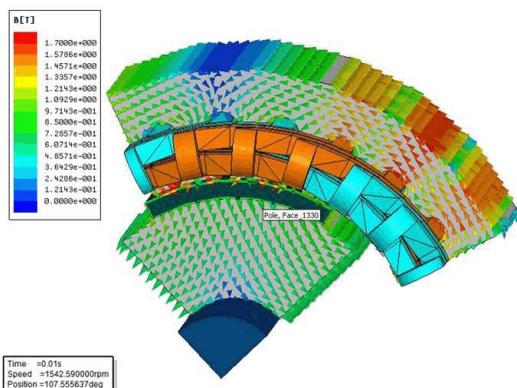


Рис. 1. Модель магнитного поля в среде ANSYS

AMPERES – это решение для расчета трехмерного поля дает возможность для серьезного проектирования в одном интегрированном пакете. AMPERES значительно расширяет дизайнерский потенциал и позволяет моделировать и оптимизировать электромагнитные компоненты и системы до их производства, обходя построение сложных по структуре прототипов. Это позволяет снизить себестоимость проектирования и сокращение времени. AMPERES обеспечивает анализ с помощью метода конечно-элементного моделирования и метода граничных элементов и включает в себя полностью параллельный процесс вычисления. Пакет AMPERES позволяет вычислять силы, моменты, потоки рассеяния и индукцию. Это позволяет находить решения при проектировании и анализе магнитных устройств с учетом нелинейности характеристик материала [4].

ELECTRO – это готовый инструмент для проектирования электро-механических преобразователей энергии. ELECTRO позволяет рассчитывать напряженность электрического поля, силы, моменты, параметры линии передач и емкость в двухмерной постановке задачи. С помощью математических моделей можно оптимизировать модель с использованием метода конечно-элементного моделирования [5].

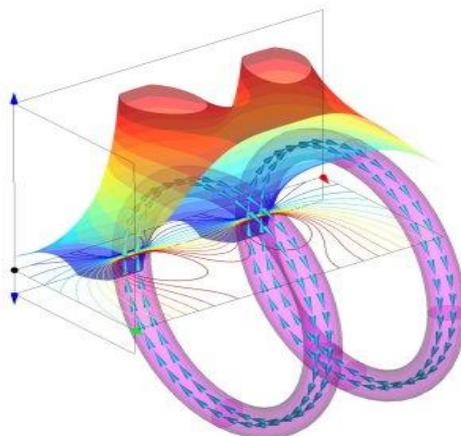


Рис. 2. Конечно-элементная модель в среде AMPERES

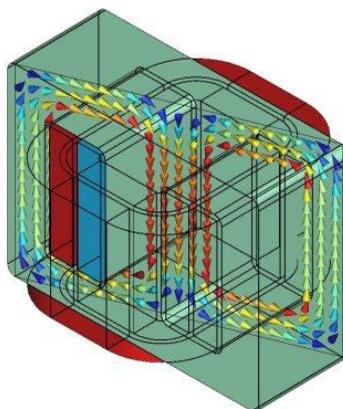


Рис. 3. Конечно-элементная модель в среде ELECTRO

### Библиографический список

1. [http://chinapads.ru/c/s/sistema\\_avtomatizirovannogo\\_proektirovaniya](http://chinapads.ru/c/s/sistema_avtomatizirovannogo_proektirovaniya)
2. <http://www.cae-expert.ru/discipline/elektromekhanika>
3. <http://www.ptc.com/solutions/engineering/#section-3>
4. <http://www.integratedsoft.com/Products/Amperes>
5. <http://www.integratedsoft.com/Products/Electro>

*А.В. Мартынов, студ.;  
рук. В.П. Шишкин, к.т.н. проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **БЕСКОНТАКТНЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР**

Все большую популярность в мире приобретают альтернативные источники энергии. Их преимущество заключается в возобновимости энергетических ресурсов и их экологичности.

Потребность использования возобновляемых источников энергии заставляет развивать ветроэнергетику.

Ветроэнергетика — отрасль [энергетики](#), специализирующаяся на преобразовании [кинетической энергии](#) воздушных масс в атмосфере в электрическую, механическую, тепловую или в любую другую форму энергии, удобную для использования в народном хозяйстве.



**Рис. 1. Ветроустановки**

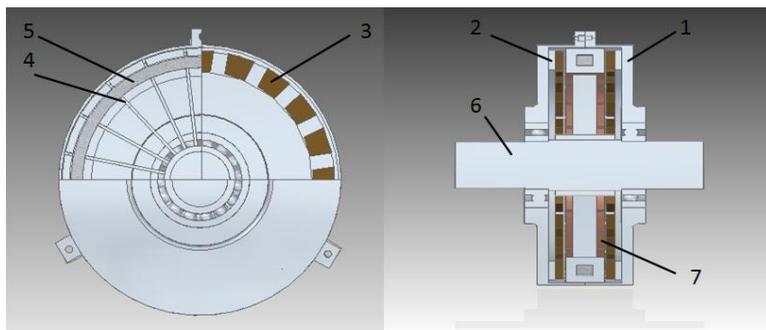
В ветровых электростанциях используют низкооборотные генераторы на постоянных магнитах. Отсутствие скользящих электрических контактов существенно повышает их ресурс и надежность по сравнению с электрическими генераторами постоянного тока или синхронными генераторами с обмоткой возбуждения на роторе. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов состава неодим-железобор позволило упростить конструкцию и значительно уменьшить размеры и вес генераторов. Кроме того генераторы на ПМ просты в изготовлении. В тоже время, использование постоянных магнитов значительно увеличивает стоимость этих генераторов и делает невозможным регулирование напряжения полем возбуждения.

В среде Excel был спроектирован бесконтактный магнитоэлектрический генератор  $P=5\text{кВт}$ , скорость вращения  $n=300$  об/мин, напряжением  $U=220\text{В}$  трёх типов:

- с гладким статором с кольцевой обмоткой
- с зубчатым статором с кольцевой обмоткой
- с зубчатым статором с катушечной обмоткой

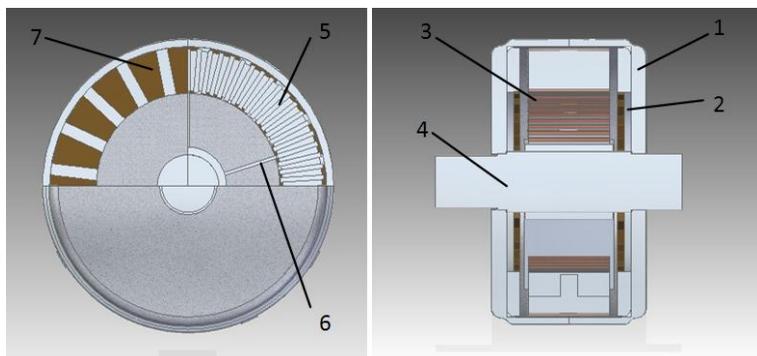
Проведены расчеты по определению главных размеров генераторов, обмоточных данных, расчет магнитной цепи. Построены характеристики холостого хода, короткого замыкания и внешние характеристики.

Генератор с гладким статором с кольцевой обмоткой имеет самую простую технологию изготовления. В нем отсутствуют пазы, обмотка наматывается прямо на магнитопровод (кольцевая обмотка). Его главным недостатком является большой немагнитный промежуток. Конструкция представлена на рис.2.



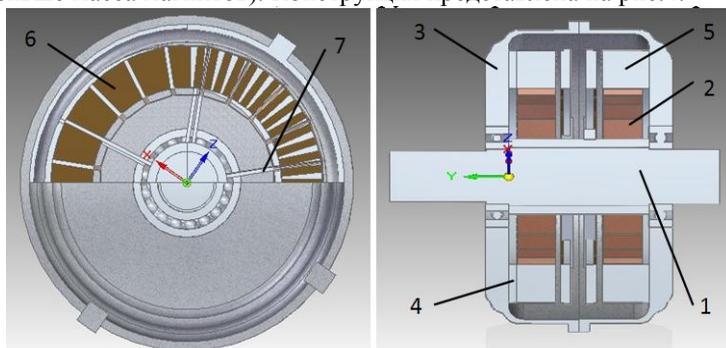
**Рис. 2. Конструкция генератора с гладким статором: 1-подшипниковый щит; 2-индуктор; 3-магнит; 4-спица; 5-магнитопровод; 6- вал;7-обмотка**

Генератор с зубчатым статором и кольцевой обмоткой имеет маленький воздушный зазор, так как обмотка укладывается в пазы. Склонность к залипанию создаёт дополнительные технологические трудности. Пазы на якоре располагаются с двух сторон, что усложняет процесс изготовления машины, наматывается кольцевая обмотка. Конструкция представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Конструкция генератора с зубчатым статором с кольцевой обмоткой:**  
1-подшипниковый щит; 2-индуктор; 3- обмотка; 4- вал; 5- магнитопровод; 6-спица; 7-магнит

У генератора с зубчатым статором с катушечной обмоткой так же есть склонность к залипанию. Процесс изготовления трудоемкий из-за фрезерования пазов. Технология изготовления катушечной обмотки является самой простой. Стоимость генератора уменьшается в разы (меньше масса магнитов). Конструкция представлена на рис.4.



**Рис. 4. Конструкция генератора с зубчатым статором с катушечной обмоткой:**  
1-вал; 2- обмотка; 3-подшипниковый щит; 4-индуктор; 5-магнитопровод; 6-магнит

### **Вывод**

При сравнении разных типов генераторов с ПМ можно сделать вывод, что самым оптимальным вариантом будет генератор с зубчатым статором с катушечной обмоткой. Он имеет небольшие масса-габаритные показатели, высокий КПД. Стоимость по сравнению с другими типами генераторов в несколько раз меньше. Но усложняется технология изготовления пазов.

**Таблица 1 - Сводные данные.**

Машины	Дш, мм.	масса магнитов, кг.	Масса меди, кг.	Масса матер., кг.	Стоимость, руб.	$\eta$ , %	$\Delta U, B$
Гладкий статор	444	5	9,7	26,4	33268	84,8	38,71
Зубчатый статор с кольцевой обмоткой	355	4	11,6	43,4	28566	87	44,1
Зубчатый статор с катушечной обмоткой.	300	1,1	2,6	21,3	7896	86,9	87

### **Библиографический список**

1. **Балагуров В.А.** Проектирование специальных электрических машин переменного тока: Учебно пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1982. 272с.
2. **Бут Д.А.** Бесконтактные электрические машины: Учебно пособие для студентов вузов. - М.: Высш. школа, 1990. 416с.
3. **Шишкин В.П.** Автоматизированное проектирование торцевых магнитоэлектрических генераторов переменного тока: учеб. пособ. / ГОУ ВПО «ИГЭУ им В.И. Ленина». Иваново, 2006. 68 с.

*Д. Г. Сохин; В.П. Шишкин к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В МОЩНОМ ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ГИБРИДНОГО АВТОБУСА**

В городском цикле движения автобуса при резко переменном характере нагрузок, частых остановках, многократных торможениях, двигатель автобуса работает далеко не в оптимальном режиме. Значительная часть топлива сжигается впустую.

Сегодня самым эффективным решением по экономии топлива и снижению выбросов вредных веществ является гибридная энергетическая система. Она состоит из ДВС, тягового генератора, тягового электродвигателя и силовых преобразователей [1].

В качестве генератора в основном используют асинхронные машины с короткозамкнутым ротором (ТАГ).

Такой выбор обусловлен целым рядом преимуществ асинхронной машины: простота обслуживания и ремонта, высокая надежность, простота конструкции, относительная низкая стоимость, долгий срок службы.

Был проведен анализ характеристик двух одинаковых асинхронных генераторов: с обмоткой ротора из меди и из алюминия в сравнении с синхронным генератором на постоянных магнитах (СГПМ). [2]

В последние годы СГПМ начинает набирать все большую популярность. Это связано с тем, что эта машина позволяет получать ту же мощность, но при меньшей длине агрегата.

### **Библиографический список**

1. **Селифонов В.В.**, Фиронов А.М., Губанов И.О. «Комбинированная энергетическая установка городского автобуса и система управления». Москва: МАДИ 1991г.;
2. **Учебник** по СПРУТ-ТП: Система Автоматизированного Проектирования и Нормирования Технологических Процессов (САПР ТП).

Таблица №1 . Общая оценка возможности замены ТАГ на СГПМ той же мощности

	Мо щно сть, кВт	Усре днен ный КПД	Инф, А	Cos( фи)	Mm, о.е.	Ком плек с, Вт/с м <sup>3</sup>	Объ ем ак тив но го яд ра, дм <sup>3</sup>	Стои мость актив ных мате риалов	Туэ
Коэффициент значимости		0,3		0,05	0,1	0,1	0,2	0,25	
ТАГ250-280 CU	180	94,28	212,28	0,89	3,21	134,3	53,4	36923	0,98
ТАГ250-280 AL		93,76	213,28	0,89	3,19	150		25135	1
СГПМ250- 255		95,58	222,6	0,82	1,35	109,4	48,7	71884	0,84

*А.С. Перминова, магистрант;  
рук. Ю.И. Страдомский, проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО УПЛОТНЕНИЯ НЕМАГНИТНОГО ВАЛА КЛАССИЧЕСКОГО ТИПА

**Введение.** В настоящее время магнитожидкостные уплотнения немагнитного вала практически не используются из-за низкой удерживающей способности. Повышение эффективности таких уплотнений является актуальной задачей, так как объем применения немагнитных сплавов в авиационной и транспортной технике постоянно расширяется.

**Объект исследования.** Известна классическая конструкция МЖУ немагнитного вала [1], в которой магнитное поле концентрируется между разноименными полюсными приставками у поверхности уплотняемого немагнитного вала (рис.1). Удерживающая способность МЖУ определяется распределением неоднородного магнитного поля в

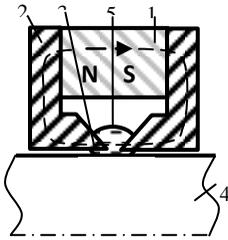


Рис. 1. 1 – магнит, 2 – полюсные приставки, 3 – концентраторы, 4 – вал, 5 – МЖ

рабочем зазоре. Существующее в настоящее время приборное оборудование не позволяет провести экспериментальное исследование параметров магнитного поля на натуральных образцах уплотнений. Размеры чувствительных элементов приборов значительно по сравнению размерами рабочих зон уплотнений, где существует резко неоднородное магнитное поле. Исследование магнитного поля МЖУ немагнитного вала проводилось методом математического моделирования магнитных полей. Магнитное поле рассчитывалось методом конечных элементов [2],

расчетная сетка выполнялась из треугольных элементов, что позволило точно воспроизвести границы деталей с различными магнитными свойствами. Использовалась расчетная сетка с переменной плотностью элементов. Размеры элементов сетки менялись в  $10^3$  раз при переходе

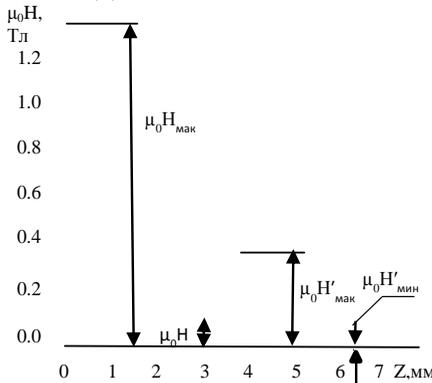
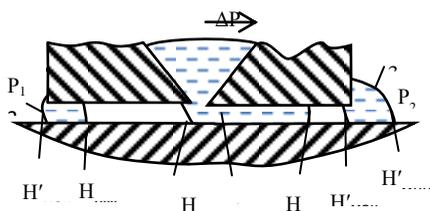


Рис. 2. Распределение напряженности магнитного поля на поверхности вала

от области минимального зазора между концентраторами полюсных приставок к границам расчетной области. **Распределение напряженности поля в рабочем зазоре уплотнения.** Удерживающая способность МЖУ определяется распределением напряженности магнитного поля в его рабочем зазоре между полюсными приставками и валом. На рис. 2 показано распределение напряженности поля вдоль поверхности немагнитного вала. Напряженность поля имеет максимум  $H_{\max}$  в области зазора между концентраторами полюсных приставок и плавно уменьшается при удалении от плоскости симметрии магнитной системы. Напротив кромок торцевых поверхностей полюсных приставок расположены локальные максимумы напряженно-

сти  $H'_{\max}$ , обусловленный кромочным эффектом кромки полюсной



**Рис. 3. Положение магнитной жидкости в рабочем зазоре магнитожидкостного уплотнения**

приставки [3]. Согласно представленного распределения напряженности поля в зазоре уплотнения образуется три герметичных магнитожидкостных кольца (рис.3). Основное кольцо 1 в области зазора между концентраторами полюсных приставок и два дополнительных кольца 2 и 3 по краям полюсных приставок.

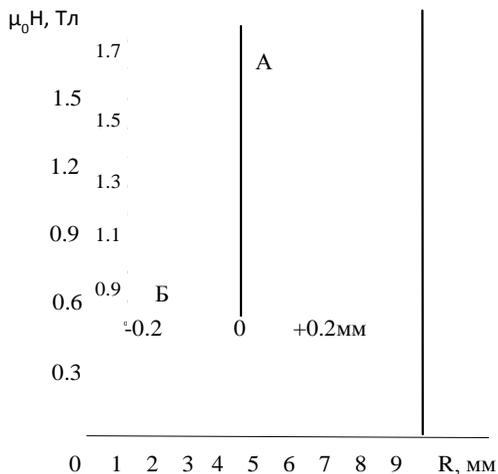
Удерживающая способность основного магнитожидкостных кольца определяется разностью экстремальных напряженностей  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  на поверхности вала в рабочем зазоре (рис. 2).

$$\Delta p = M_s \mu_0 (H_{\max} - H_{\min}) = M_s \mu_0 \Delta H \quad (1),$$

где  $M_s$  - намагниченность насыщения магнитной жидкости,  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Перепад давлений, удерживаемый уплотнением, между магнитожидкостными кольцами распределяется не равномерно. Перепады давлений на кольцах прямо пропорциональны перепадам индукций на границах магнитожидкостных пробок. Для рассматриваемого случая распределения напряженности магнитного поля в рабочем зазоре соотношение имеет вид 0.24/1.00/0.31. То есть, основное кольцо воспринимает перепад давлений в вдвое выше, чем два дополнительных кольца. Если сравнивать дополнительные кольца друг с другом, то кольцо, смещенное под полюсную приставку, удерживает на 30% меньший перепад, чем кольцо, смещаемое за полюсную приставку.

**Распределение напряженности магнитного поля в пространстве между концентраторами магнитной системы.** Так как большую часть перепада давлений воспринимает основное магнитожидкостное кольцо 1, более подробно исследуем, как распределяется магнитное поле в пространстве между наконечниками полюсных приставок и какие факторы на него влияют. На рис. 4 показано распределение напряженности магнитного поля в плоскости симметрии магнитной системы. Пересечение сплошной вертикальной линии на рис. 4 с кривой напряженности поля образует точку А, соответствующую напряженности магнитного поля на поверхности вала при нулевой величине



**Рис. 4. Распределение напряженности магнитного поля в плоскости симметрии магнитной системы**

рабочего зазора. Из рис.4 видно, что пик напряженности магнитного поля не лежит на линии минимального зазора между остриями концентраторов полюсных приставок, а смещен в сторону магнита. Это можно объяснить асимметричным расположением боковых образующих поверхностей концентраторов полюсных приставок по отношению к плоскости симметрии магнитной системы. Участок АБ кривой показывает, каким образом меняется

максимальная напряженность магнитного поля на поверхности вала при увеличении рабочего зазора. При увеличении рабочего зазора наблюдается резкий спад напряженности магнитного поля на поверхности немагнитного вала, соответствующим образом падает и удерживающая способность основного магнитожидкостного кольца. Из выше приведенного следует, что при создании магнитожидкостного уплотнения немагнитного вала необходимо стремиться минимизировать величину рабочего зазора между валом и концентраторами полюсных приставок.

**Влияние величины зазора между концентраторами полюсных приставок на напряженность поля в рабочем зазоре.** Концентраторы полюсных приставок имеют заостренную форму. Кромка на вершине наконечника обладает высокой рассеивающей способностью и около кромки образуется резко неоднородное магнитное поле [3]. Это значит, что напряженность магнитного поля, стремительно уменьшается при удалении от кромки концентратора, что подтверждают результаты расчета напряженности магнитного поля в промежутке между концентраторами полюсных наконечников. Индукция магнитного поля резко снижается от 2,6 Тл у кромки наконечника до 1.77 Тл в центре зазора. Исходя из выше изложенного, можно предположить,

что максимальную индукцию в рабочем зазоре ( $H_{\text{макс}}$ ) можно увеличить, уменьшая зазор между кромками полюсных наконечников.

**Насыщение стали полюсных наконечников.** Исследования показали, что кончики концентраторов длиной около 1 мм находятся в состоянии глубокого насыщения и относительная магнитная проницаемость стали на острие снижается до 3 единиц. Вследствие чего, падение магнитодвижущей силы (МДС) на кончиках встречных концентраторов в 5 раз превышает падение МДС в воздушном зазоре между кромками концентраторов. При использовании остроконечной формы концентраторов на полюсных наконечниках исключить насыщения стали на остриях концентраторов не представляется возможным, поэтому такую форму концентраторов следует признать недостаточно эффективной. Одним из возможных вариантов трансформации формы является выполнение площадки на острие наконечников.

#### Библиографический список

1. **Фертман В.Е.** Магнитные жидкости – естественная конвекция и теплообмен. - Мн.: «Наука и техника», 1978. - 207 с.
2. [www//.elcut.ru](http://www.elcut.ru). Сайт ООО «Тор».
3. **Перминов С.М.** Исследование кромочных эффектов магнитного поля с учетом нелинейных свойств магнитных материалов методом математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2011. - №4. - с.30-32.

*В.Е. Малов, студ.;*  
*рук. А.К. Громов к.т.н., доц., В.П. Шишкин к.т.н., проф.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Асинхронные машины малой мощности твердо вошли в современный быт и хозяйство. К сожалению, нет возможности рассчитывать эти машины, применяя известные методики, которые используются для проектирования относительно крупных двигателей. Это связано с тем, что асинхронные машины малой мощности, как правило, получают питание от однофазной сети. При этом необходимо создавать условия для образования вращающихся магнитных полей. Круговое поле в таких машинах получить можно, но только при одной определенной скорости. При всех остальных скоростях магнитное поле получается эллиптическим. Это вызывает появление обратных (тормозных) мо-

ментов. Такие моменты негативно сказываются на характеристиках машины и усложняют ее проектирование.

В данной работе рассмотрены особенности проектирования мало-мощных машин, включающие выбор главных размеров, электромагнитных нагрузок и плотности тока в обмотке статора, числа пазов статора и ротора, и числа пазов на полюс и фазу.

Асинхронными машинами малой мощности принято называть машины от десятков Вт, до нескольких сотен Вт.

В отличие от нормальных асинхронных машин, выбор главных размеров усложняется наличием большего количества видов этих машин (трехфазные, конденсаторные, однофазные), имеющих различное конструктивное исполнение. К таким машинам предъявляется многообразие требований, которые часто противоречат друг другу. Трудности в получении обобщенных опытных и расчетных данных по выполняемым машинам усложняет выбор главных размеров. В общем случае у мало-мощных машин, отношение расчетной длины статора к внутреннему диаметру ( $\lambda$ ) оказывается большим, чем у промышленных двигателей ( $\lambda_{\text{макс}}=1,8$ ). Это объясняется необходимостью увеличить магнитный поток машины и ее КПД. При этом снижаются электромагнитные нагрузки, по сравнению с обычными машинами. Однако сильное увеличение этого отношения недопустимо для серийного производства бытовых машин, поскольку это приводит к значительному увеличению расхода материала на изготовление одного изделия.

Электромагнитные нагрузки мало-мощных машин сравнительно невелики. Линейная нагрузка ограничивается значениями: для  $2p=2$ ,  $A=(9000-18000)A/m$ ; для  $2p=4$ ,  $A=(9000-20000)A/m$ . Уменьшение линейной нагрузки для таких двигателей обусловлено тем, что ухудшается коэффициент заполнения паза. Причиной этого является то, что магнитный поток машины все же относительно мал, и для поддержания достаточно высокой ЭДС в обмотке статора требуется многовитковая обмотка с малым сечением проводов. При этом изоляция проводов занимает значительное место. Поэтому добиться требуемого значения коэффициента заполнения паза в этих машинах относительно сложно при больших значениях линейной нагрузки. Кроме того, у однофазных двигателей без пусковых элементов мал пусковой момент и сравнительно мала перегрузочная способность (максимальный момент). Рост линейной нагрузки приведет к возрастанию индуктивных сопротивлений рассеяния, что будет являться причиной снижения этих моментов.

Магнитная индукция в зазоре машин малой мощности лежит в пределах  $B\delta=(0,3-0,75)$  Тл. В отличие от линейной нагрузки, индукция изменяется в довольно больших пределах, однако в среднем она все же ниже чем у нормальных двигателей. Это объясняется тем, что магнитная система таких машин собирается из стали с пониженными свойствами. Поэтому при больших значениях индукции могут возникнуть сильные насыщения зубцов и ярма. При этом возрастают МДС и ток холостого хода. Нижние пределы индукции обусловлены еще и требованием малошумности машины в бытовых устройствах.

Вследствие уменьшения размеров паза статора и большого числа витков обмотки, сечение ее провода получается малым. Поэтому плотность тока в такой обмотке будет относительно большой  $(4-12)$  А/мм<sup>2</sup>. Это приводит к тому, что значительно увеличивается активное сопротивление обмотки статора; оно становится сравнимым с ее индуктивным сопротивлением; КПД машины снижается.

Выбор числа пазов на статоре ( $Z_s$ ) в асинхронных маломощных машинах тесно связан с выбором числа пазов на роторе ( $Z_r$ ). Соотношение  $Z_s$  и  $Z_r$  выбирается по следующим соображениям:

- отсутствие больших провалов в кривой  $M=f(n)$ , обусловленных паразитными асинхронными и синхронными моментами;

- снижение добавочных потерь в зубцах;

- обеспечение малошумности машины от действия радиальных сил.

При заданном внешнем диаметре статора, величина  $Z_s$  ограничивается предельной, по технологическим соображениям, шириной зубца. Выбор числа пазов статора определяется так же числом пар полюсов и выбором типа обмотки.

В маломощных машинах следует избегать использования обмоток с дробным  $q$ , поскольку обмотки таких двигателей часто однослойные. Однако можно спроектировать обмотку с дробным  $q$ , если заполнить обмоткой не все пазы статора. Дробное значение  $q$  усложняет изготовление обмотки и увеличивает дифференциальное рассеяние. В конденсаторных двигателях, главная и вспомогательная обмотки занимают одинаковое число пазов. В двигателях с пусковыми элементами главной фазе отводится  $2/3$  пазов статора, а вспомогательной  $1/3$ . Это позволяет устранить третью гармонику в кривой МДС главной фазы. На практике в микромашинах с пусковыми элементами, применяются и другие соотношения чисел пазов (например  $3/4$ ). Однако увеличение числа пазов главной фазы приводит к увеличению электрических потерь.

В спроектированной машине, для обеспечения экономичности серийного производства принимаются:  $\lambda=0,75$ ,  $A=15000$  А/м,  $B\delta=0,6$  Тл,  $Z_c=24$ ,  $Z_r=21$ . Обмотка статора однослойная с  $q=6$ . Число пазов вспомогательной обмотки равно числу пазов обмотки главной фазы. Для увеличения КПД плотность тока в обмотке статора принимается малой ( $J=4$  А/мм<sup>2</sup>).

#### **Библиографический список**

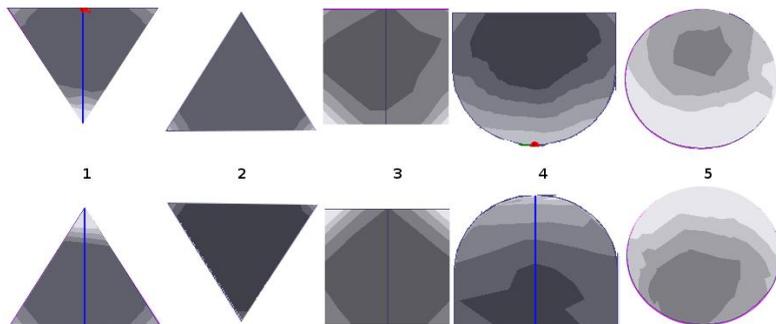
1. **Лопухина Е.М.**, Сомихина Г.С. Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока.–М.: Госэнергоиздат, 1961.

*И.А. Балакирев, магистрант;  
рук. Н.А. Морозов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА УГЛА ПОВОРОТА**

Исследуемый датчик угла поворота имеет магнитную систему, состоящую из двух магнитопроводящих колец расположенных в параллельных плоскостях так, чтобы создавались условия равномерного распределения между ними магнитного потока. Одним из основных требований к индукционным датчикам является получение линейной характеристики, поэтому очень важно, чтобы в магнитной цепи не наблюдалось участков, в которых кривая намагничивания магнитопровода становится нелинейной. Материалом магнитопровода выбран феррит 2000НМ, допускающий создание в магнитопроводе магнитного потока достаточно высокой частоты. В качестве базовых форм выбраны кольца (рис. 2), имеющие в поперечном сечении форму равностороннего треугольника 1, 2, квадрата 3, стандартно выпускаемых колец, сочетающих в сечении квадрат и круг 4, 5. Магнитопроводы треугольного сечения повернуты друг к другу обеими сторонами.

Моделирование проводилось для бесконечно длинных стержней, оси которых параллельны друг другу. Магнитное поле между стержнями плоскопараллельно, что позволяет применить для моделирования метод конечных элементов. На рис.1 представлены результаты моделирования магнитного поля при равных зазорах между стержнями.



**Рис.1** Распределение индукций в сечениях

Основное значение имеют участки, в которых магнитная индукция превышает значения, соответствующие линейному участку кривой намагничивания материала стержней (светлые участки на тёмном фоне). Сечения треугольной формы нерациональны для использования, так как вершины сечений стержней заметно насыщаются, что может вызывать погрешности из-за нелинейности изменения магнитного поля между стержнями по их длине.

Аналогичная картина наблюдается и в стержнях квадратного сечения, при использовании таких стержней необходимо будет значительно снижать значения магнитного потока в системе, что приведет к уменьшению эдс в измерительных катушках и снижению чувствительности датчика.

Наиболее рациональны для создания индукционного датчика кольца, поперечное сечение которых имеет, пусть неполную, но форму круга, которыми эти кольца должны быть обращены друг к другу. В этом случае распределение магнитного поля в зазоре между стержнями будет наиболее равномерным при уменьшении возможности насыщения ближайших друг к другу участков колец. В конкретном случае насыщение существенно, потому что моделирование проводилось при одинаковой намагничивающей силе и поток в кольцах с круговым сечением заметно больше.

На рис. 2 приведена кривая намагничивания феррита 2000НМ, линейный участок кривой достигает значения магнитной индукции 0,25 Тл. Следовательно, для обеспечения линейных выходных характеристик индукционного датчика угла поворота, необходимо создавать намагничивающую силу катушки, при которой магнитный поток в се-

чениях колец не создает в элементах колец магнитную индукцию более 0,2 Тл.

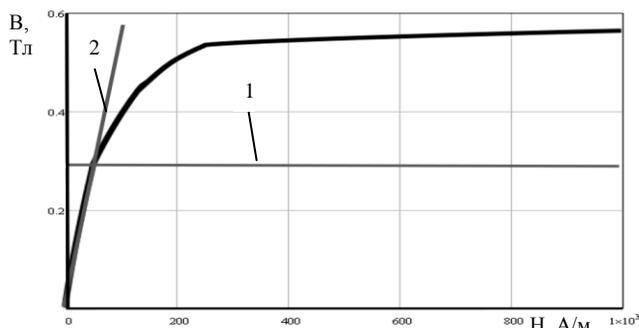


Рис. 2 Кривая намагничивания феррита 2000НМ: 1-линия линейного изменения индукции; 2-предельное значение линейного изменения индукции

Это относится к той части колец, на которой перемещается блок измерительных катушек. На участках колец, расположенных над катушкой намагничивания, насыщение может быть и большим. Оно не будет влиять на равномерность распределения магнитного поля на рабочей части магнитопроводящих колец.

На рис.3 показана стержневая магнитная система, аналогичная системе индукционного датчика. Ниже показано распределение магнитного потока в стержнях по их длине.

Из результатов моделирования видно, что распределение магнитного потока по длине стержней практически линейно. Этому соответствует малое падение магнитного потенциала в материале стержней, которое должно быть значительно меньше падения намагничивающей силы в зазоре системы. Дальнейшим продолжением работы является нахождение наиболее рациональных соотношений значений зазора между кольцами, их диаметров, допустимых МДС катушки намагничивания и т.п. Полученные данные позволят разработать опытно-промышленный образец индукционного датчика угла поворота повышенной чувствительности.

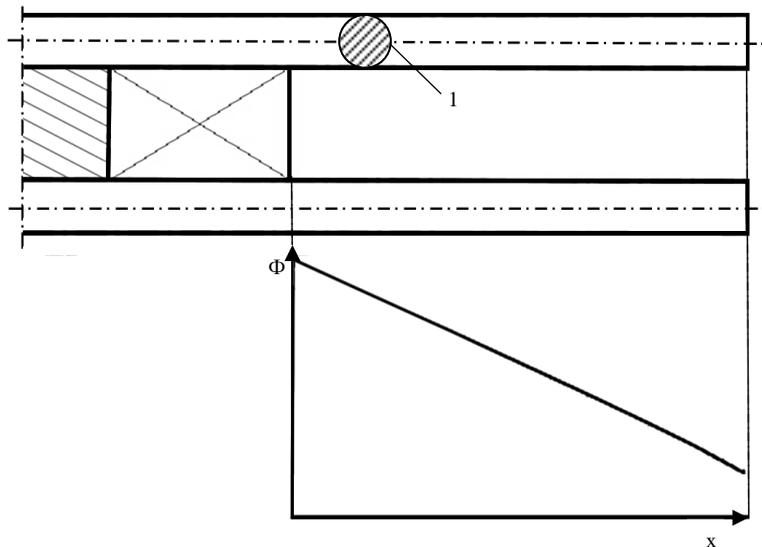


Рис. 3 Распределение магнитного потока в сечении стержней:  
1-поперечное сечение стержня

#### Библиографический список

1. Михайлова М.М. Магнитомягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь. 1983.

x

*К.М. Кондарев, студ.; В.Н. Караулов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Для увеличения габаритной мощности закрытых асинхронных двигателей применяется интенсификация их охлаждения. При сохранении традиционной конструкции и технологии изготовления асинхронного двигателя, возможности интенсификации охлаждения невелики. Внутренняя теплопередача может быть увеличена за счет применения более теплопроводных пропиточных составов и повышения коэффициента пропитки. Рост внешней теплоотдачи обеспечивается за счёт оптими-

зации оребрения корпуса и совершенствования вентилятора внешнего обдува.

Повышение габаритной мощности асинхронных двигателей на 1-2 ступени требует снижения нагрева обмотки статора на 25-30% и более. Для достижения этой цели необходимо выйти за рамки обычных конструкторско-технологических решений. Предложены два направления интенсификации охлаждения закрытых машин [1].

Первое - повышение интенсивности теплопередачи внутри машины путем замены малоэффективной внутренней циркуляции воздуха переносом теплоты от лобовых частей обмотки статора к станине в результате использования хладагента с высокой теплопроводностью. Возможно использование во внутреннем объеме машины высокоинтенсивных процессов конвективного теплообмена.

Второе направление — создание дополнительных путей отвода теплоты из внутреннего объема машины к окружающей среде, т. е. введение непосредственных тепловых связей внутренней полости или активных частей машины с наружным воздухом (применение замкнутых теплопередающих контуров испарительно-конденсационного или жидкостного типа). При этом в качестве теплопроводов и теплообменников предлагается использовать существующие элементы конструкции — вал двигателя, диск вентилятора, его кожух.

Рассмотрим технические решения [1], относящиеся ко второму направлению. На рис. 1 представлена машина с замкнутыми теплопередающими контурами в статоре. Контуров могут быть жидкостными и испарительно-конденсационными. Жидкостный циркуляционный контур, передающий теплоту от внутреннего воздуха закрытой машины к наружному, состоит из связанных трубопроводами 1 змеевиков, один из которых 2 расположен снаружи станины, а два других (3 и 4) — в пространствах между лобовыми частями обмотки и «свисающими» частями станины. Циркуляция жидкости в теплопередающем контуре обеспечивается насосом, приводимым от вала машины.

Для повышения эффективности контура полости лобовых частей с внутренними змеевиками могут быть заполнены высокотеплопроводным составом, а наружный змеевик размещен по образующей кожуха. Если выполнить контур в виде отдельных замкнутых витков, расположенных в вертикальной плоскости (рис. 2), жидкость в нем будет циркулировать под действием свободной конвекции, и надобность в насосе отпадает.

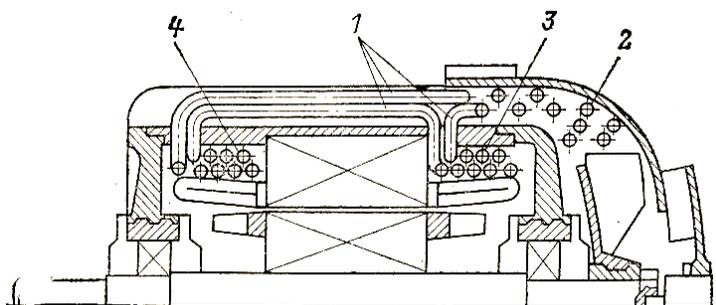


Рис. 1. Закрытый обдуваемый электродвигатель с замкнутым жидкостным контуром, связывающий внутреннюю полость двигателя и внешний воздух.  
1 – трубопровод. 2 – змеевик снаружи станины. 3,4 – змеевики между лобовыми частями и станиной

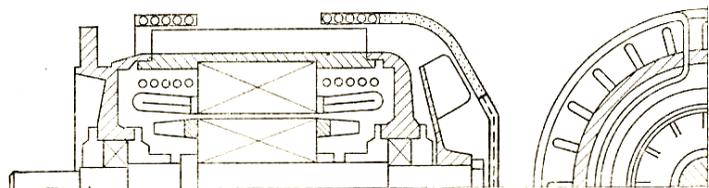


Рис. 2. Закрытый обдуваемый электродвигатель с секционированным теплопередающим контуром

В [2] предложена конструкция статора, показанная на рис. 3. Машина имеет жидкостную конвективную систему с непосредственным омытием проточным хладагентом тепловыделяющих элементов, заключенных в герметизированные полости.

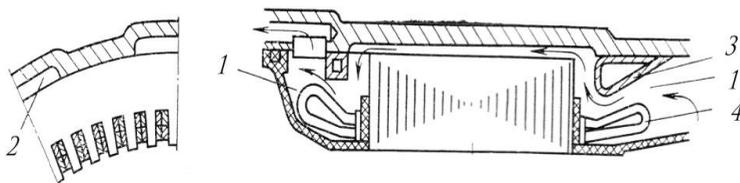


Рис. 3. Конструктивная схема статора с омываемым полостным охлаждением.  
1 – кольцевая полость. 2 – аксиальный канал. 3 - вытеснитель, 4 – лобовые части обмотки статора

Укажем особенности тепловых расчётов закрытого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, выполненного с масляным и, в другом случае, с водяным охлаждением. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в машинах с канальным и омываемым типами охлаждения рассчитывается по формуле, представленной в [2]:  $\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}$ . Число Нуссельта для машины с канальным охлаждением статора водой определяется по формуле:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}.$$

Число Нуссельта для машины с омываемым охлаждением:

$$Nu = 0,23 Re^{0,65} Pr^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}.$$

Коэффициент теплоотдачи в машинах с водяным канальным охлаждением изменяется в диапазоне  $\alpha = 11000 \div 14000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ; в машинах с масляным полостным охлаждением -  $\alpha = 2000 \div 3500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ .

Интенсификация охлаждения закрытого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором позволяет увеличить факторы нагрева (линейную нагрузку, плотность тока) и, как следствие, уменьшить размеры машины.

В таблице 1 приведено сопоставление показателей асинхронных машин одинаковой мощности, выполненных с воздушным, масляным и водяным охлаждением. Тепловой расчёт машины с воздушным охлаждением выполнен по методике [3].

**Таблица 1. Сопоставление показателей асинхронных машин одинаковой мощности, выполненных с воздушным, масляным и водяным охлаждением**

Параметр	Воздушное охлаждение	Омываемое охлаждение маслом	Канальное охлаждение водой
Номинальная мощность, кВт	40	40	40
Длина стали статора, м	0,198	0,145	0,130
Внешний диаметр статора, м	0,349	0,349	0,349
Линейная нагрузка, А/м	32542	38738	43913
Тепловая нагрузка, $\text{А}^2/\text{м}^3$	$0,9 \times 10^{11}$	$1,9 \times 10^{11}$	$2,0 \times 10^{11}$
Среднее превышение температуры, °С	18	18	18
Коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$	150	6528	12750

Библиографический список

1. **Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И.** Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат. 1983.
2. **Науменко В.И., Ключков О.Г.** Авиационные электрические машины с интенсивным охлаждением. М.: Машиностроение. 1977.
3. **Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф.** Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа. 2005.

*П.М. Гусев, студ. гр. 5-37;  
рук. В.Н. Караулов к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПУСКА ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Трёхфазные асинхронные двигатели могут работать при питании от однофазной сети. При этом энергетические показатели двигателя – КПД и  $\cos(\varphi)$  – снижаются; нагрев обмоток – увеличивается; пуск двигателя при номинальной нагрузке на валу может оказаться невозможным. Эффективность работы двигателя при однофазном питании зависит от схемы подключения фаз и от величины ёмкости конденсатора. Выбор рациональной схемы питания и величины пусковой и рабочей ёмкости конденсатора для конкретного двигателя предполагает исследование переходных и установившихся процессов в двигателе.

На рис. 1 представлена электромагнитная модель трёхфазного асинхронного двигателя, подключенного к однофазной сети. Обмотки рассматриваются как электрические цепи с сосредоточенными параметрами. Обмотка короткозамкнутого ротора заменена на эквивалентную трёхфазную. Математической моделью двигателя являются дифференциальные уравнения равновесия напряжений фаз и уравнение движения ротора [1]. Начальные условия задают мгновенное значение напряжения сети, положение и угловую скорость ротора, тормозной момент на валу.

Потокосцепления фаз рассчитываются через токи и соответствующие индуктивности. Например, потокосцепление фазы А статора

$$\psi_A = L_A \cdot i_A + L_{ABC} \cdot i_{BC} + L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c.$$

Индуктивность фазы А статора складывается из главной индуктивности фазы и индуктивности рассеяния  $L_A = L_m + L_{1\sigma}$ . Индуктивность фазы ВС  $L_{BC} = 3L_m + 2L_{1\sigma}$ .

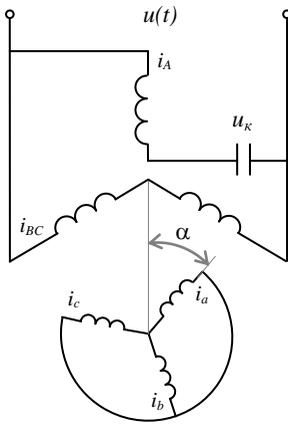


Рис. 1. Электромагнитная модель и схема подключения к однофазной сети трёхфазного асинхронного двигателя

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = i_A(t) \cdot R_A + \frac{d\psi_A(t)}{dt} + u_K(t); \\ u(t) = i_{BC}(t) \cdot R_{BC} + \frac{d\psi_{BC}(t)}{dt}; \\ 0 = i_a(t) \cdot R_a + \frac{d\psi_a(t)}{dt}; \\ 0 = i_b(t) \cdot R_b + \frac{d\psi_b(t)}{dt}; \\ 0 = i_c(t) \cdot R_c + \frac{d\psi_c(t)}{dt}; \\ \frac{du_K(t)}{dt} = i_A(t) \cdot \frac{1}{C}. \end{array} \right.$$

Уравнения равновесия напряжений в фазах статора и ротора и напряжение на конденсаторе.

Взаимные индуктивности между фазами статора и ротора

$$\begin{aligned} L_{Aa} &= L_{aA} = L_m \cdot \cos(\alpha), \\ L_{Ab} &= L_{bA} = L_m \cdot \cos(\alpha + 120^\circ), \\ L_{Ac} &= L_{cA} = L_m \cdot \cos(\alpha - 120^\circ), \\ L_{BCa} &= L_{aBC} = \sqrt{3} \cdot L_m \cdot \sin(\alpha), \\ L_{BCb} &= L_{bBC} = -\sqrt{3} \cdot L_m \cdot \sin(\alpha - 60^\circ), \\ L_{BCc} &= L_{cCB} = -\sqrt{3} \cdot L_m \cdot \sin(\alpha + 60^\circ). \end{aligned}$$

Взаимные индуктивности между фазами статора

$$L_{ABC} = L_{BCA} = 0.$$

Взаимные индуктивности между фазами рото-

$$\text{ра } L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = -\frac{L_m}{2}.$$

Уравнение движения ротора  $M(t) = M_B + J \frac{d\Omega}{dt}$ , где  $J$  – момент инерции ротора;  $\Omega$  – угловая скорость ротора;  $M(t)$  – электромагнитный момент;  $M_B$  – внешний тормозной момент. Электромагнитный

$$\text{момент } M(t) = \sum_{k=A,BC} i_k \cdot \sum_{n=a,b,c} i_n \cdot \frac{dL_{kn}}{d\gamma}.$$

Дифференциальные уравнения в форме Коши имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{di}{dt} \right] = [L]^{-1} \cdot ([u] - [R] \cdot [i] - [L]' \cdot [i]); \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{M(i, \gamma) - M_B}{J}; \\ \frac{du_{\kappa}}{dt} = i_A \cdot \frac{1}{C}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = \Omega. \end{array} \right. \quad (1)$$

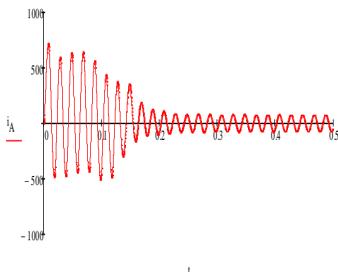
Система дифференциальных уравнений (1) исчерпывающим образом описывает установившиеся и переходные процессы в однофазной асинхронной машине. Параметры модели (активные и индуктивные сопротивления обмоток) изменяются в переходных процессах вследствие изменения насыщения магнитной цепи и влияния поверхностного эффекта. Параметры рассчитываются по методике [2] и зависят от скорости вращения ротора. Расчет процессов выполняется в среде Mathcad.

Ниже представлены результаты моделирования процессов пуска и установившегося режима работы трёхфазного асинхронного двигателя со следующими показателями:  $P_{\text{ном}} = 30$  кВт,  $U_{\text{ном}} = 220/380$  В,  $n_{\text{ном}} = 1470$  об/мин. Двигателя запускается и работает при номинальной нагрузке. Сопоставляются результаты при трёхфазном и однофазном питании двигателя.

Оптимальное значение рабочей емкости конденсатора  $C_p$  обеспечивает в номинальном режиме работы двигателя максимальную величину КПД. В результате исследования установившегося процесса для рассмотренного двигателя получено  $C_p = 3890 \cdot \frac{I_{\text{нф}}}{U_{\text{нл}}}$ .

Оптимальное значение пусковой емкости конденсатора  $C_n$  обеспечивает при пуске двигателя минимальные значения времени разгона, потребляемой энергии, величины пускового тока. В результате исследования переходного процесса для рассмотренного двигателя получено  $C_n = 2,5 \cdot C_p$ .

Питание двигателя от трёхфазной сети



Питание двигателя от однофазной сети

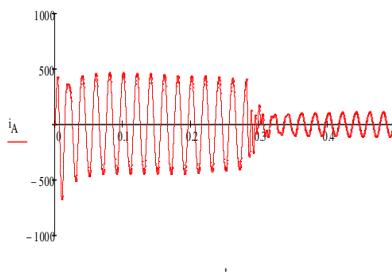


Рис. 2. Ток в фазе А статора

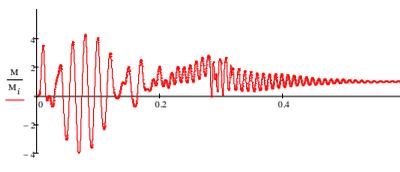
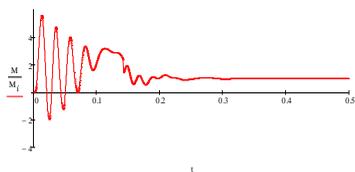


Рис. 3. Электромагнитный момент

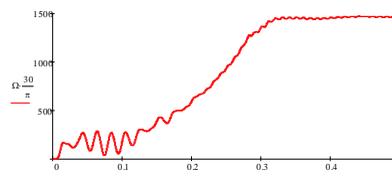
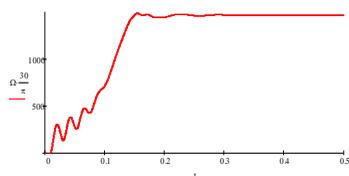


Рис. 4. Частота вращения

**Таблица 1. Сопоставление показателей процессов пуска и установившегося режима работы трёхфазного асинхронного двигателя при питании от трёхфазной и однофазной сети**

Показатель	Питание двигателя от трёхфазной сети	Питание двигателя от однофазной сети
Время пуска, с	0,15	0,3
Номинальная частота вращения, об/мин	1470	1470
КПД, о.е.	0,949	0,942

Результаты моделирования процессов пуска и установившегося режима работы представленного трёхфазного асинхронного двигателя показывают возможность эффективной эксплуатации двигателя при питании от однофазной сети с использованием оптимальных величин рабочей и пусковой ёмкостей.

### Библиографический список

1. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: Учебник для вузов. - М.: Энергия, 1980. - 928 с.
2. **Проектирование** электрических машин: Учеб. для вузов / И.П.Копылов, Б.К. Клоков, В.П.Морозкин, Б.Ф.Токарев; под ред. **И.П.Копылова**. –4-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2005. - 767 с.: ил.

*И. А. Зиновьева, студ.;*

*А. М. Шурыгин, к. т. н., доцент*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

При моделировании электромеханических систем целесообразным является применение численно-аналитического метода пространства состояний, позволяющего определить значения переменных в дискретные моменты времени, соответствующие моментам переключения отдельных блоков системы. Данный метод исключает промежуточные вычисления без потери точности расчета.

На основе метода пространства состояний разработана модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. При использовании допущения о том, что в течение малого времени шага расчета  $\Delta t$  напряжение обмотки якоря  $u_a$  и момент сопротивления  $M_c$  остаются неизменными, дифференциальные уравнения идеализированного двигателя [1] записываются в форме матричного уравнения состояния

$$\frac{d}{dt} [x_{\text{ext}}] = [A_{\text{ext}}] [x_{\text{ext}}], \quad (1)$$

где  $[x_{\text{ext}}]$  – расширенный вектор состояния;  $[A_{\text{ext}}]$  – расширенная матрица состояния, и принимают вид

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(-R_a)}{L_a} & \frac{(-K_e)}{L_a} & \frac{u_a}{L_a} \\ K_m & 0 & \frac{(-M_c)}{J_{пр}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $i_a$  – ток обмотки якоря,  $\omega$  – угловая скорость двигателя;  $R_a$ ,  $L_a$  – активное сопротивление и полная индуктивность обмотки якоря;  $K_e$ ,  $K_m$  – постоянные коэффициенты (при неизменном магнитном потоке);  $J_{пр}$  – приведенный момент инерции.

Решение матричного уравнения (1) в произвольный момент времени  $t=t_{нач}+\Delta t$  записывается как [2]

$$[x_{ext}] = e^{[A_{ext}]\Delta t} [x_{ext\ нач}], \quad (3)$$

где  $[x_{ext\ нач}]$  – значение расширенного вектора состояния  $[x_{ext}]$  в начальный момент времени  $t_{нач}$ .

На каждом расчетном интервале  $\Delta t$  сначала формируется расширенная матрица состояния  $[A_{ext}]$ , определяются значения коэффициентов ее характеристического уравнения, и рассчитываются ее собственные числа. Затем вычисляются переходная матрица состояния и расширенный вектор состояния  $[x_{ext}]$ .

Значение вектора  $[x_{ext}]$ , полученное в момент времени  $t=t_{нач}+\Delta t$ , и значение времени  $t$  принимаются начальными для расчета на следующем интервале. Затем процесс вычислений повторяется.

### Библиографический список

1. Копылов, И. П. Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – Изд. 2-е, перераб. – М. : Высшая школа : Логос, 2000. – 607 с.
2. Деруссо, П. Пространство состояний в теории управления (для инженеров) : пер. с англ. / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М. : Наука : Главная редакция физико-математической литературы, 1970. – 620 с.

*Л.Н. Булатов;  
рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СОЗДАНИЕ ПОДСИСТЕМ САПР АД НА БАЗЕ ДОСТУПНЫХ КОМПОНЕНТОВ**

Рост количества мелких и средних предприятий, ориентированных на выпуск электротехнической продукции, а так же постоянное увеличение разнообразия номенклатуры выпускаемой продукции заставляет даже мелкие предприятия осваивать современные средства проектирования и моделирования, представленные наукоемкими, дорогостоящими и сложными в использовании САД ([Computer-aided design](#))/САЕ ([Computer-aided engineering](#)) – системами. Работа с ними требует высокой квалификации. Далеко не все предприятия могут позволить себе подготовить для себя специалистов такого уровня. Кроме того, крупные САД/САЕ-системы относятся к числу одних из наиболее дорогих программных продуктов.

Альтернативой современным САД/САЕ-системам, пытающимся вместить в себя весь опыт численного решения задач математической физики, может служить модульный подход к построению САПР. Суть его состоит в организации САПР на базе некоторой среды, позволяющей создавать, отлаживать и запускать на выполнение подпрограммы, реализующие определенные проектные операции. В этом случае дополнительные функции реализуются посредством внедрения в данную среду дополнительных компонентов, выполняющих данные функции с использованием заданного набора параметров.

В качестве базовой среды для создания подсистем САПР АД была выбрана программа Microsoft Excel, имеющая встроенный язык программирования Visual Basic [2]. С использованием Visual Basic становится возможным подключение к Excel внешних библиотек, а так же других программных продуктов. На базе Microsoft Excel создавалась подсистема поверочного расчета САПР АД.

В качестве модели, лежащей в основе подсистемы поверочного расчета, была выбрана комбинированная динамическая модель, использующая результаты расчета магнитного поля методом конечных элементов совместно с расчетом электрической цепи. Несомненным преимуществом таких моделей является возможность учета любых особенностей конструкции исследуемого устройства, эффекта вытеснения тока, полей рассеяния и т.д.

Для расчета магнитного поля в модели используется библиотека конечно-элементного расчета магнитного поля МКЕ, являющаяся собственной разработкой ИГЭУ [1]. Использование собственной библиотеки позволяет отказаться от приобретения дорогостоящих программных продуктов для расчета поля. Кроме того, код библиотеки является открытым, что позволяет вносить в него изменения, необходимые для решения конкретной задачи, а так же использовать его для создания расширенных вариантов библиотеки. Точность расчета магнитного поля с использованием библиотеки не уступает точности расчета в распространенных системах конечно-элементного моделирования магнитного поля (EiCut, Maxwell).

Для хранения модели библиотека расчета магнитного поля использует собственный формат mke. Несмотря на то, что в библиотеку заложены средства для построения моделей в терминах mke, при создании подсистемы поверочного расчета возникла потребность в облегчении создания моделей для конечного пользователя. С этой целью в библиотеку конечно-элементного моделирования заложены средства для создания параметрических генераторов требуемых устройств. При работе над моделью асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с использованием этих средств был создан параметрический генератор конечно-элементных моделей асинхронных машин стандартной конструкции малой и средней мощности.

СИСТЕМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ					
Параметры статора и ротора			Материалы		
Имя	Знач.	Описание	Элемент конструкции		
Da =	0,191	Наружный диаметр статора	Статор	2013	
Z1 =	54	Число пазов статора	Ротор	2013	
D1 =	0,1318	Внутренний диаметр статора	Вал	Ст3	
Z2 =	51	Число пазов ротора			
delta =	0,0003	Воздушный зазор			
Тип паза статора	1				
Тип паза ротора	1				
Dv =	0,0439	Диаметр вала			
Тип крепления вала	1	1 - без шлица, 2 - со шлицом			
hshv =	0,0008	Высота шлица вала			
bshv =	0,0005	Ширина шлица вала			
Bvs =	0	Размер вертикального усечения			
Bvg =	0	Размер горизонтального усечения			
Триангулировать Вал	2	1 - Да, 2 - Нет			
Паз ротора разбивать на	7				
!!! Не разбивать паз ротора	1	1 - Разбивать, 2 - не разбивать			
Секции ротора на 1 паз	1	1 - Да, 2 - Нет			
kd	0,1	Расчетная длина машины			
Параметры пазов статора			Параметры пазов ротора		
1	Тrapeцидальный паз		1	Овальный паз	
Имя	Знач.	Описание	Имя	Знач.	Описание
hsh =	0,0005	Высота шлица	hsh =	0,0008	Высота шлица
bsh =	0,003	Ширина шлица	bsh =	0,0015	Ширина шлица
Hp =	0,0161	Высота паза	Hp =	0,0189	Высота паза
b2 =	0,0057	Ширина паза в широком месте	r1 =	0,0024	Радиус верхней окружности
b1 =	0,004	Ширина паза в узком месте	r2 =	0,0014	Радиус нижней окружности
beta =	0,785	Угол наклона стороны нижней трапеции			Шлица на роторе нет (1 - есть, 2 - нет)
alfa =	0,7850	Угол уклона трапецидального паза			

Рис 1. Входные параметры параметрического генератора

Параметрический генератор конечно-элементной модели представляет собой программный код, обращающийся к функциям внедренного в данную систему программирования компонента полевого моделирования для формирования и связывания объектов полевой модели в соответствии с заданным алгоритмом. На вход генератора подаются параметры магнитной системы устройства, полученные в ходе проектного расчета. На выходе формируется готовая конечно-элементная модель.

В используемой в подсистеме модели для расчета параметров АД на каждом шаге итераций необходимо решить систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 - u_3 = i_{s1} r_{s1} + \frac{d\Psi_1}{dt} + (i_{s1} + i_{s2}) r_{s3} - \frac{d\Psi_3}{dt} + (L_{\sigma s1} + L_{\sigma s3}) \cdot \frac{di_{s1}}{dt} + L_{\sigma s3} \cdot \frac{di_{s2}}{dt}, \\ u_2 - u_3 = i_{s2} r_{s2} + \frac{d\Psi_2}{dt} + (i_{s1} + i_{s2}) r_{s3} - \frac{d\Psi_3}{dt} + (L_{\sigma s2} + L_{\sigma s3}) \cdot \frac{di_{s2}}{dt} + L_{\sigma s3} \cdot \frac{di_{s1}}{dt}, \\ 0 = \left( -i_{RZ_i} r_{R1i} + i_{R1i} \cdot Rr_{ji} - i_{R2i} r_{R2i} + (L_{\sigma R1i} + L'_{\sigma R1i}) \cdot \frac{di_{R1i}}{dt} + \frac{d\Psi_{1i}}{dt} \right) \Big|_{i=1..ns}, \\ 0 = \left( \left( -i_{Rj-i} r_{Rj-i} + i_{Rji} \cdot Rr_{ji} - i_{R(j+1)i} r_{R(j+1)i} + (L_{\sigma Rji} + L'_{\sigma Rji}) \cdot \frac{di_{Rji}}{dt} + \frac{d\Psi_{ji}}{dt} \right) \Big|_{i=1..ns} \right) \Big|_{j=2..Z_2-1}, \\ 0 = \left( -i_{R(Z_2-1)i} r_{RZ_2i} + i_{R1i} \cdot Rr_{ji} - i_{R1i} r_{R1i} + (L_{\sigma RZ_2i} + L'_{\sigma RZ_2i}) \cdot \frac{di_{RZ_2i}}{dt} + \frac{d\Psi_{Z_2i}}{dt} \right) \Big|_{i=1..ns}, \\ \frac{d\alpha}{dt} = \Omega, \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{M - M_H - M_0}{J}. \end{array} \right.$$

В этой системе:

$$\frac{d\Psi_m}{dt} = \sum_{j=1}^{3+Z_2 \cdot ns} \frac{\partial \Psi_m}{\partial i_j} \cdot \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^{3+Z_2 \cdot ns} L_{mj} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt}.$$

Элементы  $\frac{\partial \Psi_m}{\partial i}$  и  $\frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha}$  находятся с использованием расчета магнит-

ного поля с учетом допущения о том, что  $\frac{\partial \Psi_m}{\partial x} \approx \frac{\Delta \Psi_m}{\Delta x}$ . Видно, что для реализации модели необходимо наличия модуля с возможностью решения системы линейных уравнений и выполнения подключаемых процедур библиотеки МКЕ. В качестве такого модуля была выбрана система MatLab. Эта система позволяет выполнять подключение внешних библиотек. Кроме того, MatLab может быть вызван из Microsoft Excel. Таким образом, для работы с подсистемой от пользо-

вателя не требуется знания MatLab, поскольку Excel самостоятельно вызывает все необходимые процедуры.

Несмотря на простоту использования MatLab в подсистеме, данная программа является весьма дорогостоящей. Поэтому в следующей версии системы весь функционал модели, реализованный в MatLab, планируется перенести в Visual Basic.

Все результаты расчета заносятся в отдельный лист Excel. Эта программа имеет широкие возможности для обработки данных. Это позволяет представить данные в любом удобном пользователю виде.

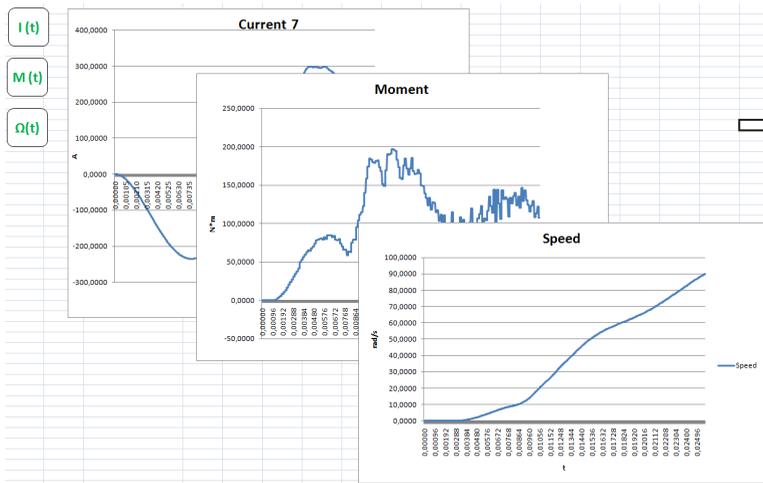


Рис. 2. Вывод результатов в среде Excel

Данные, полученные с использованием подсистемы, сравнивались с данными, полученными в системе Maxwell, а так же опытным путем. Сравнение показало, что система отвечает требованиям по точности расчета.

#### Библиографический список

1. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им.В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 80 с.
2. Слепцова Л.Д. Программирование на VBA в Microsoft Office — М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2010. — 432 с.

*И.А. Трофимович, асп.;*  
*рук. А.И. Тихонов д.т.н., проф.*  
*ИГЭУ, г. Иваново*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТРАНСФОРМАТОРОСТОЕНИИ**

Качество системы изоляции во многом определяют надежность работы трансформатора. В настоящее время появились новые изоляционные материалы, позволяющие существенно продлить срок службы трансформатора. Рассмотрим некоторые виды изоляционных материалов, используемых в современном трансформаторостроении и требования, предъявляемые к этим материалам.

**Электроизоляционный картон (ГОСТ 4194-88).** Электроизоляционный картон вырабатывается из сульфатной целлюлозы цвета натурального волокна. Поверхность картона должна быть гладкой, чистой, без коробления, без сдиров элементарного слоя и вмятин, а также без видимых невооруженным глазом отверстий и токопроводящих включений. Картон при штамповке и резке на ножницах гильотинного типа не должен расслаиваться.

Применяются следующие марки картона:

- 1) картон марки А – ластичный, гибкий, с высокой стойкостью к действию поверхностных разрядов в масле, высокой электрической прочностью на пробой по толщине;
- 2) картон марки АМ – то же что и А, но с лучшими электромеханическими характеристиками;
- 3) картон марки Б – средней плотности с повышенными электрическими свойствами;
- 4) картон марки В – повышенной плотности твердый с малой сжимаемостью под давлением, высокой электрической прочностью перпендикулярно слоям.

Из многообразия изоляционных деталей, изготавливаемых из электрокартона, можно выделить:

1. Дистанционные прокладки, служащие для создания горизонтальных каналов между витками и катушками, представляющие опорную поверхность, через которую передаются все осевые усилия, воздействующие на обмотку. Они несут большую механическую нагрузку, особенно при коротком замыкании. Для предупреждения усадки в процессе эксплуатации их изготавливают из

твердого малоусадочного картона марки В и дополнительно обрабатывают большим давлением при сушке обмотки.

2. Рейки обмоточные, служащие для крепления столбов дистанционных прокладок и образующие осевые каналы вдоль наружной и внутренней поверхности обмотки. Они располагаются равномерно по окружности обмотки и изготавливаются из картона марки Б.

3. Из клееного картона марки Б изготавливают опорные кольца, которые обычно устанавливаются на обоих концах обмотки, а также сегменты, служащие для связи высоких наборов столбов прокладок;

4. В месте выхода концов обмотки устанавливаются секторы из картона марки Б.

5. Специальные прокладки из картона марки Б устанавливают в местах внутренних переходов непрерывных и переплетенных обмоток;

6. В обмотках класса напряжения 500 кВ и выше часто для повышения электрической прочности межкатушечной изоляции применяются формованные угловые шайбы из картона марки АМ.

7. Для создания осевых охлаждающих каналов внутри катушек применяют полосы из картона марки Б.

**Изоляционные бумаги (ГОСТ 30180-99).** Электрические изоляционные бумаги изготавливают из сульфатной целлюлозы. Наибольшее применение получили кабельная, телефонная и крепированная бумаги, обладающие сравнительно высокими механическими качествами и воздухопроницаемостью, но малой нагревостойкостью и низкой электрической прочностью. Пропитка бумаги маслом, лаком значительно повышает ее электрическую прочность и нагревостойкость. Кабельная бумага применяется в качестве изоляции обмоточных проводов, между слоями обмоток, концов обмоток и отводов. Крепированная бумага обладает хорошей эластичностью и служит для изолирования концов обмоток и отводов.

**Электротехнический листовой стеклотекстолит (ГОСТ 12652-74.).** Стеклотекстолит электротехнический листовой представляет собой слоистый прессованный материал, состоящий из двух и более слоев ткани из стеклянного волокна, пропитанной термореактивной смолой. В трансформаторостроении в зависимости от свойств, преимущественного назначения и допустимых длительных рабочих температур применяется стеклотекстолит толщиной 0,5-30 мм марок СТ и СТЭФ, допускающий длительную рабочую температуру до +130° С, и марки СТК, допускающей длительную рабочую температуру до +180° С. Стеклотекстолит допускает механическую обработку: обточку,

фрезерование (распиловку) и сверление без образования трещин и сколов.

**Бук.** Бук – дерево лиственной породы, обладает высокими механическими характеристиками и хорошо обрабатывается. Объемная масса бука 0,65-0,7 кг/дм<sup>3</sup>. Бук меньше всех других пород дерева повышает кислотность трансформаторного масла. В трансформаторостроении бук применяют в качестве конструкционного материала. Влажность бука доводят до 10% сушкой в сушильных камерах (паровая сушка) или сушкой с нагревом в поле переменного тока высокой частоты. Электрические свойства бука улучшают пропиткой деталей в трансформаторном масле (для масляных трансформаторов).

**Трансформаторное масло.** Трансформаторное масло – это жидкий электроизоляционный материал, получаемый путем ступенчатой перегонки нефти. Масло должно обладать высокой электрической прочностью, в нем не должно быть влаги и механических примесей, оно должно иметь малую вязкость. Основные характеристики свежего масла приведены в ГОСТ-982-80 и МЭК-60296-1982 г.

Масла разных изготовителей (разных марок) допускают смешивание в любой пропорции. Для повышения стабильности масла в него добавляют антиокислительные добавки – ингибиторы.

Физические характеристики трансформаторного масла:

- **Вязкость масла.** Динамическая вязкость определяется сопротивлением жидкости в потоке и равна отношению удельного давления к удельному ускорению. Кинематическая вязкость, нормируемая для масла, есть отношение динамической вязкости жидкости к ее удельному весу. Обычно вязкость увеличивается с увеличением размеров молекул и молекулярного веса. С ростом температуры вязкость уменьшается. В стандартах приведены значений кинематической вязкости при разных температурах. Это позволяет правильно рассчитывать циркуляцию масла в трансформаторе и разработать правила выбора места и размеров охлаждающих каналов.

- **Температура застывания** – температура, при которой жидкость перестает перемещаться. Этот показатель является мерой текучести при низкой температуре.

- **Температурные вспышки в закрытом тигле** – температура при которой пары над поверхностью нагретой жидкости при наличии воздуха могут быть воспламенены. Температура вспышки зависит от давления наиболее летучих горючих составляющих смеси газов. Для обычных товарных масел она колеблется в пределах 130-170°C. Согласно ГОСТ 6356-75 она должна быть не ниже 125°C. Для

арктического масла – в пределах от 90 до 115 °С и зависит от фракционного состава, наличия относительно низкокипящих фракций и в меньшей степени от химического состава.

- В отношении пожарной безопасности большую роль играет *температура самовоспламенения*; это температура, при которой масло при наличии воздуха загорается самопроизвольно без подведения пламени. У трансформаторных масел эта температура около 350-400 °С.

- *Цвет* свежего масла обычно свидетельствует о чистоте очистки. Для масла в эксплуатации высокий или увеличивающийся цветовой показатель свидетельствует о загрязнении или о старении масла.

- *Поверхностное натяжение* – это сила на единицу длины, требуемая, чтобы разорвать масляную пленку, существующую на границе раздела масла и воды. При загрязнении масла мылами, краской и продуктами окисления масла, прочность пленки уменьшается. Уменьшение поверхностного натяжения масла в эксплуатации свидетельствует о загрязнении масла и об окислении масла.

- *Электрическая прочность масла* является одним из основных параметров, характеризующих качество трансформаторного масла. Пробивное напряжение прямо не связано с удельной проводимостью, но, так же как и она, весьма чувствительно к его загрязнению. При изменении влажности масла и наличии в нем примесей, резко уменьшается электрическая прочность. Повышение прочности с повышением температуры от 0 до 70 °С связывают с переходом влаги из эмульсионного состояния в растворенное и уменьшением вязкости масла. Растворенные газы играют большую роль в процесс пробоя.

Трансформаторное масло, поступающее на предприятия, тщательно сушат в специальных установках и многократно фильтруют. Перед заливкой контролируют величину пробивного напряжения.

**Эпоксидная смола.** Эпоксидная смола нашла свое применение в сухих трансформаторах ТСЛ. Смолы характеризуются высокой адгезией к металлам, стеклу, бетону и другим материалам, механической прочностью, водо- и химической стойкостью, хорошими диэлектрическими показателями. В качестве отвердителей используются полиамины, многоосновные кислоты и их ангидриды, многоатомные фенолы, третичные амины. Отличительная особенность эпоксидных смол при отверждении – отсутствие выделения летучих веществ и малая усадка.

Эпоксидно-диановые литьевые компаунды применяются с наполнителями, улучшающими пожаробезопасность и снижающими себе-

стоимость продукции. Основное применение компаунды получили в производстве электротехнической продукции: измерительных и силовых трансформаторов, изоляторов, пропитки для якорей и катушек специальных электрических машин. Герметическая или литая изоляция хорошо цементирует витки обмотки, обеспечивая высокие механическую и электрическую прочности, влагостойкость, малые термические коэффициенты расширения и теплопроводности. Слабым местом эпоксиднодиановых компаундов является плохая устойчивость ультрафиолетовому излучению. Поэтому такие компаунды не применяются для оборудования наружного исполнения.

*Л.Д. Мартынов, студ.;*  
*рук. В.П. Шишкин к.т.н. профессор*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ПРИВОДА ТРОЛЛЕЙБУСОВ**

В настоящее время актуальной проблемой является энергоэффективность городского электротранспорта. По сравнению с тяговыми двигателями постоянного тока (ДПТ), тяговый асинхронный двигатель (ТАД) потребляет на 25% меньше электроэнергии, что существенно экономит затраты, связанные с обслуживанием городского электротранспорта.

Отсутствие щеточно-коллекторного узла и явно выраженных полюсов делает асинхронный двигатель более надежным и позволяет уменьшить его масса-габаритные показатели. АД прост в обслуживании и эксплуатации.

К недостаткам АД можно отнести сложность в регулировании скорости вращения. Тяговый двигатель в транспортных средствах питается от силового преобразователя, выходную частоту которого (по первой гармонике) можно устанавливать произвольно (в пределах, определяемых силовым преобразователем, обычно до 500 Гц и даже выше).

ТАД эксплуатируется в тяжелых условиях (постоянные пуски и остановки, колебания температуры окружающей среды от -45 до +40). Для ТАД характерны высокие моменты на валу, что предполагает использование лопаточных пазов на роторе с беличьей клеткой.

Для проектирование ТАД авторы обратились к интегрированной системе проектирования трехфазных АД с КЗ ротором. Это универсальная программа для проектирования АД, разработанная совместно «Sprut technology» и ОАО «НИПТИЭМ».

В данной системе проектирования были проведены электромагнитный, тепловой и экономический расчеты и получены варианты АД со следующими номинальными данными:  $P_{ном} = 180$  кВт, КПД = 94%,  $\cos\varphi = 0,91$ ,  $K_m = 3,5$ ,  $K_p = 1,8$ .

В ходе исследования изменялись параметры асинхронных машин:

- длина активной части машины;
- материал стержней беличьей клетки;
- тип обмотки;
- габарит (высота оси вращения).

Для выбора оптимального варианта, из полученных в ходе проектирования ТАД, рассчитывался технико-экономический показатель (ТЭ) для каждого из них. Для этого необходимо задаться коэффициентом значимости выходных показателей, что и было сделано с помощью экспертов.

В таблице 1. представлены выходные параметры и их коэффициенты значимости.

**Табл. 1. Коэффициенты значимости выходных параметров**

Выходные параметры ТАД	КПД	$\cos\varphi$	$K_p$	$K_m$	Превышение температуры $\Delta t$	Объем активного ядра $V_a$	Стоимость активных материалов $P_a$
Коэффициенты значимости, $\alpha_n$	0,18	0,05	0,1	0,18	0,18	0,14	0,17

В сумме коэффициенты значимости всех показателей дают единицу.

КПД, коэффициент мощности и моменты расчетной машины стоят в числителе, так как их надо делать выше, а температура, объем и стоимость в знаменателе, так как их пытаются минимизировать.

Данные, полученные в ходе проектирования АД с разными параметрами, были сведены в таблицу (табл. 2).

### **Выводы:**

Для получения хороших выходных данных приходится увеличивать длину машины.

Если жестко придерживаться требований по номинальным показателям, приходится заменять алюминиевые стержни на медные. Это приводит к увеличению энергетических показателей (КПД и коэффициента мощности) и уменьшает перегрев машины, но так же увеличивает затраты на активные материалы.

**Таблица. 2. Результаты исследований**

	КПД, %	cos,φ	Мп	Ммах	Превышение темпера- туры, град	Объем актив- ного ядра, дм <sup>3</sup>	Стои- мость актив- ных мате- риалов, руб	ТЭ
Коэффи- циент зна- чимости	0,18	0,05	0,1	0,18	0,18	0,14	0,17	
TRB_D25 0_L350_A L	93,9	0,91 7	2,08	3,46	160,0	66	32438	0,89
TRB_D25 0_L400_A L	94,6	0,90 7	2,59	4,25	125,5	76	36767	0,94
TRB_D25 0_L350_C U	94,7	0,91 8	1,83	3,60	134,5	66	46339	0,85
TRB_D25 0_L400_C U	94,9	0,91 4	2,19	4,47	118,6	76	47775	0,90
TRB_D25 0_L350_A L_6	94,4	0,92 5	2,10	4,28	92,2	66	32646	1
TRB_D28 0_L350_A L	94,7	0,94 2	2,11	3,87	87,4	84	43198	0,92
TRB_D28 0_L360_A L	94,3	0,94 5	2,02	3,71	97,1	86	40408	0,90
TRB_D28 0_L305_A L	94,5	0,91 6	2,24	4,17	101,8	73	35622	0,96
TRB_D25 0_L400_A L_1s	94,6	0,90 4	2,16	3,91	126,4	76	36767	0,90
TRB_D25 0_L400_A L_1s	95	0,91 0	1,82	4,14	115,5	76	48428	0,87

Двухслойную обмотку статора, заменяют на однослойную. Это приводит к ухудшению выходных величин, но существенно упрощает схему обмотки и процесс ее укладки в пазы.

При увеличении габарита машины (высоты оси вращения), технико-экономический показатель много лучше, чем у 250 габарита с медными стержнями. Но за неимением места, предназначенного для ТАД в троллейбусе, вынуждены выбрать 250 габарит.

Из спроектированных электродвигателей оптимальным является ТАД с высотой оси вращения 250 мм длиной 400 мм с медными стержнями БК и однослойной обмоткой на статоре.

В работе представлена программа «EnergyOptim», позволяющая определять оптимальный состав и оптимальные режимы работы оборудования с учетом всех перечисленных факторов и формировать соответствующие режимные карты. Система управления должна реализовывать оптимальный алгоритм управления энергетическим комплексом, в т.ч. при случайных отклонениях внешних параметров от заданных стандартных (типичных) графиков.

Модель энергокомплекса формируется пользователем в процессе работы с программой из моделей отдельных элементов. Каждый элемент комплекса является либо источником, либо потребителем хотя бы одного вида энергии (тепловой или электрической), причем основное условие – соблюдение баланса потребляемой и произведенной энергии. Если комплекс подключен к внешним энергетическим сетям, такие сети формально также считаются элементами комплекса, производящими энергию. Аккумуляторы (вне зависимости от вида аккумулируемой энергии) во время зарядки являются потребителями, а во время разрядки – производителями энергии.

Модель энергетического комплекса может быть представлена в виде уравнений баланса тепловой и электрической энергии в каждый момент времени [3]:

$$\sum_{i=1}^n W_i(t, \vec{\eta}_i) = 0;$$
$$\sum_{i=1}^n N_i(t, \vec{\xi}_i) = 0,$$
(1)

где  $n$  – количество элементов энергокомплекса;  $W_i$  и  $N_i$  – потоки (мощность) тепловой и электрической энергии для  $i$ -го элемента в момент времени  $t$ , причем для потребителей энергии значение потока берется

со знаком "-", а для производителей – со знаком "+";  $\vec{\eta}_i$  и  $\vec{\xi}_i$  – векторы переменных, от которых зависят тепловые и электрические потоки  $i$ -го элемента в момент времени  $t$  (например, это могут быть зависимости КПД от мощности, различные функции тепло- и электропотерь, метеорологические и климатические внешние условия и т.п.). Для генерирующих установок

Система уравнений (1) дополняется ограничениями на величины тепловых и электрических потоков, соответствующими постановке задачи (предельные величины мощности, отбираемой от внешней сети, предельные величины мощности элементов энергокомплекса), и дополнительными соотношениями, определяющими динамические характеристики элементов энергокомплекса (математические модели элементов) [3]. В системе уравнений переменными являются потоки энергии  $W_i$ ,  $N_i$  генерирующих установок. Учитывая большую размерность задачи, для реализации оптимизационных процедур используется симплекс-метод. Оптимальным является решение, при котором достигается минимальное значение целевой функции. В качестве целевой функции могут быть выбраны финансовые затраты на энергоснабжение, количество сжигаемого топлива или объем выбросов вредных веществ. В общем виде целевая функция записывается следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^n W_i \cdot f_i^W(t, k_i^W, \vec{\eta}_i) + \sum_{i=1}^n N_i \cdot f_i^N(t, k_i^N, \vec{\xi}_i), \quad (2)$$

где  $f_i^W$ ,  $f_i^N$  – коэффициенты целевой функции (удельные стоимости тепловой и электрической энергии в зависимости от загрузки установки и других параметров в момент времени  $t$ ).

Математическая модель реализована в программных кодах в среде программирования Delphi 6. Программа снабжена графическим интерфейсом, что делает ее удобной для пользователя. Структура исходных данных представлена на рис. 1.

Особенностью программы является возможность формирования энергокомплекса нужной конфигурации пользователем из отдельных элементов. В процессе работы пользователь выбирает из базы данных требуемые элементы, определяет их параметры и связи между ними.

Пример спроектированного в программе энергокомплекса показан на рис. 2.



Рис. 1. Структура данных

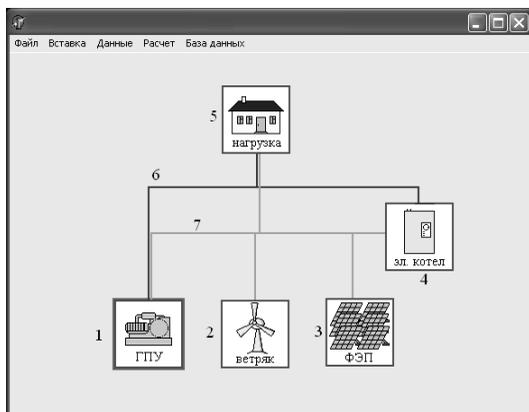


Рис. 2. Энергокомплекс, спроектированный с помощью программы «EnergyOpt»: 1 – газопоршневая установка, 2 – ветроэнергетическая установка, 3 – фотоэлектрический преобразователь, 4 – электродкотел, 5 – потребитель, 6 – тепловые связи, 7 – электрические связи

Программный комплекс «EnergyOptim» тестировался на стендовом макете энергетического комплекса в составе двух газопоршневых установок, аккумулятора тепловой энергии, имитаторов тепловой и электрической нагрузки при подключении к внешней электрической сети.

#### Библиографический список

1. **Фортов В.Е.**, Макаров А.А. Направления инновационного развития энергетики мира и России // УФН. 2009. Т. 179. № 12. –с. 1337-1353.
2. [http://www.e-apbe.ru/distributed\\_energy/memo\\_TP\\_SDE.php](http://www.e-apbe.ru/distributed_energy/memo_TP_SDE.php).
3. **Директор Л.Б.**, Майков И.Л., Иванин О.А. Задача оптимизации автономных энергетических комплексов в составе локальных распределительных сетей // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. №4. с. 33-41. ISSN 0235-3482.

*И.А. Пайков, маг.;*  
*рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для проектирования силовых трансформаторов и последующего внедрения в производство требуется разработка новых математических моделей, позволяющих проводить исследования протекания физических процессов в различных режимах. Поэтому задача разработки уточненных моделей динамических режимов работы трансформатора является актуальной.

В современных САПР широко используются системы инженерных расчетов (CAE-системы), которые позволяют моделировать физические процессы в технических устройствах на основе точных численных методов расчета физических полей и цепей, в частности, динамические режимы работы трансформатора. Однако эти системы очень сложны в использовании и не доступны малому и среднему бизнесу.

Динамическая модель трансформатора, разработанная в ИГЭУ, представляет собой систему дифференциальных уравнений, которая для схемы соединения обмоток Y/Y имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{12} = i_1 r_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} - i_2 r_2 - \frac{d\Psi_2}{dt}, \\ u_{23} = i_2 r_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} - i_3 r_3 - \frac{d\Psi_3}{dt}, \\ 0 = i_4 (r_4 + R_{н4}) + \frac{d\Psi_4}{dt} + L_{н4} \frac{di_4}{dt} - i_5 (r_5 + R_{н5}) - \frac{d\Psi_5}{dt} - L_{н5} \frac{di_5}{dt}, \\ 0 = i_5 (r_5 + R_{н5}) + \frac{d\Psi_5}{dt} + L_{н5} \frac{di_5}{dt} - i_6 (r_6 + R_{н6}) - \frac{d\Psi_6}{dt} - L_{н6} \frac{di_6}{dt}, \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0, \\ i_4 + i_5 + i_6 = 0; \end{array} \right. \quad (1)$$

здесь  $u_{jk}$  – линейное напряжение между фазами с индексами  $k$  и  $j$ ;  $i$  – ток обмотки;  $\Psi$  – потокосцепление обмотки;  $r$  – сопротивление обмотки;  $R_n$  и  $L_n$  – активное и индуктивное сопротивления нагрузки; обмотки с индексами 1, 2, 3 являются обмотками ВН, а обмотки с индексами 4, 5, 6 – обмотками НН.

Расчет динамических режимов трехфазного трансформатора осуществляется при наличии матриц потокосцеплений каждой  $m$ -й обмотки

$$\Psi_m = f(F_1, F_2, F_3), \quad (2)$$

где  $F_1, F_2$  и  $F_3$  – намагничивающие силы стержней трансформатора.

Принимаем, что первичная и вторичная обмотки, расположенные на  $k$ -м стержне, создают единую намагничивающую силу

$$F_k = \frac{i_k W_k + i_{k+3} W_{k+3}}{S_k + S_{k+3}} \cdot (S_k + S_{k+3}) = j_k \cdot (S_k + S_{k+3}), \quad (3)$$

где  $j_k$  – средняя плотность тока в обмотках  $k$ -го стержня;  $i_k, i_{k+3}$  – токи в первичной и вторичной обмотках  $k$ -го стержня;  $W_k, W_{k+3}$  – число витков первичной и вторичной обмоток  $k$ -го стержня;  $S_k, S_{k+3}$  – площади сечений первичной и вторичной обмоток  $k$ -го стержня.

Варьируя  $j_k$  в пределах от  $-j_{\max}$  до  $+j_{\max}$ , где  $j_{\max}$  – некоторая максимальная величина средней плотности тока, в ходе серии конечно-элементных расчетов магнитного поля получаем зависимости (2), которые аппроксимируются трехмерными сплайнами.

После разложения для каждой  $m$ -й обмотки

$$\frac{d\Psi_m}{dt} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial \Psi_m}{\partial F_k} \frac{dF_k}{dt} = \sum_{j=1}^6 L_{mj} \frac{di_j}{dt}, \quad (4)$$

система уравнений (1) принимает вид

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{U}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{i}$  – вектор токов;  $\mathbf{L}$  – квадратная матрица индуктивностей;  $\mathbf{U}$  – вектор правых частей. Частные производные  $\partial\Psi_m / \partial F_k$  в (4) определяются по сплайнам.

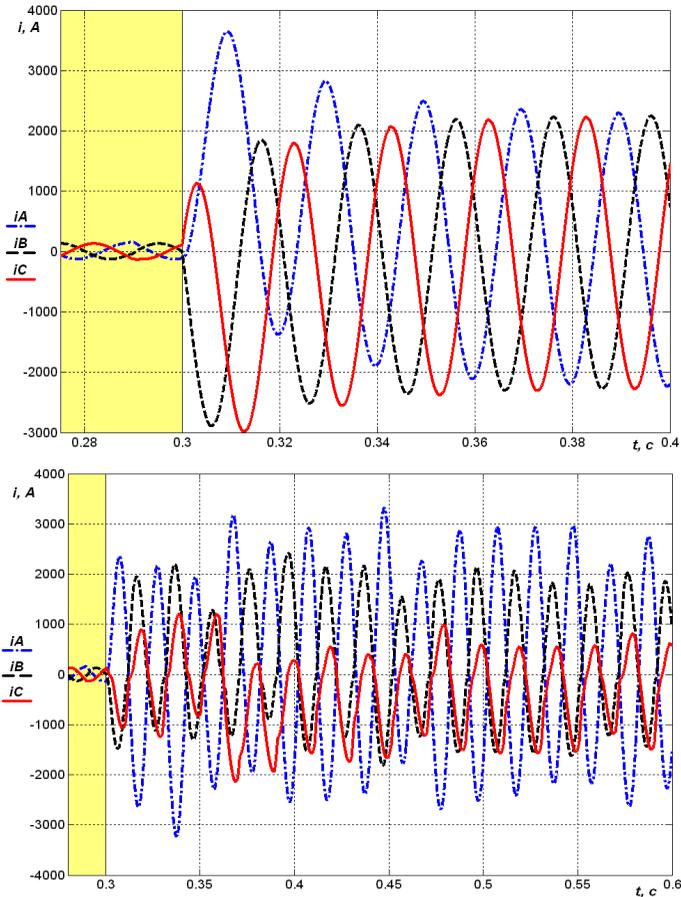


Рис. 1. Результаты расчета трехфазного короткого замыкания и виткового короткого замыкания силового трансформатора ТМ-1600/10

На каждом шаге интегрирования системы уравнений (5) по (3) определяются НС стержней в данный момент времени, затем частные производные потокоцеплений обмоток по НС стержней, затем коэффициенты матрицы **L**. Полученная модель позволяет производить расчет динамических процессов трансформатора с учетом нелинейности магнитных характеристик стали, особенностей конструкции трансформатора и несимметрии нагрузки.

Методика, приведенная выше, может быть модифицирована на любое количество токопроводящих контуров, что позволяет рассчитать режим виткового короткого замыкания. При этом короткозамкнутый виток является седьмым контуром трансформатора.

На рис. 1 приведены кривые расчета трехфазного короткого замыкания и виткового замыкания трансформатора ТМ-1600/10.

#### **Библиографический список**

1. **Тихонов А.И., Лапин А.Н.** Проектирование силовых трансформаторов: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 160 с.

2. **Климов Д.А., Попов Г.В., Тихонов А.И.** Методы автоматизированного моделирования динамических режимов трансформаторов / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2006. – 100 с.

*С.Г. Романов, студ.;*  
*рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Цель работы состоит в повышении эффективности проектирования силовых трансформаторов путем их оптимизации с использованием современных методов поиска оптимального решения.

Развитие экономики РФ сопровождается ростом потребляемых мощностей, что приводит к необходимости увеличения производства силовых трансформаторов, суммарная мощность которых в 5-6 раз превышает генераторную мощность. Поэтому актуальной является проблема повышения надежности и экономичности эксплуатации силового трансформатора. Решение данной проблемы требует наличия программных средств, позволяющих создавать САПР силовых транс-

форматоров, одной из главных подсистем которых является подсистема оптимизации. Методика расчета, заложенная в разрабатываемую подсистему оптимизации трансформатора, представлена в [1].

Процесс проектирования трансформатора можно представить итерационной блок-схемой рис. 1. На этапах выбора главных размеров и проектного расчета работа обычно ведется в интерактивном режиме. Поверочный расчет выполняется в пакетном режиме. Это делается в первую очередь для того, чтобы обеспечить возможность использования подсистемы поверочного расчета в алгоритмах поиска оптимального решения, работающих без человеческого вмешательства.

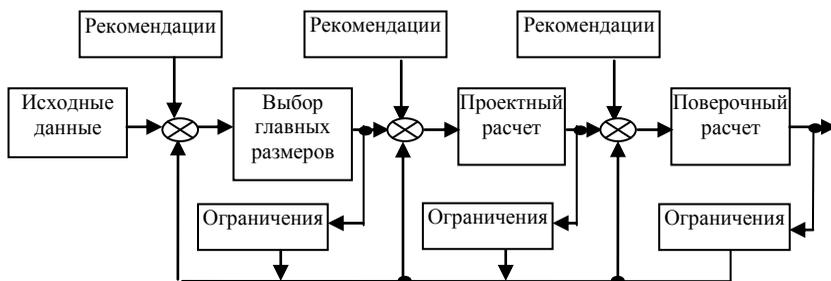


Рис. 1. Итерационная схема процесса проектирования

Если на этапе поверочного расчета требуется обеспечить выбор справочных величин, то необходимо автоматизировать данный процесс. Например, при расчете холостого хода выбор удельных потерь в стали и удельной намагничивающей мощности осуществляется по сплайнам, аппроксимирующим таблицы, приведенные в справочной литературе. Для выбора из таблиц дискретных величин пишется специальный программный код.

Таким образом, математическую модель, заложенную в подсистему поверочного расчета (ППР) можно представить в виде функции

$$Y = F(X), \quad (1)$$

где  $X$  – вектор аргументов;  $Y$  – вектор значений функции.

Условно данную модель можно изобразить в виде функционального звена с несколькими входами и несколькими выходами (рис. 2) [2]. Такая модель позволяет рассчитывать значения выходных величин при заданных значениях входных величин.

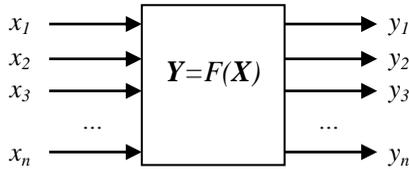


Рис. 2. Условное изображение математической модели ППР

Задача поиска решения состоит в расчете элементов вектора  $X$ , при которых элементы вектора  $Y$  принимают изначально заданные значения. В некоторых случаях такая задача может быть решена путем построения обратной модели

$$X = F^*(Y). \quad (2)$$

В случае поиска решения трансформатора, обратную модель в форме (2) построить не удается.

Чаще всего искомое решение определено не столько конкретными значениями некоторых характерных критериев, сколько требованием достижения ими экстремальных значений. Другими словами, одной из главных особенностей современного проектирования является требование оптимальности спроектированного устройства.

Задача оптимизации формулируется следующим образом [3]:

$$\text{задано: } F(X) \in \Phi \subset \mathfrak{R}^m \rightarrow \mathfrak{R};$$

$$\text{найти: } X^* \in \Omega \subset \mathfrak{R}^n, \text{ для которого } F(X^*) \leq F(X)$$

$$\text{для всех } F(X) \in \Phi \text{ при всех } X \in \Omega \subset \mathfrak{R}^n, \quad (3)$$

$$\text{то есть найти } \min_{X \in \Omega \subset \mathfrak{R}^n} F(X) \in \Phi \subset \mathfrak{R}^m \rightarrow \mathfrak{R}.$$

Здесь  $\mathfrak{R}^m$  –  $m$ -мерное пространство критериев оптимальности;  $F(X)$  – некоторая функция или система уравнений, однозначно определяемая  $m$  компонентами вектора критериев  $F(X)$ , отображающая множество аргументов  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , принадлежащее  $n$ -мерному пространству аргументов  $\mathfrak{R}^n$ , на множество, принадлежащее одномерному пространству критериев  $\mathfrak{R}$ , путем свертки

$$F(X) = \sum_{i=1}^m F_i(X) \cdot K_i, \quad (4)$$

где  $F_i(\mathbf{X})$  – критерии оптимальности;  $K_i$  – весовые коэффициенты, определяющие вклад  $i$ -го критерия в величину целевой функции  $F(\mathbf{X})$ .

В случае трансформатора в качестве критериев оптимальности  $F_i(\mathbf{X})$  могут выступать себестоимость изготовления трансформатора  $C$  и суммарные потери  $P$ . Весовые коэффициенты  $K_C$  и  $K_P$  выбираются на основании анализа множества Парето и опыта взаимодействия с покупателями.

Таким образом, задача оптимизации трансформатора сводится к поиску варианта, характеризующегося минимальной величиной приведенных затрат

$$Z(\mathbf{X}) = C(\mathbf{X}) \cdot K_C + P(\mathbf{X}) \cdot K_P \quad (5)$$

при условии выполнения функциональных ограничений, заданных системой неравенств

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{k \min} \leq u_k(\mathbf{X}) \leq u_{k \max} \\ P_k(\mathbf{X}) \leq P_{k \max} \\ i_0(\mathbf{X}) \leq i_{0 \max} \\ P_0(\mathbf{X}) \leq P_{0 \max} \\ T_i(\mathbf{X}) \leq T_{i \max} \end{array} \right. , \quad (6)$$

где  $u_k$ ,  $P_k$  – напряжение и потери короткого замыкания трансформатора;  $i_0$ ,  $P_0$  – ток и потери холостого хода;  $T_i$  – температура  $i$ -го узла трансформатора.

Учет функциональных ограничений производится с помощью штрафных коэффициентов

$$K_j = \begin{cases} 1 \forall |y_j(\mathbf{X}) - y_j^*| < 1 \\ 1 + |y_j(\mathbf{X}) - y_j^*| \cdot K_{y_j} \forall |y_j(\mathbf{X}) - y_j^*| \geq 1 \end{cases} , \quad (7)$$

увеличивающих значение целевой функции (4) при невыполнении условий (6), так что функция (4) принимает вид

$$F(\mathbf{X}) = \left( \sum_{i=1}^m F_i(\mathbf{X}) \cdot K_i \right) \cdot \prod_j^N K_j , \quad (8)$$

где  $y_j(\mathbf{X})$  – величина, рассчитываемая ППР (рис. 2), не являющаяся критерием оптимальности  $F_i(\mathbf{X})$ , для которых определено одно из неравенств системы (6);  $y_j^*$  – задаваемое техническим заданием или техническими условиями предельное значение величины  $y_j(\mathbf{X})$ ;  $K_{y_j}$  – весовой коэффициент, величина которого выбирается опытным путем;  $N$  – количество функциональных ограничений.

Список аргументов для решения задачи оптимизации трансформатора включает такие величины, как индукция в стержне, диаметр стержня, высота обмотки, плотности тока в обмотках, количество слоев обмоток, количество охлаждающих каналов в обмотках, ширина канала между обмотками НН и ВН, глубина гофр по малой и большой сторонам гофробака. Некоторые из этих величин  $x_i$  могут варьироваться произвольным образом в заданном диапазоне параметрических ограничений

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}. \quad (9)$$

Однако ряд величин может принимать только целочисленные значения, а именно: количество слоев и количество каналов в обмотках. Кроме того, несмотря на то, что величины плотностей тока в обмотках варьируются произвольным образом, в процедуре расчета значения целевой функции по ним выбираются обмоточные провода из заданного сортамента, что приводит по факту к дискретности данных варьируемых величин.

Дискретность целевой функции приводит к необходимости использовать специфические алгоритмы поиска оптимального решения. В частности, оказывается невозможным использование методов нелинейного программирования. Анализ показывает, что лучшие результаты получаются при использовании генетических алгоритмов. Для этого можно использовать либо функцию из библиотеки генетических алгоритмов пакета MatLab, либо разработанную в ИГЭУ функцию оптимизации с использованием генетических алгоритмов.

#### **Библиографический список**

1. **Тихонов А.И.**, Лапин А.Н. Проектирование силовых трансформаторов: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 160 с.
2. **Тихонов А.И.** Основы теории подобия и моделирования (электрические машины): Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 132 с.
3. **Дэннис Дж.**, Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 440 с.

*И.В. Еремин, асп.;*  
*рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ**

Главной проблемой, возникающей при оптимизации трансформаторов, является проблема дискретности целевой функции, что накладывает ограничения на использование для поиска оптимального решения методов нелинейного программирования, таких как метод покоординатного спуска, градиентный метод, методы переменной метрики. Эти методы очень эффективны, то есть позволяют найти экстремум заданной целевой функции при минимальном количестве пробных шагов. Однако они предъявляют определенные требования к виду целевой функции. Одним из определяющих требований является требование непрерывности целевой функции.

Для устранения данной проблемы приходится разрабатывать особую модель, из которой устраняется дискретность. Непрерывность такой модели делает ее более грубой по сравнению с традиционно используемой при проектировании трансформаторов дискретной инженерной моделью, так как в ней не учитываются факторы, приводящие к дискретности, в частности, дискретно заданный сортамент проводов, дискретность числа витков, слоев, охлаждающих каналов обмоток трансформатора, дискретность толщины ленты аморфной стали, а следовательно, ширины сердечника магнитопровода и т.п.

Еще одно требование, которое предъявляется к оптимизационной модели ввиду использования ее в алгоритмах оптимизации, – это требование полной автономности. То есть модель должна работать в пакетном режиме без участия проектировщика в принятии проектных решений.

Вектор варьируемых величин  $X$  включает в себя:

- индукцию в стержне  $B_c$ ;
- ширину стальной ленты  $b_c$ ;
- ширину стержня  $a_c$ ;
- высоту обмотки  $L$ ;
- ширину канала между ОВН и ОНН  $\delta_{k1}$  и  $\delta_{k2}$ ;
- глубину гофра бака  $b_g$ ;
- плотность тока ОВН  $J_2$ ;

- плотность тока ОНН  $J_1$ .

Главное отличие непрерывной модели трансформатора от подсистемы поверочного расчета состоит в том, что в ней присутствуют некоторые элементы подсистемы проектного расчета, приведенные к требованию непрерывности модели. В частности, перед вызовом подсистемы поверочного расчета осуществляется расчет следующих величин:

- 1) активное сечение стержня

$$S_c = b_c \cdot a_c \cdot k_z, \quad (1)$$

где  $k_z$  – коэффициент заполнения сталью;

- 2) магнитный поток

$$\Phi = B_c \cdot S_c; \quad (2)$$

- 3) высота стержня

$$L_c = L + 2L_0, \quad (3)$$

где  $L_0$  – расстояние от обмотки до ярма;

- 4) сечения витков обмоток НН и ВН

$$s_{p1} = \frac{I_1}{J_1}, \quad s_{p2} = \frac{I_2}{J_2}, \quad (4)$$

где  $I_1, I_2$  – фазные токи обмоток НН и ВН;

- 5) размеры проводника ОНН и диаметр проводника ОВН

$$b_{p1} = \sqrt{\frac{s_{p1}}{k_{s1} \cdot k_{pp}}}, \quad a_{p1} = b_{p1} \cdot k_{pp}, \quad d_{p2} = \sqrt{\frac{4s_{p2}}{\pi k_{s2}}}, \quad (5)$$

где  $k_{s1}, k_{s2}$  – коэффициент уменьшения площади сечения проводников;  $k_{pp}$  – коэффициент, определяющий пропорции прямоугольного проводника;

- 6) Размеры изолированных проводников

$$a_{p1iz} = a_{p1} + \delta_{izp1}, \quad b_{p1iz} = b_{p1} + \delta_{izp1}, \quad d_{p2iz} = d_{p2} + \delta_{izp2}, \quad (6)$$

где  $\delta_{izp1}, \delta_{izp2}$  – двусторонняя толщина изоляции проводников;

- 7) Коэффициент заполнения обмоток НН и ВН

$$k_{sw1} = \frac{s_{p1}}{b_{p1iz} \cdot (a_{p1iz} + \delta_{izs1})}, \quad k_{sw2} = \frac{s_{p2}}{b_{p2iz} \cdot (a_{p2iz} + \delta_{izs2})}, \quad (7)$$

где  $\delta_{izs1}, \delta_{izs2}$  – толщина межслоевой изоляции ОНН и ОВН;

- 8) Число витков обмоток НН и ВН

$$W_1 = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot \Phi}, \quad W_2 = \frac{1,05U_2}{4,44 \cdot f \cdot \Phi}, \quad (8)$$

где  $f$  – частота сети;

9) Радиальное сечение обмоток НН и ВН

$$S_{w1} = \frac{W_1 \cdot s_{p1}}{k_{Sw1}}, \quad S_{w2} = \frac{W_2 \cdot s_{p2}}{k_{Sw2}}, \quad (9)$$

10) Радиальный размер обмоток НН и ВН

$$a_1 = \frac{S_{w1}}{L_1} + \delta_{k1} \cdot N_{k1}, \quad a_2 = \frac{S_{w2}}{L_2} + \delta_{k2} \cdot N_{k2}, \quad (10)$$

где  $N_{k1}, N_{k2}$  – число охлаждающих каналов ОНН и ОВН.

Такая методика позволяет с достаточной точностью оценить размеры магнитной системы и обмоток. Главное ее достоинство состоит в том, что раскладка обмоток не приводит к дискретности целевой функции. После расчета этих величин вызывается процедура поверочного расчета. Данная процедура выполняется в пакетном режиме без участия человека. Методика поверочного расчета подробно описана в [1]. Она включает в себя расчет напряжения и потерь короткого замыкания, тока и потерь холостого хода, электродинамических усилий, возникающих в обмотках при трехфазном коротком замыкании, а также перегревы обмоток в номинальном режиме.

В качестве целевой функции удобно выбрать вес трансформатора  $G$ , который косвенно определяет его себестоимость.

В качестве функциональных ограничений принимаем (в квадратных скобках указаны предельные значения величин):

- напряжение короткого замыкания

$$(u_k(\mathbf{X}) - [u_k])^2 < \varepsilon, \quad (11)$$

$\varepsilon$  - допустимое отклонение значений;

- ток холостого хода

$$i_0(\mathbf{X}) < [i_0], \quad (12)$$

- потери короткого замыкания

$$P_k(\mathbf{X}) < [P_k]. \quad (13)$$

- потери холостого хода

$$P_0(\mathbf{X}) < [P_0]. \quad (14)$$

- перегревы обмоток НН и ВН

$$\Delta t_i(\mathbf{X}) < [\Delta t]. \quad (15)$$

Для поиска оптимального решения используется метод Дэвидона-Флетчера-Пауэлла. В пакете MatLab этот метод вызывается с помощью функции `fmincon`. Среди параметров этой функции можно указать параметрические и функциональные ограничения. Этот метод обеспечивает поиск только локальных экстремумов. Проверку на глобальный

экстремум нужно осуществлять особо. Для этого метод переменной метрики комбинируется со случайным поиском стартовой точки.

Блок схема оптимизационного процесса, учитывающая перечисленные особенности задачи, представлена на рис. 1. Поиск реализован в двух вложенных циклах. Внутренний цикл осуществляет поиск локального экстремума из выбранной стартовой точки. Выбор стартовой точки осуществляется во внешнем цикле. Максимальное количество шагов случайного поиска стартовой точки  $N_{сп, max}$  задается в техническом задании на оптимизацию. Обычно 10-30 шагов достаточно для уверенного нахождения глобального экстремума.

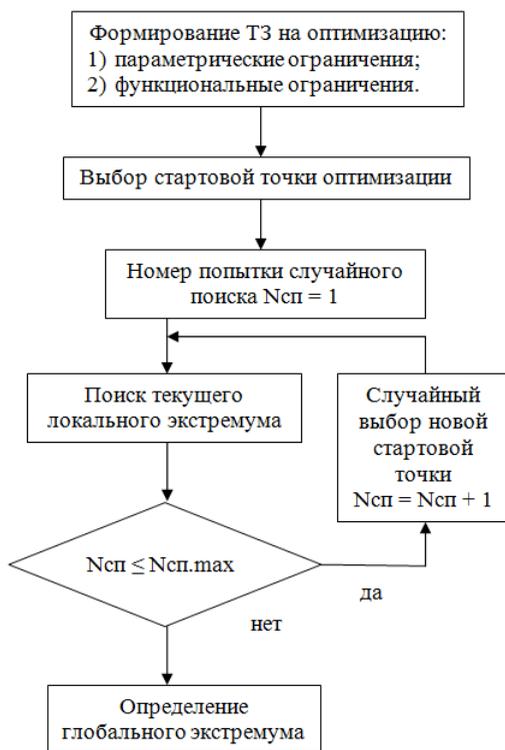


Рис. 1. Блок схема процесса оптимизации трансформатора

**Библиографический список**

1. **Тихонов А.И., Лапин А.Н.** Проектирование силовых трансформаторов: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 160 с.

**Секция 22. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ  
И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

Председатель – к.т.н., доцент **Терехов В.Г.**  
Секретарь – аспирант **Аполонский В.В.**

***Н.М. Воробьев, магистр(ENSMM)***  
***(г. Безансон, Франция)***

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ТЕРМОСТАТА  
В СТЕНДЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОГО ШУМА  
РЕЗОНАТОРА**

Фазовый шум - это один из важнейших критериев оценки частотной стабильности кварцевого резонатора. Частотная стабильность кварцевого резонатора, а также осциллятора, получаемого на его основе, является качественным показателем того, насколько точно данный резонатор может воспроизводить одну и ту же выходную частоту в заданном временном интервале.

Одно из направлений исследований Частотно-Временного департамента института FEMTO-ST (Безансон, Франция) является измерение фазового шума ультра стабильных кварцевых и LGT резонаторов. Специально для этой цели был разработан измерительный стенд, упрощённая схема которого, представлена на рис. 1 [1][2].

Результаты измерений зависят от множества факторов, таких как прецизионность измерительной аппаратуры, изолирование стенда от механических вибраций, а так же термостатирование измеряемых резонаторов. Всем хорошо известно, что частота колебания кварца в С

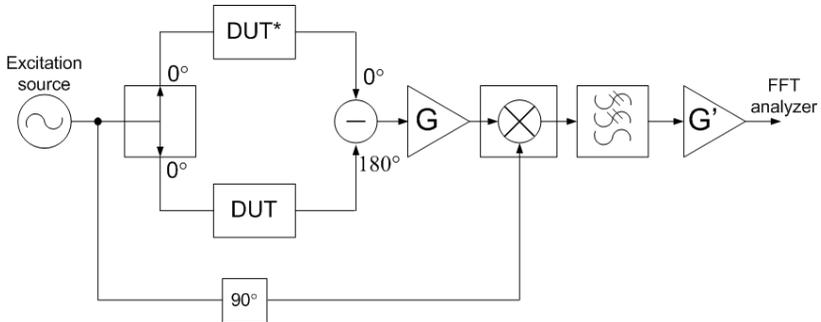


Рис. 1. Схема измерения фазового шума кварцевого резонатора с удалением несущей частоты (\*DUT :DeviceUnderTest)

моду (метрологический мод – продольное колебание) зависит от температуры. Частотно-температурная характеристика кварцевого резонатора в общем случае описывается полиномиальным уравнением 3 порядка. Получение наибольшей стабильности резонатора, возможно путем термостатирования в точке перегиба частотно-температурной характеристики. Ведущие производители ультра стабильных резонаторов, такие как RAKON, OSCILLOQUARTZ и ARelectronique выбирают такой угол среза кристалла кварца, чтобы два ближайших экстремума его частотно-температурной характеристики лежали в пределах  $-40 \dots -10$  и  $+65 \dots +90$  °C соответственно. На практике очень удобно применять второй экстремум, т.к. поддержание стабильности высокой температуры легче реализуемо, чем низкой. Специально для этих целей, в 2006 году, был разработан двойной термостат с аналоговым управлением. Стабильность данного термостата была измерена с помощью дисперсии Аллена осциллятора, работающего в В моде (режим термометра – поперечное колебание). При времени интегрирования в 1 секунду дисперсия Аллена имеет величину равную  $\sigma(y) = 3 \cdot 10^{-11}$  [3]. Главным недостатком такого термостата стала его непрактичность при поиске точки перегиба частотно-температурной характеристики резонатора. Каждый раз при смене температуры задания, необходимо перепаяивать сопротивления в цепи регулятора. Для автоматизация процесса настройки, была разработана аналого-цифровая версия двойного термостата.

В результате проделанной работы, аналоговые цепи регулятора термостата были модифицированы с целью получения большей точности поддержания температуры, а так же был добавлен цифро-аналоговый преобразователь, который позволяет дистанционно изме-

нять величину температуру задания. В результате калибровки модифицированного термостата, получились следующие характеристики:

- Минимальный шаг изменения температуры задания:  $0.017\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Диапазон изменения температуры внутренней печи:  $55\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Стабильность при времени интегрирования  $1\text{ с.}$ :  $\sigma(y)=10^{-11}$

Для связи термостата с управляющим компьютером, а так же связи термостат-пользователь было разработано микропроцессорное управляющее устройство с LCD дисплеем, клавиатурой и USB интерфейсом.

Главная программа поиска точки перегиба частотно-температурной характеристики резонатора была написана на языке Labview, что позволило значительно сократить время разработки. В качестве устройства, измеряющего частоту резонаторы, был выбран комбинированный анализатор Agilent 4395a настроенный на режим измерения полного импеданса. При выполнении программы поиска точки перегиба, данный прибор управляется по интерфейсу GPIB. В режиме измерения полного импеданса, Agilent 4395a имеет возможность одновременно измерять фазу и импеданс резонатора, поэтому для нахождения частоты резонанса, необходимо лишь найти первое пересечение графа фазы через 0.

Разработанные аппаратные и программные средства позволили облегчить процесс настройки термостата, под конкретный кварцевый резонатор, а так же позволили более точно измерять фазовый шум, за счет прецизионной настройки термостата на точку перегиба с точностью  $0.017\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Библиографический список

1. **Sthal F.** Banc avec suppression de porteuse. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., vol. 47, 369-373. 2000.
2. **Sthal F.**, About quartz crystal resonator noise: recent study. S. Galliou, J. Imbaud, X. Vacheret, P. Salzenstein, E. Rubiola, and G. Cibiel, in Proc. Int. Conf. Noise and Fluctuations, Pisa, Italy, Jun. 2007, pp. 607–610.
3. **Sthal F.** Thermal characterization of crystal ovens used in phase noise measurement system. F. Sthal, S. Galliou, P. Abbй, N. Franquet, X. Vacheret, P. Salzenstein, E. Rubiola, and G. Cibiel, in Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp., 2006, pp. 736–739.

*Д.Ю. Ануфриев, магистрант;  
рук. В.Г. Терехов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МНОГООСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ НА БАЗЕ ПЛКОМRON**

Контроллеры Omron применяются в различных областях автоматизации технологических процессов: позиционирование, радиочастотная идентификация, реализация высокоскоростного счета, регулирование температуры. В каждой из отраслей современные системы представлены в различных модификациях. Они могут быть автономными и созданными на базе ПЛК, сервоприводов или ПК. В настоящее время ПЛК Omron позволяют осуществлять единовременное управление несколькими (от двух до тридцати) осями перемещения.

Рассмотрим модернизированный многооперационный фрезерно-расточной станок 6M610Ф11. Он предназначен для черновой и чистовой обработки корпусных деталей из стали, чугуна и сплавов. На данном станке реализована система управления перемещением на базе ПЛК CJ1M. Благодаря разделению контроллера на ряд отдельных функциональных блоков значительно упрощается проектирование и настройка системы. Модули позиционирования поддерживают управление выходами, использующими последовательности импульсов. Они применяются в сочетании с сервоприводами, которые имеют входы, воспринимающие импульсный сигнал.

Станок имеет следующие подвижные органы, позволяющие проводить обработку деталей: шпиндель, вертикальную бабку, стол. Вращение шпинделя осуществляется асинхронным двигателем от частотного преобразователя, перемещение стола, бабки (каретки и ползуна) – от трех сервоприводов.

Станок оснащен устройством цифровой индикации для обработки электрических сигналов, поступающих от оптоэлектронных преобразователей линейных и угловых перемещений. УЦИ осуществляет визуализацию на цифровом табло полученной информации, а также формирование команд управления исполнительными механизмами. При позиционировании программируемый орган подходит к избранной координате только с одной стороны, формируя пять ступеней торможения в соответствии с заданными уставками.

Обработку изделий можно производить также ходом одновременно нескольких рабочих органов с ручным регулированием соотношения подачи каждого органа.

Таким образом, использование современных ПЛК приводит к созданию высокопроизводительных и простых в использовании систем управления перемещениями.

*Е.С. Губанов, студ. гр. 5-35*

## **УПРАВЛЕНИЕ МИКРОКЛИМАТОМ В ОФИСНОМ ПОМЕЩЕНИИ**

Микроклимат в рабочей зоне определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температурой окружающих поверхностей. Повышенная влажность затрудняет теплоотдачу организма путем испарений при высокой температуре воздуха и способствует перегреву, а при низкой температуре, наоборот, усиливает теплоотдачу, способствуя переохлаждению. Оптимальны такие параметры микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального функционального и теплового состояния организма без напряжения реакций терморегуляции, что создает ощущение теплового комфорта и служит предпосылкой для высокой работоспособности.

В виду актуальности данной проблемы применим систему управления микроклиматом.

В состав системы входит пульт управления, с помощью которого можем задавать различные сценарии работы системы, а также персональный компьютер, выполняющий такие же функции, что и пульт.

В основу датчиков температуры, освещенности и влажности входят микросхемы фирмы DALLAS-MAXIM с однопроводным интерфейсом 1-Wire DS18B20, DS2438 соответственно. В качестве исполнительных устройств в данной системе являются обогревательное и вентиляционное оборудование, осветительные приборы, которые также подключаются к системе через микросхему фирмы DALLAS-MAXIM DS2413.

Каждая из этих микросхем имеет уникальный 64-битный последовательный код, который позволяет общаться с множеством датчиков, установленных на одной шине.

На рис.1 представлена структурная схема всей системы.

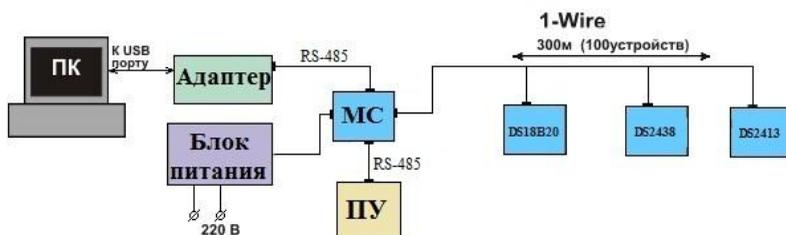


Рис. 1. Структура системы управления микроклиматом

Протокол передачи данных между ПК (персональный компьютер) и МС (модуль сопроцессора) или ПУ (пульт управления) и МС применяется предоставленный в НТЦ «Арго».

*А. А. Муравьева, студ. гр. 4-34*

## ДИСКРЕТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОДАЧИ ТОКАРНОГО СТАНКА

Введение. Обзор систем управления электроприводом подачи токарного станка

Токарный станок - станок для обработки преимущественно тел вращения путем снятия с них стружки при точении. В машиностроении большинство деталей получают окончательные формы и размеры в результате механической обработки заготовки резанием, которое осуществляется путем последовательного удаления режущим инструментом (например, резцом) тонких слоев материала (в виде стружки) с поверхностей заготовки. Процесс резания на токарных станках осуществляется при вращательном главном движении, сообщаемом обрабатываемой заготовке, и при прямолинейном (поступательном) движении подачи, сообщаемом резцу. В токарном станке движение инструмента по двум осям осуществляется за счет электроприводов подачи.

Основными тенденциями развития станкостроения в области высокотехнологичного и высокоточного производства являются:

- повышение универсальности металлообрабатывающего оборудования;
- повышение скорости изготовления деталей;
- повышение качества производимых деталей;

- повышение энергоэффективности станков;
- увеличение числа рабочих координат;
- повышение скорости резания;
- внедрение автоматизированных и роботизированных производственных модулей;
- внедрение высокоскоростных цифровых систем.

Задачи развития современного металлообрабатывающего оборудования предъявляют повышенные требования как ко всей системе управления электрооборудованием в целом, так и к электроприводу, как его основной составляющей. [«Вестник ИГЭУ», Вып.4, 2009 г. «Современные требования к электроприводам станков с ЧПУ»].

Анализ развития станочных электроприводов показал, что в настоящее время основное количество современных высокоточных приводов составляют вентильные приводы и приводы на базе синхронных двигателей с векторным управлением. Приводы на базе асинхронных двигателей, используются в основном в приводах главного движения с возможностью управления скоростью вверх от номинального значения. Плюсами использования асинхронного двигателя является его надежность, низкая эксплуатационная требовательность, простота самого двигателя, доступность, низкая стоимость. Хотя электронное оборудование асинхронных двигателей устроено сложнее, использовать данные двигатели все равно предпочтительнее, так как по цене электронное обеспечение выйдет на порядок дешевле, чем альтернативный комплект, к примеру, с синхронным двигателем.

Для питания асинхронных двигателей используют тиристорные и широтно-импульсные преобразователи, обладающие высокими технико-экономическими показателями.

Привода с широтно-импульсными преобразователями, питающиеся от сети переменного тока через неуправляемый выпрямитель, более быстродействующие, чем электропривода с управляемыми выпрямителями (полоса пропускания до 200 – 250 Гц). Они обеспечивают высокие диапазоны регулирования скорости (до 10 000 об/мин и выше), имеют меньшие потери и более высокий коэффициент мощности.

Для управления электроприводами подач моделируют такие системы, которые отвечали бы за обработку полученной информации (быстродействие: в контуре тока не более 100 м/с, в контуре положения не более 400 м/с), управление скоростью вращения двигателя, автоматическое предотвращение аварийных ситуаций (короткое замыкание, перенапряжение, отключение питания и другое), а так же имели возможность использоваться при необходимости в других станках, например: фрезерных, шлифовочных, координатно-расточных и других.

Таким образом, при проектировании электропривода подачи токарного станка, намного эффективнее и экономичнее использовать двигатели асинхронного типа с широтно-импульсными преобразователями. Спроектированная система управления должна отвечать минимальным требованиям по быстрдействию и защите от аварийных ситуаций.

1 Разработка системы управления электроприводом подач токарного станка .

1.1 Разработка структурной схемы системы управления электроприводом подачи токарного станка

1.2 Требования к синтезу системы управления электроприводом подачи токарного станка. Выбор регулятора. Синтез регулятора.

2 Выбор элементов силового преобразователя электропривода подачи токарного станка.

2.1 Расчет потерь и тепловой расчет силового преобразователя

2.2 Расчет параметров охладителя

2.3 Расчет фильтра

2.4 Система управления преобразователем частоты

3 Разработка блока управления электроприводом подач токарного станка

3.1 Описание элементов блока управления, подключенных к микроконтроллеру

3.2 Разработка и описание элементов связанных с ПЛИС

*С. А. Самаринский, студ.;*  
*рук. А. И. Терехов, к.т.н., проф.*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСОВ НА ОСНОВЕ LVDS В ПРОМЫШЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ**

В настоящее время в промышленных информационно-управляющих системах применяется довольно широкий спектр интерфейсов. Тем не менее, следует отметить, что на всех уровнях обмена данными: как в пределах устройства (контроллера и т. п.), так и на уровне полевой шины, и на более высоких уровнях, — преобладают последовательные способы передачи дискретной информации. При этом одной из общих тенденций, наблюдаемых в промышленных при-

менениях, является использование интерфейсов со значительными перепадами логических уровней с целью увеличения помехоустойчивости. Однако сочетание высоких частот, неизбежно сопровождающих последовательную передачу данных, и значительной скорости нарастания напряжения или тока приводит к нежелательному эффекту — сама линия передачи данных становится источником излучаемых в пространство и наводимых на близко расположенные проводники и устройства помех.

В то же время в промышленных условиях в составе информационных систем нередко применяются дисплеи, подключаемые к источнику сигнала по интерфейсам на основе LVDS (low-voltage differential signaling, низковольтная дифференциальная передача сигналов).

Исходя из анализа данных фактов, предлагается разработать и экспериментально применить интерфейс на основе LVDS, во-первых, в качестве полевой шины, во-вторых, для передачи высокочастотных ШИМ-сигналов.

Ввиду значительного сходства многоточечного варианта LVDS с RS-485 в качестве коммуникационного протокола выбран Modbus. В ходе анализа теоретических возможностей сети на основе LVDS и экспериментальных данных выявлено, что низковольтная дифференциальная передача данных существенно более экономична в плане энергопотребления, чем RS-485, позволяет достичь значительно больших скоростей обмена, не уступает последнему в помехозащищенности и не сопровождается значительным излучением электромагнитных волн. Главным недостатком является существенно ограниченная протяженность сегмента LVDS-сети. Выявлено, что ее развертывание целесообразно только в случае нахождения всех связываемых устройств в пределах 10 метров друг от друга.

Второе рассматриваемое применение интерфейсов на основе LVDS, непосредственная передача ШИМ-сигналов, также имеет существенное ограничение по дальности связи. Тем не менее, в подавляющем большинстве случаев требуемое расстояние для передачи ШИМ-сигналов не превышает нескольких метров, поэтому в данной сфере низковольтная дифференциальная передача пригодна для практического применения.

В качестве дальнейших направлений данного экспериментального исследования следует отметить потенциальную возможность применения LVDS для «сворачивания» большого количества дискретных сигналов в одну LVDS-линию с использованием тривиальных протоколов с целью сокращения количества соединительных проводов и достижения крайне малых задержек на передачу.

## ПРЯМОЙ ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗ ЧАСТОТЫ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НА ПРАКТИКЕ

Под термином «синтезатор частоты» подразумевается электронное устройство, предназначенное для преобразования опорной частоты задающего генератора в требуемую частоту или набор частот, согласно управляющим сигналам. В прямом цифровом синтезаторе (DirectDigitalSynthesizers или DDS) выходной сигнал синтезируется цифровыми методами, что позволяет реализовать следующие функции устройства:

- цифровое управление частотой и фазой выходного сигнала;
- высокое разрешение по частоте и фазе;
- быстрый переход на другую частоту (или фазу) без разрыва фазы;
- микроконтроллерное управление по цифровому интерфейсу.

Задача DDS – получить на выходе сигнал синусоидальной формы с заданной частотой. Поскольку в DDS формирование выходного сигнала происходит в цифровой форме, совершенно очевидна необходимость цифро-аналогового преобразования. Это означает, что в структуре DDS должен быть ЦАП. В любом случае, на выходе ЦАП должен присутствовать ФНЧ для подавления образов выходного спектра, повторяющихся с периодичностью  $F_{CLK}$  (anti-aliasing filter). Для получения синусоидального сигнала на вход ЦАП необходимо подать последовательность отсчетов функции  $\sin$ , следующих с частотой дискретизации  $F_{CLK}$ . Закон изменения функции  $\sin$  во времени сложен и цифровыми методами просто не реализуется. Можно, используя полиномиальное представление, вычислять значения функции  $\sin$  с помощью АЛУ. Однако такой метод не может быть быстродействующим, а высокое быстродействие как раз является одним из основных требований к DDS. Поэтому наиболее подходящим методом формирования отсчетов функции  $\sin$  является табличный метод.

Предлагается для формирования функции  $\sin$  перекодировочная таблица (LookUpTable), массив которой будет размещён в ПЗУ. Код, который подается на адресные входы ПЗУ, является аргументом функции  $\sin$ , а выходной код ПЗУ равен значению функции для данного аргумента. Аргумент функции  $\sin$ , или фаза, в отличие от значения функции, меняется во времени линейно. Сформировать линейно меняющуюся во времени последовательность кодов гораздо проще и это способен сделать простой двоичный счетчик. Поэтому в состав простейшего DDS рис. 1 может входить простой двоичный счетчик, кото-

рый формирует адрес для ПЗУ, куда записана таблица одного периода функции  $\sin$ .

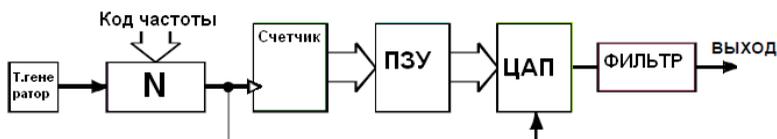


Рис. 1. Простейший цифровой синтезатор

Отсчеты с выхода ПЗУ поступают на ЦАП, который формирует на выходе синусоидальный сигнал, подвергающийся фильтрации в ФНЧ и поступающий на выход. Для перестройки выходной частоты используется делитель частоты с переменным коэффициентом деления, на вход которого поступает тактовый сигнал с опорного генератора. Функциональный состав прямого цифрового синтезатора частоты с использованием перекодировочной таблицы для формирования синусоидального сигнала представлен на рис. 2.

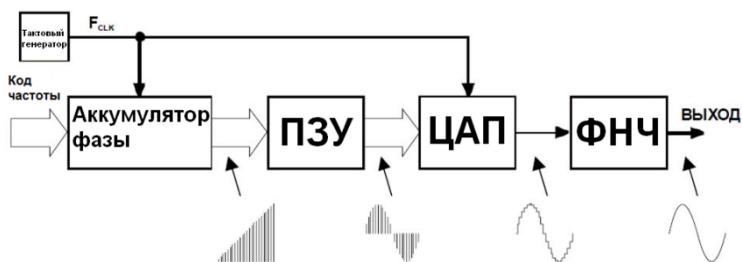


Рис. 2. Схема электрическая функциональная прямого цифрового синтезатора частоты

Поскольку в DDS формирование выходного сигнала происходит в цифровой форме, то в структуре DDS необходим ЦАП, на выходе которого должен присутствовать фильтр низкой частоты (ФНЧ) для подавления образов выходного спектра, повторяющихся с частотой  $F_{CLK}$ .

В постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) находится перекодировочная таблица, используемая для табличного метода при синтезе выходного  $\sin$  сигнала.

Аккумулятор фазы представляет собой накапливающий сумматор, используемый для формирования кода фазы синтезируемого сигнала. Накапливающий сумматор - это регистр, который в каждом такте работы устройства перезагружается величиной, равной старому содержанию, плюс некоторая постоянная добавка. Постоянная добавка, которая используется при работе аккумулятора фазы, является прираще-

нием фазы за один такт работы устройства. Чем быстрее изменяется фаза во времени, тем больше частота генерируемого сигнала.

Аккумулятор фазы работает с периодическими переполнениями, обеспечивая арифметику по модулю  $2N$ . Другими словами, частота переполнений аккумулятора фазы равна частоте выходного сигнала. Это частота определяется формулой:

$$F_{OUT} = \frac{M \cdot F_{CLK}}{2 \cdot N},$$

где  $F_{OUT}$  – выходная частота,

$F_{CLK}$  – тактовая частота,

$M$  – код частоты,

$N$  – разрядность аккумулятора фазы.

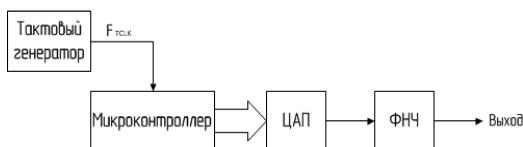
Аккумулятор фазы формирует последовательность кодов мгновенной фазы сигнала, которая изменяется линейно рис. 2. Скорость изменения фазы задается кодом частоты. Далее с помощью ПЗУ линейно изменяющаяся фаза преобразуется в изменяющиеся по синусоидальному закону отсчеты выходного сигнала. Эти отсчеты поступают на ЦАП, на выходе которого формируется синусоидальный сигнал, состоящий из «ступенек». Эти «ступеньки» фильтруются с помощью аналогового ФНЧ, на выходе которого получается «чистый» синусоидальный сигнал.

В настоящее время прямой цифровой метод синтеза частоты широко применяется в функциональных генераторах напряжения, используемых в медицинских приборах для акупунктурной биолокации и стимуляции и для нейрофизиологической стимуляции. Такие генераторы синтезируют следующие виды сигналов:

- периодический гармонический сигнал;
- периодическая последовательность треугольных сигналов;
- периодическая последовательность прямоугольных сигналов;
- периодическая последовательность пилообразных сигналов;
- ЭКГ сигнал.

Генерация сигналов производится в широком диапазоне частот от 0,01 до 40000 ГЦ и выше.

Структурная схема такого генератора представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Структурная схема функционально генератора напряжения**

Ведущую роль в схеме такого генератора выполняет микроконтроллер, во flash-памяти которого хранится массив данных о генерируемых сигналах. Прочие компоненты, входящие в состав DDS, выполняются программно.

#### **Библиографический список**

**1. Ридико Л.И.** DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. 2001. №7

*Е. В. Лобанова, студ.; А. А. Анисимов, к. т. н., доц.  
ИГЭУ, г. Иваново*

## **СИНТЕЗ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С НАБЛЮДАТЕЛЕМ СОСТОЯНИЯ**

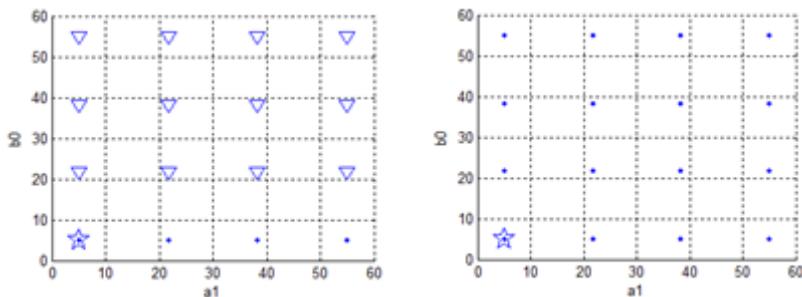
При проектировании систем автоматического управления (САУ) возникает необходимость в синтезе системы управления, отвечающей ряду требований, называемых критериями качества. К таким критериям могут относиться: время переходного процесса, перерегулирование, чувствительность к вариациям параметров объекта (робастность) управления и другие.

В последнее время ключевую роль в теории и практике автоматического управления стала играть проблема обеспечения параметрической грубости (низкой параметрической чувствительности) синтезируемых динамических систем, т.е. сохранения их работоспособности, а также основных показателей качества в условиях возможных вариаций параметров объекта управления (ОУ) [1].

Задачей исследования является применение методов обеспечения низкой параметрической чувствительности систем модального управления (СМУ) путём введения дополнительных обратных связей по производным координат состояния ОУ, гарантирующее не только сохранение устойчивости, но и основных показателей качества при вариациях значений параметров объекта управления на примере системы с наблюдателем состояния (НС).

Проведённые исследования влияния гибких обратных связей на робастные свойства САУ с НС позволили выявить увеличение параметрической грубости системы к вариациям параметров ОУ. На рис. 1 а представлены области робастной устойчивости САУ с НС без гибких

обратных связей для величины среднегеометрического корня (СГК)  $\Omega_1 = 2 \text{ с}^{-1}$ . На данном рисунке точками обозначены области, в которых система сохраняет свою устойчивость, треугольниками – области потери устойчивости, звезда – начальные параметры ОУ. При введении в структуру НС дополнительных гибких обратных связей позволяет расширить зону параметрической грубости САУ, что явно показано на рис. 1, б.



а)

б)

Рис 1. Область устойчивости САУ с НС без гибких обратных связей при  $\Omega_1 = \Omega_2 = 2 \text{ с}^{-1}$  (а), с гибкими обратными связями при  $\Omega_1 = 2.58 \text{ с}^{-1}; \Omega_2 = 2 \text{ с}^{-1}$  (б)

Таким образом введение в состав НС гибких ОС даёт возможность улучшить робастные свойства системы.

#### Библиографический список

1. Тютиков В.В., Тарарькин С. В. Робастное модальное управление технологическими объектами / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2006. – 256 с.

*М.А. Сибирцев студ., Н.В. Салахутдинов, вед. электроник;  
(ИГЭУ)*

## **МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА БАЗЕ DSP (НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА БЕЛАЗ)**

Наряду с классическими требованиями, предъявляемыми к электроприводам (быстродействие, перерегулирование, КПД, наличие коммуникационных интерфейсов и т.д.), часто на первый план выходит себестоимость устройства и время его разработки. Одним из способов снижения себестоимости, повышения надежности работы и компактности, является применение систем прямого цифрового управления на базе одного специализированного цифрового сигнального процессора (DSP), выполняющего все необходимые функции [2]:

1. Фильтрацию сигналов обратной связи и восстановление координат.
2. Управление ключами силового преобразователя и формирование управления на двигатель.
3. Осуществление защиты преобразователя, двигателя, механизма.
4. Коммуникации с АСУ верхнего уровня и с собственными периферийными устройствами.
5. Выполнение расчета управления технологическим контуром с формированием заданий на скорость и момент двигателя в зависимости от внешних условий.

Рассмотрим силовой преобразователь на базе IGBT-транзисторов и DSP-процессора на примере системы возбуждения тягового генератора (СВТГ) карьерного самосвала БелАЗ-240 [1]. СВТГ предназначена для управления режимами работы синхронного тягового генератора (СТГ) СТГВ-1550-8, входящего в состав комплекта тягового электрооборудования электротрансмиссии БелАЗ-240.

СВТГ выполнена по блочно-модульному принципу и состоит из силового преобразователя и системы управления этим силовым преобразователем. Силовой преобразователь СВТГ выполняется по схеме неуправляемый выпрямитель – реверсивный мостовой IGBT инвертор.

СВТГ-3 состоит из следующих устройств: входные защитные устройства, неуправляемый выпрямитель, фильтр звена постоянного тока (ЗПТ), IGBT инвертор, драйвер IGBT, блок предзаряда, датчиковая система, управляющий контроллер СВТГ-3 (КСВТГ-3), стабилизатор напряжения, система жидкостного охлаждения силовых элементов.

Силовой преобразователь, питающийся от одной из двух трехфазных обмоток СТГ, осуществляет преобразование переменного трехфазного напряжения, вырабатываемого генератором, в постоянное стабилизированное напряжение с помощью неуправляемого выпрямителя и фильтра ЗПТ. Затем, модулированное с помощью инвертора на IGBT транзисторах двухполярное напряжение ЗПТ, имеющее постоянную частоту, прикладывается к выводам обмотки возбуждения (ОВ) СТГ, что позволяет эффективно управлять её током путем изменения скважности приложенного модулированного напряжения. Таким образом осуществляется управление режимами работы СТГ.

СВТГ обеспечивает следующие режимы работы:

- а) режим пуска СТГ;
- б) режим автоматического регулирования тока возбуждения при его внешнем задании;
- в) режим автоматического регулирования напряжения выпрямителя на выходе СТГ (напряжения шины ЗПТ) при его внешнем задании и изменении скорости СТГ в диапазоне 1000-1900 об/мин.

Контроллер системы возбуждения тягового генератора (КСВТГ) осуществляет управление силовым IGBT преобразователем с помощью алгоритма ШИМ (обработку сигналов датчиков, реализацию алгоритмов работы регуляторов, защитные и диагностические функции), а также обеспечивает полнообъемный обмен статусной и управляющей информацией с контроллером верхнего уровня по шине CAN.

Ядро системы управления реализовано на базе высокопроизводительного 32-разрядного цифрового сигнального процессора (DSP) TMS320F2808, специально разработанного для подобных применений [3]. Он имеет специальные выходы (PWM) для формирования сигналов управления силовыми ключами по алгоритму ШИМ и позволяет легко построить и осуществить настройку системы управления 2-х или 3-х фазными мостовыми инверторами. Также полезным свойством данных процессоров является вычислительная мощь и наличие специальных TZ (trip zone) выводов, которые инициируют аппаратное отключение формирования управляющего ШИМ-сигнала по приходу на них дискретных сигналов ошибки.

Программное обеспечение системы управления СВТГ представляет собой сложную систему многозадачных приложений. Основным требованием является исполнение задач в режиме реального времени, при котором все задачи должны выполняться строго к установленному времени и с заданной периодичностью. При этом увеличение скорости вычислений, как правило, повышает возможности системы в области точности обработки координат и скорости работы по коммуникацион-

ным интерфейсам. Процессору необходимо выполнять широкий диапазон функций, различающихся по своей сложности и приоритету, поэтому целесообразно разделить их на несколько категорий и построить алгоритм, позволяющий оптимально использовать быстродействие процессора.

Алгоритм работы КСВТГ-3 состоит из трех основных частей:

Функции быстрого цикла, имеющей первый уровень приоритета.

Эта функция осуществляет действия, непосредственно связанные с формированием сигналов, управляющих силовыми IGBT транзисторами, такие как: считывание новых значений параметров, измераемых АЦП; прием управляющего слова и задания от КВУ по шине CAN; расчет параметров системы управления на основе принятой информации и обновление регистров ШИМ. Также функция осуществляет проверку быстродействующих защит, то есть отключает модуляцию при возникновении аварийных ситуаций, формирует и пересылает соответствующий код ошибки на КВУ. Функция выполняется по прерыванию от периферийного модуля ШИМ (ePWM) процессора с частотой 4 кГц и имеет высший уровень приоритета.

Функции быстрого цикла, имеющей второй уровень приоритета.

Эта функция осуществляет выполнение операций, не связанных непосредственно с формированием управляющих IGBT-модулем сигналов и не требующих большого быстродействия. Данная функция выполняет анализ температур, полученных с аналоговых и дискретных датчиков, обслуживание CanOpen (обновление буфера PDO, передающего пакеты с закодированным состоянием системы на КВУ по шине CAN), инкрементирование счетчиков времени паузы между кадрами-предупреждениями и кадрами-сообщениями об ошибке. Функция выполняется по прерыванию от таймера-счетчика 2 процессора (CPU Timer2) с частотой 1 кГц и имеет более низкий уровень приоритета. Эта функция разгружает основную функцию, описанную в п. а). В отличие от нее, данная функция выполняет операции, которые не должны обязательно исполняться каждые 250 мкс для формирования сигналов ШИМ с частотой 4 кГц. Данная функция выполняется, пока не закончат выполнение все входящие в нее операции, или не придет прерывание от модуля ШИМ, после чего программа переходит к выполнению функции быстрого цикла, имеющей первый уровень приоритета. После выполнения всех операций, входящих в эту функцию, программа возвращается к операциям функции быстрого цикла, имеющей второй уровень приоритета.

Функции фонового цикла, имеющей наименьший приоритет и выполняющейся в то время, когда процессор свободен от выполнения предыдущих двух функций. Функция выполняется в фоновом цикле основной функции Main программы и осуществляет обработку значе-

ний, полученных АЦП от аналоговых датчиков температуры и циклический просмотр и перезапись объектов, сохраняемых в энергонезависимую память. Данная функция выполняется циклически, пока не придет прерывание от модуля ШИМ или от переполнения таймера-счетчика 2, после чего программа переходит к выполнению функции быстрого цикла, имеющей первый или второй уровень приоритета соответственно. После выполнения соответствующих функций обработки прерываний, программа возвращается к операциям функции фонового цикла.

Использование вышеописанных принципов построения ПО, современного высокопроизводительного DSP-процессора и силовой части на базе IGBT-транзисторов позволяет построить эффективную, надежную и динамичную систему управления режимами работы синхронного тягового генератора. Разработанная установка является универсальной и позволяет также управлять высоковольтными двигателями постоянного тока, бесколлекторными вентильными двигателями (BLDC), а также трехфазными асинхронными двигателями (при использовании третьего зарезервированного силового модуля IGBT)

#### **Библиографический список**

1. **Флоренцев С.Н.**, Изосимов Д.Б. Комплексный подход проектирования электрооборудования для электромеханических трансмиссий, материалы конференции, секция «Электротехнические комплексы и системы на автотранспортных средствах».
2. **А.С. Каракулов и др.** Разработка программного обеспечения для систем управления электрическими двигателями, – Томск, 2007 г.
3. **Гладштейн М.**, Применение микроконтроллеров и DSP-процессоров для управления устройствами силовой электроники. «Электронные компоненты» №7, 2008.

*А.Р. Тюрин, студ.;*

*рук. В.В. Тютиков, д.т.н., проф.*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ АКАР**

В условиях все более и более возрастающих требований к качеству процессов, протекающих в электромеханических системах (ЭМС), следует уделить внимания принципиально новым методам регулирования. В связи с этим стоит обратить внимание на синергетическую теорию управления, развитую в трудах профессора А. А. Колесникова [1].

Основным методом синергетической теории управления является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР).

Объект управления (ОУ), изображенный на рис. 1, описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$s\Omega = \frac{C}{J}I$$

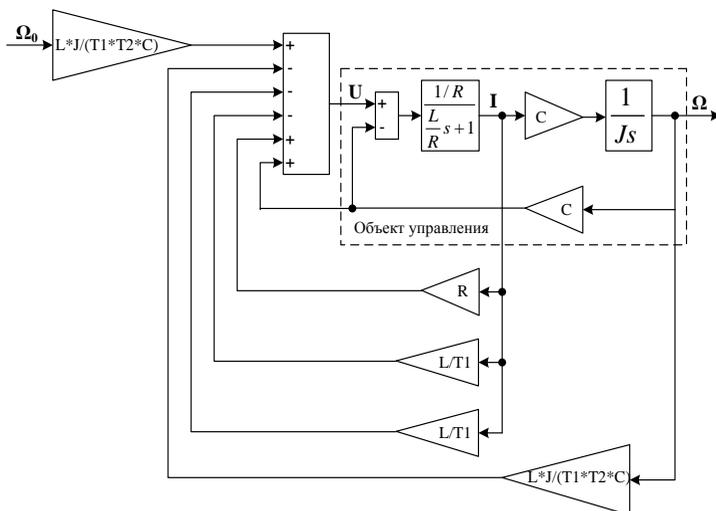


Рис. 1. Объект управления с регулятором

Для синтеза системы управления методом АКАР для каждой переменной состояния используют функциональное уравнение вида:

$$T_1 \dot{\Psi}_1 + \Psi_1 = 0,$$

где  $\Psi_1 = x_1 - x_{01}$ .

Для нашего объекта запишем два уравнения:

$$T_1(\dot{i} - i_0) + i - I_0 = 0$$

$$T_2(\dot{\Omega} - \Omega_0) + \Omega - \Omega_0 = 0$$

где  $I$  – ток;  $\Omega$  – частота вращения,  $T_1, T_2$  – постоянные времени.

В результате решения уравнений получим:

$$U = C\Omega + RI - \frac{L}{T_2}I - \frac{L}{T_1}I - \frac{JL}{CT_1T_2}\Omega + \frac{JL}{CT_1T_2}\Omega_0$$

Система управления с регулятором представлена на рис. 1.

Временная диаграмма частоты вращения электродвигателя при , равных 0,1 с или 0,05 с соответственно, изображена на рис. 2.

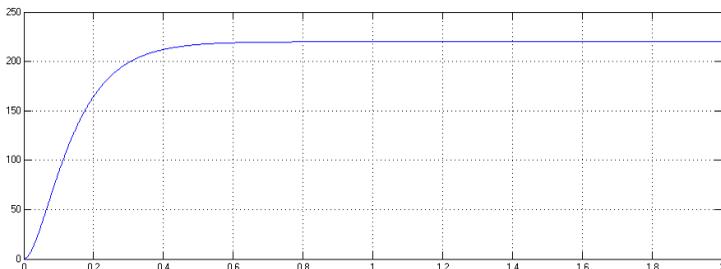


Рис. 2. Временная диаграмма частоты вращения

Видно, что процесс получился аperiodический. Для получения более сложных процессов следует выбрать функциональное уравнение более высокого порядка. Выберем уравнение второго порядка:

$$T_1^2\ddot{\Psi}_1 + \varepsilon T_1\dot{\Psi}_1 + \Psi_1 = 0$$

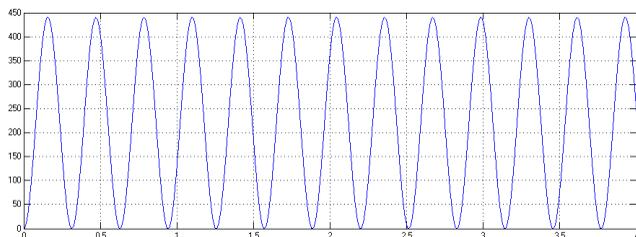
В этом случае будем иметь:

$$T^2(\ddot{\Omega} - \ddot{\Omega}_0) + \varepsilon T(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_0) + \Omega - \Omega_0 = 0$$

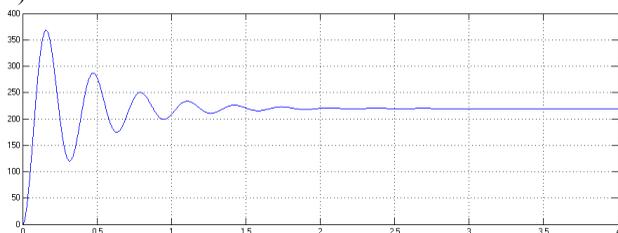
Уравнение регулятора примет вид

$$U = C\Omega + RI - \frac{\varepsilon L}{T}I - \frac{JL}{CT^2}\Omega + \frac{JL}{CT^2}\Omega_0$$

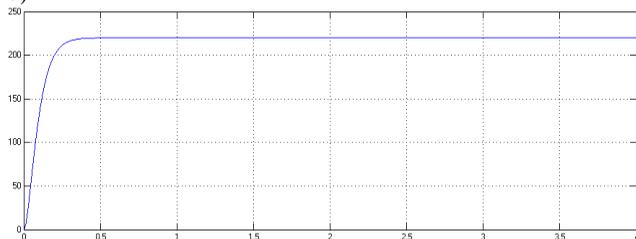
В зависимости от  $\varepsilon$  диаграммы могут иметь вид, изображенный на рис. 3.



а)



б)



в)

**Рис. 3. Гармонический (а), затухающий (б) и аperiodический (в) переходные процессы**

Таким образом, с помощью метода АКАР можно получить желаемые выходные характеристики объекта, которые, как показывает практика, будут обладать значительно лучшими свойствами по сравнению со стандартными регуляторами. У синергетической теории управления хорошие перспективы и высокий потенциал для практического применения в автоматизации технологических процессов.

#### Библиографический список

1. Колесников А.А. Основы теории синергетического управления. –М.: Фирма “Иско-Сервис”, 2000. – 264 с.: ил.

*А.С. Чёренькая, студ., А.И. Терехов, проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПОНИЖАЮЩЕГО ТИПА**

В настоящее время широкое применение находят импульсные источники питания с промежуточным звеном повышенной частоты. В импульсных источниках питания сглаживающие фильтры занимают до 40 - 50% массы и габаритов всего источника. Для снижения их массы и габаритов, при заданной величине высокочастотных пульсаций, необходимо либо повышать частоту коммутации транзисторов, либо использовать многозвенные фильтры. Однако увеличение частоты коммутации транзистора приводит к снижению КПД источника из-за возрастания коммутационных потерь мощности и к ухудшению электромагнитной совместимости, что имеет очень важное значение для радиотехнических и связанных устройств.

Для стабилизации выходных характеристик обычно используется обратная связь по выходному напряжению или току, а для обеспечения или повышения запаса устойчивости используются корректирующие звенья в цепях обратной связи или контура обратной связи по различным переменным состояниям. Основная проблема, которую необходимо решить при использовании однозвенных и многозвенных фильтров в импульсных источниках питания с отрицательной обратной связью (ОС) по выходному напряжению, заключается в обеспечении достаточно большой глубины отрицательной ОС, а, следовательно, коэффициента стабилизации выходного напряжения или тока и, одновременно, обеспечения достаточного запаса устойчивости по фазе и амплитуде.

Импульсные преобразователи являются дискретно нелинейными системами. Для исследования устойчивости работы данных устройств используется метод усреднения и линеаризации дискретно нелинейных систем. Этот метод позволяет перейти от дискретно нелинейной системы к непрерывной линейной с использованием метода усреднения и линеаризации дифференциальных уравнений, получить частотную передаточную функцию разомкнутой петли ОС и с использованием частотных критериев определить устойчивость системы, полосу подавления низкочастотных пульсаций и коэффициент стабилизации выходных параметров. Основное достоинство метода усреднения и линеаризации - возможность определения частотной передаточной

функции разомкнутой петли ООС, а, следовательно, возможность реализации синтеза цепи ООС по требуемым амплитудным и фазочастотным характеристикам. Передаточная функция замкнутой или разомкнутой системы импульсных преобразователей напряжения (ИПН) зависит от передаточной функции ее непрерывной части (сглаживающих фильтров), а также типа и числа контуров обратной связи и корректирующих звеньев в цепи обратной связи.

В работе для исследования коэффициента стабилизации, устойчивости ИПН, полосы амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) разомкнутой петли ОС ИПН используются и сравниваются приближенный метод (усреднения и линеаризации) и «точный» метод расчета с использованием импульсных моделей с замкнутой петлей ОС.

Проводится исследование устойчивости работы, коэффициента стабилизации выходного напряжения ИПН, полосы АЧХ передаточной характеристики разомкнутой петли ОС ИПН, величины перерегулирования по току силового транзистора и выходному напряжению при изменении нагрузки и входного напряжения для ИПН с однозвенными и двухзвенными фильтрами с характеристиками Чебышева и Баттерворта и характеристиками равнозвенных фильтров при разных контурах обратной связи; разной величине пульсаций на емкостях фильтра и разной величине коэффициента усиления усилителя постоянного тока в цепи обратной связи. Также сравниваются коэффициенты стабилизации и устойчивость работы ИПН полученные при использовании приближенных методов усреднения и линеаризации и «точного» метода с использованием импульсных моделей с замкнутой петлей ОС, т.е. проводится оценка погрешности приближенного метода.

Для улучшения качества динамических процессов при различных возмущающих воздействиях, т.е. обеспечения малой величины перерегулирования (для современных цифровых систем связи величина перерегулирования ограничивается очень жесткими нормами:  $\Delta_{длн} = \pm 2\%$ ), малой длительности переходных процессов (до десятков микросекунд), снижения низкочастотных пульсаций до десятков - единиц милливольт, стабильности выходных характеристик до единиц - долей процента при обеспечении устойчивой работы ИПН, необходимо исследовать устойчивость работы и динамические характеристики ИПН с различным ослаблением фильтров в полосе задерживания; различными контурами обратной связи; различными коэффициентами усиления усилителя постоянного тока в цепи обратной связи, различными соотношениями потерь в элементах сглаживающего фильтра и различным характером и параметрами нагрузки.

**Библиографический список**

1. Сазонов, В.В. Импульсные стабилизаторы напряжения - М.: Энергопромиздат, 1992
2. Четти, Э. Проектирование ключевых источников питания: пер. с англ - М.: Энергопромиздат, 1990
3. Мэк, Р. Импульсные источники питания: пер. с англ - М.: Додэка, 2008
4. Эраносян, С.А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями - Л.: Энергопромиздат, 1991

*Швецов С.В., студ.*

## **МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ**

Каждый источник света – будь то лампа накаливания, люминесцентная лампа, натриевая лампа высокого давления, светодиодный светильник, – может изменять яркость своего свечения в зависимости от каких-либо входных параметров, однако процессы изменения яркости, и соответственно методы управления яркостью для разных типов источников света, отличаются. Наибольшее распространение среди источников питания для мощных светодиодов получили импульсные источники тока, управляющиеся по методу ШИМ.

Микропроцессорный контроллер управления освещением МУР 1001.9 TAD Loc предназначен для управления яркостью светодиодных светильников по закону ШИМ в соответствии с записанными в его память сценариями подсветки для 12-ти каналов. Данный контроллер наиболее применим в динамической архитектурной подсветке и в уличном освещении.

В связи с нарастающей в мире популярностью “открытых” технологий, разработчиками ООО НТЦ “Арго” было принято решение предоставить пользователю возможность самостоятельного написания сценариев архитектурной подсветки и записи созданных сценариев в память контроллера. Алгоритм переключения сценариев с привязкой к времени суток осуществляется с использованием инструментов АСУНО (автоматизированная система управления наружным освещением) от ООО НТЦ “Арго”.

Ввиду того, что уровни напряжения, используемые в ШИМ, могут существенно отличаться для разных видов светодиодных светильников, на выходе контроллера предусмотрена гальваническая развязка по

каждому каналу для управления сигналом уровня TTL более высокими уровнями напряжения.

Поскольку для решения задач динамической подсветки в большинстве случаев не хватает 12-ти каналов, разработана система разбиения написанного сценария на несколько контроллеров освещения и объединения их по общей шине с управляющим контроллером более высокого уровня, который осуществляет передачу номера сценария, подлежащего исполнению, всем контроллерам нижнего уровня и через определенные промежутки времени синхронизирует их работу. По сравнению с имеющимися на рынке системами управления освещением данное устройство открывает новые возможности в дизайне освещения, а также в управлении уличным освещением на основе светодиодных светильников.

*М.Ю. Шмаров студ.;  
рук. В.Н. Егоров к.т.н., доц. каф Э и МС  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА**

В мощных карьерных экскаваторах (с пиковой мощностью до 30МВт) как в нашей стране, так и за рубежом до недавнего времени применялась схема электропривода по системе «генератор-двигатель», в которой завышение установленной мощности синхронных двигателей и их перевозбуждение приводили к «емкостному» режиму работы питающей энергосистемы, что нарушает существующие стандарты на качество электроэнергии.

Как отмечают специалисты, и трехфазные мостовые выпрямители, как управляемые, так и неуправляемые, а система «генератор-двигатель (Г-Д)» тем более, перестали удовлетворять новым требованиям по электромагнитной совместимости с питающей сетью. Поэтому, современный путь модернизации электроприводов – применение активных выпрямителей, как в частотно-регулируемом электроприводе переменного тока, так и приводе постоянного тока.

При замене системы «Г-Д» экскаватора ЭКГ-10 производства «Уралмаш» была выбрана схема «транзисторный преобразователь-двигатель постоянного тока». Замена генератора на статический преобразователь позволяет избежать существенной перестройки механиче-

ского оборудования, электрооборудования и установки дополнительных датчиков. По новой схеме в ЭКГ-10 питание всех электроприводов экскаватора осуществляется от общего звена постоянного тока на двух активных выпрямителях. В свою очередь, электродвигатели подъёма, напора, хода и поворота получают питание от реверсивных ШИМ-преобразователей постоянного напряжения (рис.1). Такая схема потребовала для каждого из восьми силовых преобразователей собственного блока управления и организации локальной сети при помощи CAN-интерфейса с центральным блоком управления, в котором заложены алгоритмы работы электроприводов и вспомогательного оборудования (рис.2).

Система управления каждым силовым блоком реализована на DSP-контроллере типа МК13 с процессором TMS320F2833, осуществляющая прямое цифровое управление IGBT-ключами. Очевидно, что выбор этого DSP-контроллера фирмы Texas Instruments обусловлен тем, что он имеет высокую производительность, расширенную периферию со встроенной поддержкой широтно-импульсной модуляции для прямого цифрового управления, встроенный контроллер CAN-сети, многоканальный быстродействующий АЦП.

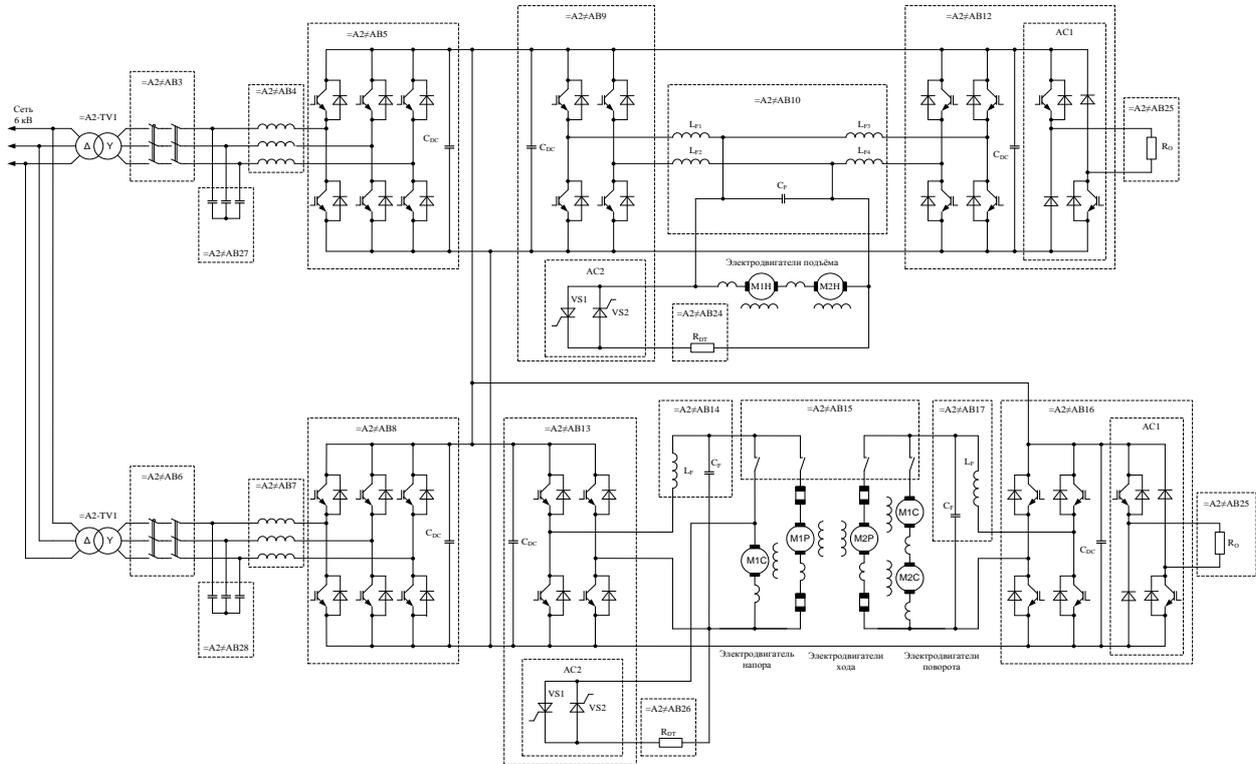


Рис.1. Функциональная схема электропривода экскаватора

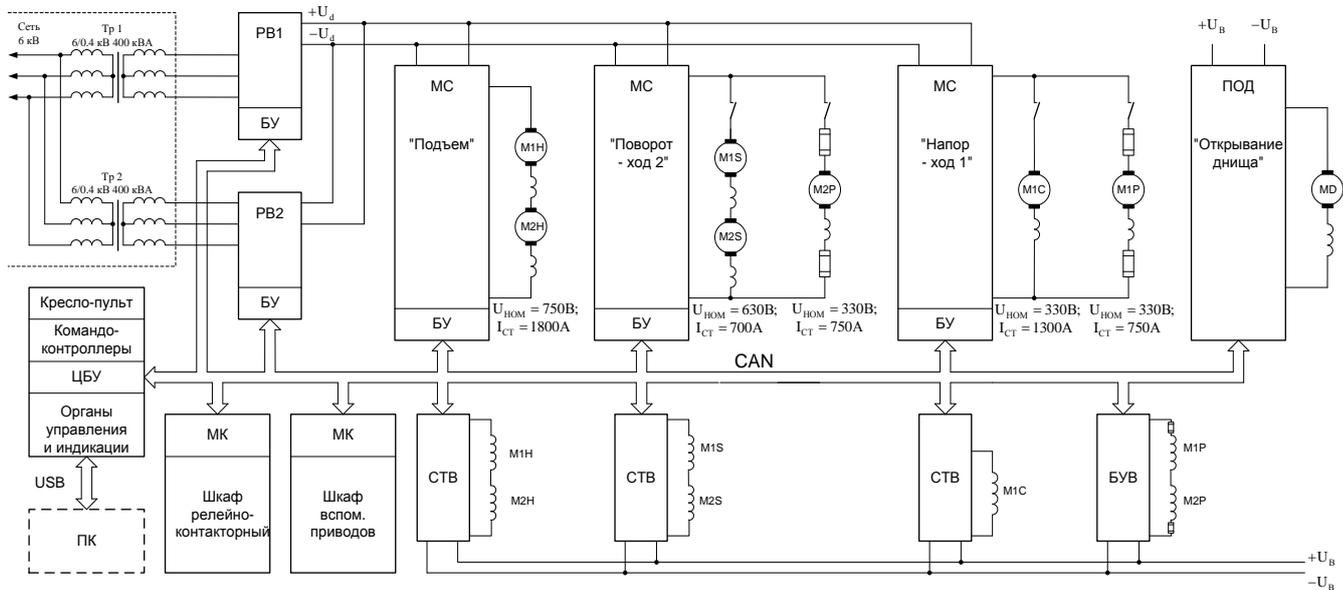


Рис.2. Структурная схема системы управления электропривода экскаватора

*А.Н. Брунов, студ.;*

*рук. Л.С. Поздняков, ассистент*

## **МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СБОРОМ ИНФОРМАЦИИ О ПОТРЕБЛЕНИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Постоянное удорожание энергоресурсов, а также значительное увеличение их потребления в последние годы заставляет всерьез задуматься о более жестком контроле использования, а также требует внедрения эффективных средств учета, способствующих снижению затрат на электроэнергию и разработки энергосберегающей политики и мероприятий по энергосбережению. Использование автоматизированных систем управления в любых областях жизни и деятельности позволяет осуществлять точный и быстрый контроль за потреблением энергоресурсов, повышая достоверность учета, оптимизируя затраты на энергоресурсы и делая жизнь более комфортной и удобной.

АСКУЭ – автоматизированная система коммерческого (контроля) учета электроэнергии – служит для точного учета и оперативного контроля за потребляемой и переданной электроэнергией с учетом существующих тарифов, а также для обеспечения доступа к полученным данным с целью произведения расчетов, анализа и выработки эффективной энергосберегающей политики. Основной целью внедрения автоматических систем коммерческого учета электроэнергии является снижение издержек и затрат на потребление энергоресурсов, минимизация потерь за счет повышения точности полученных данных и сокращения времени сбора обработки. Автоматизация учета электроэнергии на всех этапах, от производства до потребления, становится непременным условием эффективного функционирования современных энергосистем.

АИИС КУЭ представляет собой распределенную информационно-вычислительную систему. АИИС КУЭ состоит из следующих уровней:

- 1) ИИК (измерительно-информационный комплекс);
- 2) ИВКЭ (Информационно-вычислительный комплекс электроустановки);
- 3) ИВК (Информационно-вычислительный комплекс).

Измерительно-информационный комплекс (ИИК) состоит из измерительных трансформаторов тока и напряжения, измерительных цепей и multifunctional электронных счетчиков электроэнергии. На

уровне ИВКЭ осуществляется первичная обработка параметров энергопотребления, вычислительные операции, накопление результатов за определенный период времени и передача информации по каналам связи на уровень ИВК. Информационно-вычислительный комплекс в автоматическом режиме или по запросу пользователя собирает с уровня ИВКЭ и обрабатывает информацию по потреблению электрической энергии и мощности. Далее собранная информация передается в ЦСОИ (Центр сбора и обработки информации).

На сегодняшний день в линейке выпускаемой продукции у производителей электросчетчиков доминируют приборы, оборудованные интерфейсным выходом (CAN, RS-485). При этом большинство электросчетчиков имеют импульсный выход, в результате чего востребованность безинтерфейсных приборов остается на достаточно высоком уровне.

В основе микропроцессорной системы управления сбором информации о потреблении электроэнергии лежит модернизированный преобразователь числоимпульсных сигналов МУР 1001.5 ADN (разработка НТЦ «Арго»). Данное устройство имеет возможность подключения 8 датчиков с числоимпульсным выходом и используется как автономно, так и совместно с УСПД (устройство сбора и передачи данных). Микропроцессорную систему управления сбором информации о потреблении электроэнергии предложено реализовать на базе микроконтроллера серии MSP430F2XX. Микроконтроллеры MSP430F2xx обладают низким уровнем энергопотребления, что позволяет увеличивать время питания при работе от батареи. Генератор тактовой частоты обеспечивает и частоту для режима ожидания со сверхнизким потреблением, и требуемую частоту для режима с высокой производительностью. Система генерирования тактовой частоты достаточно гибкая и позволяет оптимально работать с единственным 32-кГц резонатором и внутренним управляемым генератором (DCO) для ЦПУ и быстрой периферии. Благодаря 16-разрядному RISC-процессору, обслуживание внешних прерываний производится за очень короткое время. Переход из режима ожидания в активный режим осуществляется менее чем за 6 мкс. Таким образом, комбинируется режим со сверхнизким потреблением и немедленное включение режима высокой производительности в случае необходимости.

В результате внедрения усовершенствованного преобразователя числоимпульсных сигналов энергосистемы обеспечивают точную достоверную информацию всех видов учета электроэнергии и мощности на электростанциях и подстанциях, позволяют осуществлять целена-

правленное управление режимами электропотребления для обеспечения надежности энергосбережения и энергоснабжения. Конечным результатом внедрения является повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на базе получаемой информации о потреблении электроэнергии, снижение технических и коммерческих потерь и собственного потребления энергосистемы.

*А.Д. Абраменков, студ.;*

*рук. Ю.В. Троицкий, к.т.н., доц.*

*(Филиал ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

## ИЗМЕРИТЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

Емкостные датчики обладают высокими потенциальными возможностями, которые используются не полностью, по причине несовершенства измерительных преобразователей.

Достоинства емкостных датчиков: простота конструкции, малые размеры и масса, высокие: чувствительность, разрешающая способность и быстродействие. Недостатки: нестабильность характеристик при изменении параметров окружающей среды, влияние паразитных емкостей. Перечисленные недостатки устранимы, если работой датчика будет управлять микроконтроллер (МК).

В классической схеме для преобразования длительности импульса наиболее широко используется аналоговый компаратор напряжений [1], который присутствует практически во всех восьмиразрядных микроконтроллерах.

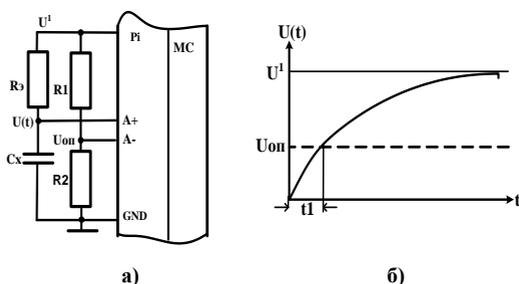


Рис. 1. Функциональная схема время импульсного преобразователя емкости датчика с использованием аналогового компаратора микроконтроллера (а), временная диаграмма время импульсного преобразования (б)

Источник опорного напряжения  $U_{оп}$ , в качестве которого использован резистивный делитель, подключен к инвертирующему входу  $A$ -встроенного аналогового компаратора, неинвертирующий вход которого  $A+$  подключен к точке соединения емкостного датчика  $C_X$  и эталонного резистора  $R_3$ . Значение обычно задают равным.

Перед измерением емкости  $C_X$  датчика на выводе порта МК  $Pi$  устанавливается напряжение низкого уровня. Емкостный датчик  $C_X$  начинает разряжаться через образцовый резистор  $R_3$ . Через некоторое время, в течение которого емкостный датчик  $C_X$  полностью разрядится, МК выводит высокий уровень напряжения в линию  $Pi$  и запускает от генератора тактовых импульсов внутренний, заранее обнуленный счетчик таймера (ТС). Когда, напряжение на емкостном датчике достигнет уровня на выходе аналогового компаратора (рис.16), будет сформирована логическая единица.

$$U_{оп} = U^1 \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right), \quad (1)$$

где  $\tau = R_3 \cdot C_X$ .

При равенстве  $U_{оп} = 0,63U^1$  из (1) следует:

$$t_1 = \tau \cdot \ln 3. \quad (2)$$

По сигналу компаратора МК считывает содержимое счетчика ТС, двоичный код которого  $N_t$  пропорционален времени  $t_1$  и, соответственно,  $C_X$ :

$$N_t = t_1 \cdot f_T = R_3 \cdot C_X \cdot \ln 3 \cdot f_T, \quad (3)$$

где  $f_T$  – частота генератора тактовых импульсов ТС.

$$N_t = C_X \cdot S_C, \quad (4)$$

где  $S_C = R_3 \cdot \ln 3 \cdot f_T$ , Ом/сек.

Рассмотренная схема обладает очевидной простотой. Однако, в последнее время 8-разрядные контроллеры значительно потеснены более мощными 32-разрядными микроконтроллерами, обладающими значительно большими вычислительными возможностями, имеющими развитую коммуникационную систему, большой объем встроенной и внешней памяти, обеспечивающий возможность работать в среде стандартной операционной системы. В этих микроконтроллерах отсутствует аналоговая периферия, но расширены возможности аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Так в семействе МК STM32f1 для встроен-

ного АЦП предусмотрен режим «analog watchdog» [2], суть которого сводится к режиму «оконного компаратора», позволяющего фиксировать нахождение преобразуемого напряжения в зоне, ограничиваемой заданным нижней и верхней границей (рис.2).

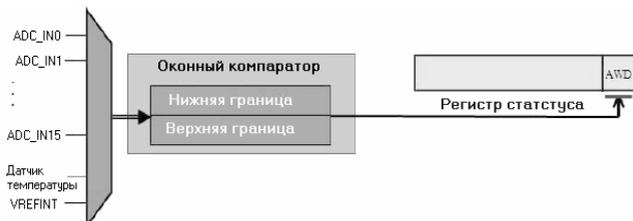


Рис. 2. Работа АЦП в режиме оконного компаратора

В зависимости от модели, в микроконтроллеры STM32 может быть встроено один или два аналогово-цифровых преобразователя. АЦП питаются отдельным напряжением, которое в зависимости типа корпуса может находиться в пределах 2,4-3,6 В. Источник опорного напряжения (ИОН) АЦП соединен либо внутренне с напряжением питания АЦП, либо со специальными внешними выводами. АЦП характеризуется 12-битной разрешающей способностью и частотой преобразования 1 МГц. У него имеется до 18 мультимплексированных каналов.

Режим оконного компаратора (analog watchdog AWD) задается установкой соответствующих бит регистров управления [3]. При этом может быть задано подключение одного из 16 входов или режим последовательного опроса всех входов  $ADC\_INi$ . Границы сравнения задаются загрузкой соответствующих значений в два 12-разрядных регистра  $ADC\_HTR$  и  $ADC\_LTR$ . Для организации мониторинга напряжения на контролируемой емкости при инициализации необходимо задать одноканальный продолжительный (Single continuous) режим работы АЦП, при котором после окончания однократного преобразования АЦП не останавливается, а продолжает выбирать отсчеты из одного определенного канала.

Измеряемая емкость  $C_X$  подключается к одному из входов  $ADC\_INi$ , запрограммированных на работу в режиме оконного компаратора, последовательно с ней включается эталонный резистор  $R_{э}$ , второй вывод которого соединяется с выводом порта общего пользования  $Pi$  (рис. 3,а). Кроме АЦП необходимо провести инициализацию одного из таймеров общего назначения на работу в режиме «захвата»

по прерыванию, формируемому при достижении заданной верхней границы оконного компаратора.

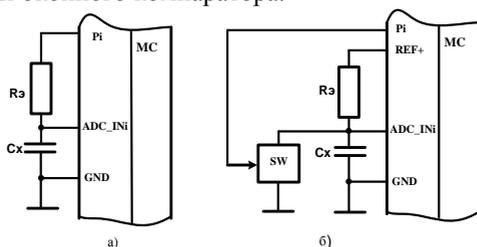


Рис.3. Схема преобразования емкости датчика  $C_x$  в код с общей цепью заряда/разряда (а) и раздельной цепью разряда через ключ SW (б)

Таким образом, в этом случае аналоговый компаратор заменен цифровым компаратором, в котором  $U_{OП}$  задается кодом, заносимым в регистр верхней границы оконного компаратора, что позволяет обеспечить высокую точность установки этого параметра. При этом существенную роль в погрешность преобразования вносит погрешность установки значения  $U^1$ , поскольку опорное напряжение формируется как часть опорного напряжения АЦП  $U_{ref}$ , а не  $U^1$ .

Этот недостаток устраняется при запитке RC цепи опорным напряжением АЦП  $U_{ref}$  (рис.3б). В этом случае:

$$U_{OП} = N_B \cdot \Delta U = N_B \cdot U_{ref} / 2^n - 1, \quad (5)$$

где  $N_B$  – кодовая комбинация, соответствующая верхней границе.

Нетрудно используя выражение (5), доказать, что при равенстве  $U^1 = U_{ref}$  и  $N_B = 0,67 \cdot (2^n - 1)$  будет соблюдаться справедливость выражений (2)-(4), т.е. работа с цифровым компаратором в принципе не будет отличаться от работы преобразователя с аналоговым компаратором.

Другим недостатком схемы рис.3а является неполный предварительный разряд измеряемой емкости логическим нулем. Этот недостаток в схеме рис.3а может быть устранен, если запуск таймера делать при достижении нижней границы оконного компаратора  $N_H$ , которая задается равной максимально допустимому значению  $U^0$ . Значение  $U_{OП}$  задают:

$$U_{OП} = (N_B - N_H) \cdot \Delta U = (N_B - N_H) \cdot U_{ref} / 2^n - 1, \quad (6)$$

При выполнении этого условия практически устраняется влияние неполного исходного разряда емкости. Другим решением этой про-

блемы является использование дополнительного разрядного ключа SW (рис. 3,б).

Таким образом, при отсутствии аналогового компаратора можно успешно реализовать процедуру преобразование емкости емкостного датчика, используя цифровые ресурсы 32-разрядного микроконтроллера. При этом схема измерения не требует прецизионного резистивного делителя, присутствующего в схеме рис. 1а или дополнительного прецизионного источника опорного напряжения, как в схеме, предлагаемой в [1].

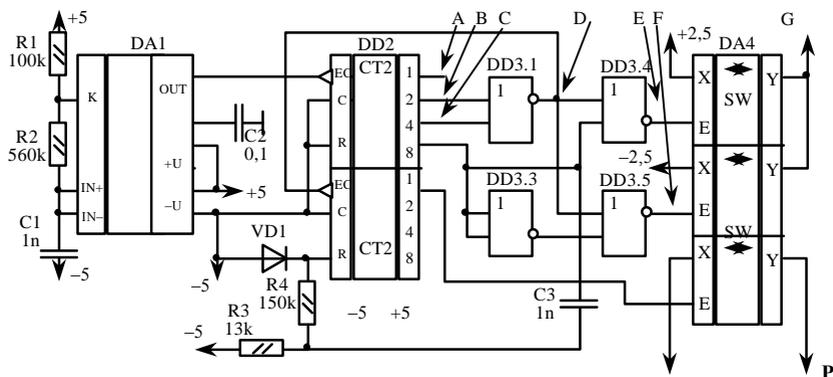
#### Библиографический список

1. **Вострухин А.В.** Преобразователь емкости в ШИМ-сигнал на микроконтроллере AVR // Датчики и системы. 2009. № 12. С. 27-29.
2. Insider's Guide STM32 to the ARM® Based Microcontroller. An Engineer's Introduction to the STM32 Series. www.hitex.com.
3. **RM0008** Reference manual STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced ARM-based 32-bit MCUs.

*А. Н. Шумский, А. Ю. Русак, А. В. Жарский, студ.;  
рук. И.О. Оробей, к.т.н, доц.  
(БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь)*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОПОРНОГО СИГНАЛА СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Схема выделения слабого информативного сигнала с помощью опорного очень часто используется в измерительной технике. Разработанную принципиальную схему электромагнитного и ядерно-магнитного расходомера можно разделить на несколько функциональных частей [1, 2]. Алгоритм формирования измерительного сигнала осуществляется с помощью DA1, DD2, DD3, DA4 (рис. 1). Эти элементы задают частоту и формируют сигнал специальной формы (рис. 2), который через преобразователь напряжение-ток обеспечивает трапециидальную форму тока через катушку (рис. 2, I), создающую магнитное поле в измерительном канале.



ис. 1. Принципиальная электрическая схема

Использование сложного закона изменения тока через катушку вызвано необходимостью нивелирования погрешностей, обусловленных паразитной трансформаторной ЭДС. Трапецидальная форма тока (рис. 3) является компромиссным решением получения измерительного сигнала электромагнитного расходомера. Дальнейшее увеличение точности и повышение отношения сигнал/шум ( $SNR$ ) в измерительном тракте достигается за счет уменьшения мощности трансформаторной ЭДС при оптимизации временных зависимостей закона изменения тока в катушке.

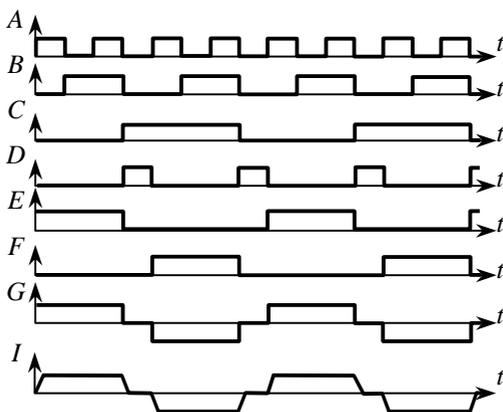


Рис. 2. Временные диаграммы

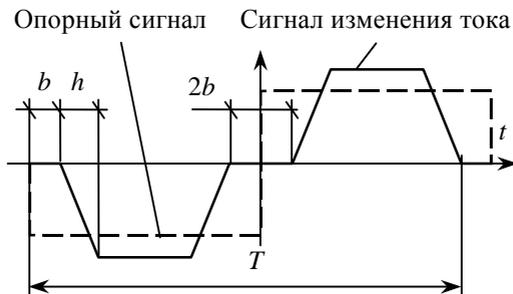


Рис. 3. Трапецидальный сигнал

$SNR$  оптимизировали вариацией  $b$  и  $h$  при различных видах трансформаторной ЭДС. С достаточной точностью можно допустить, что трансформаторная ЭДС описывается как реакция звена реального дифференцирования, имеющего передаточную функцию

$$W(p) = \frac{K_f p}{T_f p + 1}. \quad (1)$$

В работе произведена оценка влияния  $T_f$  на отношение сигнал/шум, что позволяет наилучшим образом выбирать частоту и другие параметры измерительной схемы.

Анализ характеристик проводился с использованием гармонического анализа. Для сигнала изменения тока (рис. 2) разложение в ряд Фурье даст следующий результат:

$$f_S(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8}{h\omega^2 k^2} \sin\left(\omega k \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\omega k \left(\frac{\pi-h}{2} - b\right)\right) \sin\left(\omega k \frac{h}{2}\right) \sin(\omega k t).$$

С учетом (1) временная зависимость сигнала трансформаторной ЭДС будет иметь вид

$$f_N(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8}{h\omega^2 k^2} \sin\left(\omega k \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\omega k \left(\frac{\pi-h}{2} - b\right)\right) \times \\ \times \sin\left(\omega k \frac{h}{2}\right) \sin\left(\omega k t + \arctg \frac{1}{T_f \omega k}\right) \frac{\omega k K_f}{\sqrt{1 + (T_f \omega k)^2}}.$$

Опорный сигнал описывается выражением:

$$f_R(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{\pi \omega k} \left( \sin \left( \omega k \frac{\pi}{2} \right) \right)^2 \sin(\omega k t)$$

В измерительной схеме с помощью опорного сигнала происходит выделение полезной составляющей. Мощность сигнала на выходе схемы синхронного детектирования [3] соответствует интегрированию квадрата среднего значения временной функции за ее период с умножением на  $-1$  при отрицательном опорном сигнале. Исходя из теоремы Парсеваля

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega,$$

мощность сигнала можно определить как сумму квадратов амплитуд нулевых гармоник после перемножения  $f_R(t)$  на  $f_S(t)$  или  $f_N(t)$ .

При увеличении параметра паузы  $b$  мощность сигнала и помехи уменьшаются по различным зависимостям, что обуславливает наличие максимума в отношении мощности полезного сигнала  $P_S$  к мощности помехи  $P_N$ . Анализ зависимостей (рис. 4) показывает, что на положение максимума существенно влияет значение скорости нарастания тока и  $T_f$ . Увеличение  $h$  способствует увеличению отношения сигнал/шум, однако существуют физические ограничения на повышение  $h$ , обусловленные особенностями процесса измерения в электромагнитных расходомерах и электродными процессами. Оптимальное (максимальное) значение характеристик  $SNR(b)$  подвержено влиянию как  $T_f$ , так и  $h$ .

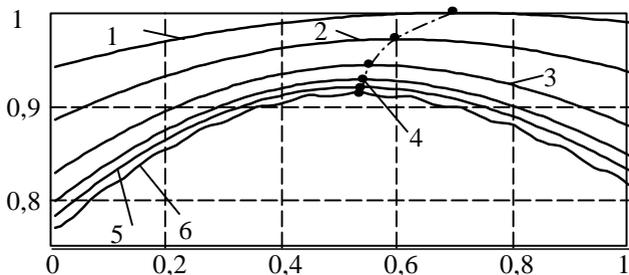


Рис. 4. Нормализованная зависимость отношения сигнал/шум для различных  $b/b_{\max}$  при  $T_f = 0,625T/(2\pi)$ . 1 —  $h = T/8$ ; 2 —  $h = T/12,5$ ; 3 —  $h = T/25$ ; 4 —  $h = T/50$ ; 5 —  $h = T/100$ ; 6 —  $h = T/10000000$

**Библиографический список**

1. **Оробей И.О.** и др. Измеритель электрокинетического потенциала / И.О. Оробей, Д.А. Гринок, С.Е. Жарский, И.Ф. Кузьмицкий // Приборы и техника эксперимента, –2005, №3, – С. 1–4.
2. **Оробей И.О.** и др. - Электромагнитный измеритель микрорасходов / И.О. Оробей, Д.А. Гринок, С.Е. Жарский, И.Ф. Кузьмицкий // Датчики и системы - № 3, 2005, – С. 46–49.
3. **Ж. Макс.** Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. – М: Мир. – 1983, – С.312.

## **Секция 23. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Председатель – д.т.н., профессор **Полетаев В.А.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Волкова М.Ю.**

*Е.Э. Ильина, студ.; Е.С. Шильцев, студ.;  
рук. Н.В. Третьякова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

### **СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

Одно из базовых восприятий людьми явлений внешнего [мира](#) – это [стойкость](#) и надежность металлических [изделий](#) и [конструкций](#), стабильно сохраняющих свою функциональную форму продолжительное время. Однако, существует ряд [материалов](#), которые при [нагреве](#), после предварительной [деформации](#), демонстрируют явление возврата к первоначальной форме. Эти сплавы обладают особым свойством, позволяющим им проявлять своеобразную память. Этот эффект нашел практическое применение, создан новый класс сплавов, обладающих *эффектом памяти формы*.

Сущность эффекта памяти формы заключается в следующем: если образец со структурой мартенсита подвергнуть деформации, то последующий нагрев выше температуры начала обратного превращения сопровождается полным возвратом образца к первоначальной форме, одновременно происходит возврат всех физико-механических свойств.

Почему так происходит?

В исходном состоянии материал имеет определенную структуру. При деформации (например, изгибе) внешние слои материала вытягиваются, а внутренние – сжимаются. Эти вытянутые структуры – мартенситные пластины. При нагреве начинает проявляться термоупругость мартенситных пластин, в них возникают внутренние напряжения, которые стремятся вернуть структуру в исходное состояние, то есть сжать вытянутые пластины и растянуть сплюснутые. В результате этого материал в целом проводит автодеформацию в обратную сторону и восстанавливает свою исходную структуру, а вместе с ней и форму. В процессе проявления эффекта памяти формы участвуют мартенситные превращения двух видов — прямое и обратное. При высоких скоростях охлаждения аустенита нагретых выше критических температур сталей протекает прямое мартенситное превращение, одной из основных особенностей которого является бездиффузионный характер. Состав исходного аустенита и образующегося мартенсита одинаков. В высоколегированных безуглеродистых сплавах железа и некоторых сплавах цветных металлов при нагреве после закалки возможно бездиффузионное превращение мартенсита в аустенит. При этом в интервале превращения состав фаз остается постоянным. Превращение сопровождается образованием обратного рельефа, что характеризует ориентированность превращения. Его называют обратным мартенситным превращением. Это возможно благодаря высокому содержанию легирующих элементов, что значительно снижает температуру фазового равновесия и  $\alpha_m \rightarrow \gamma$ -превращение протекает в условиях, когда распад мартенсита не происходит. Каждое превращение проявляется в своем температурном интервале:  $M_H$  и  $M_K$  — начало и конец прямого мартенситного превращения при деформации,  $A_H$  и  $A_K$  — начало и конец обратного мартенситного превращения при нагреве. Температурный интервал обратного мартенситного превращения выше температуры фазового равновесия. Процесс перестройки  $\gamma \rightarrow \alpha_m$  точно повторяется при обратном  $\alpha_m \rightarrow \gamma$ -превращении, поэтому локальная деформация, возникшая при прямом превращении, полностью исчезает при обратном. Температуры мартенситных превращений являются функцией марки сплава и его химического состава. Любые изменения химического состава сплава ведут к сдвигу этих температур. Поэтому необходимо строго выдерживать химический состав сплава для однозначного функционального проявления эффекта памяти формы.

Возможны реверсивные эффекты памяти формы, когда материал при одной температуре «вспоминает» одну форму, а при другой тем-

пературе — другую. Чем выше температуры обратного мартенситного превращения, тем в меньшей степени выражен эффект памяти формы.

### **Материалы с эффектом памяти формы**

Лидером среди материалов с памятью формы по применению является никелид титана *NiTi* (**нитинол**), содержащий 55 % никеля. Температура плавления – 1240–1310 °С, плотность – 6,45 г/см<sup>3</sup>. Сплав является хорошим конструкционным материалом, он легкий, прочный, пластичный, коррозионностойкий. имеет хорошие характеристики формозапоминания, высокие коэффициент восстановления формы и восстанавливающую силу (деформация до 8 % может полностью восстанавливаться), хорошую совместимость с живыми организмами.

К недостаткам никелида титана следует отнести: необходимость использования вакуумного оборудования при производстве для предотвращения реакции с азотом и кислородом воздуха; затрудненная обработка при изготовлении деталей, особенно резанием, из-за высокой прочности; высокая цена.

Эффект памяти формы обнаружен более чем у 20 сплавов. Кроме никелида титана эффект памяти формы обнаружен в системах: золото–кадмий; медь–цинк–алюминий (преимущества, по сравнению с никелидом титана: можно выплавлять в обычной атмосфере, легко обрабатывается резанием, цена в пять раз ниже; недостатки: хуже по характеристикам формозапоминания, ниже механические свойства и коррозионная стойкость); медь–алюминий–никель; железо–марганец–кремний (сплавы этой системы наиболее дешевые) и др. Эффект памяти формы принципиально возможен у любых материалов, претерпевающих мартенситные превращения, в том числе и у таких чистых металлов как титан, цирконий и кобальт.

### **Применение материалов с эффектом памяти формы**

Изготавливаются втулки для соединения труб гидравлической системы военных [самолетов](#) ([фирма](#) «Рейхем Корпорейшен», США).

Функциональными элементами втулки являются внутренние выступы. Втулку в исходном состоянии, при температуре 20 °С, помещают в [криостат](#), где при температуре –196 °С [плунжером](#) развальцовываются внутренние выступы. Холодная втулка становится изнутри гладкой. Специальными клещами втулку вынимают из криостата и надевают на концы соединяемых [труб](#). При [комнатной температуре](#) внутренние выступы «вспоминают» свою исходную форму, выпрямляются и врезаются во внешнюю поверхность соединяемых труб. Получается прочное [вакуумплотное соединение](#), выдерживаю-

щее давление до 800 атм. Этот тип соединения заменяет сварку и предотвращает такие недостатки сварного шва, как неизбежное разупрочнение металла и накопление дефектов в переходной зоне между металлом и сварным швом. Такие втулки используются в авиационной, космической и автомобильной технике. Сплавы с эффектом памяти формы широко применяются в медицине для изготовления зажимов для защемления слабых вен, искусственных мышц, которые приводятся в действие электрическим током, крепежных штифтов, для фиксации протезов на костях и др.

Высокая эффективность превращения работы в тепло при маршевых превращениях предполагает использование таких материалов не только как высокодемпфирующих, но и в качестве рабочего тела холодильников и тепловых насосов. Также их применяют для изготовления регулируемых клапанов охлаждающих и нагревательных устройств, тепловых машин, разнообразного зажимного инструмента.

#### Библиографический список

1. Гуляев, А.П. Металловедение. / А.П. Гуляев. –М.: Металлургия, 1986. – 647с.
2. Тихонов, А. С. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении. / А.С. Тихонов, А.П. Герасимов, И.И. Прохорова. – М.: Машиностроение, 1981. — 81 с.

*А. В. Зудова, студ.;*  
*рук. М.Ю. Волков., к. т. н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭТАПА СОЗДАНИЯ ПРЕСС-ФОРМ НА ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗДЕЛИЯ

Перед изготовлением резиновой пресс-формы необходимо проанализировать преимущества и недостатки всех существующих методик изготовления резиновых форм.

Во-первых, выбрать тип резины: каучуковая или силиконовая. Достоинство каучуковой резины в том, что при ее применении всегда можно прожечь в форме то место, которое не устраивает в модели, например, дополнительный литниковый ход, либо утолстить тонкую перемычку. При использовании силиконовой резины осуществление данной операции становится проблематичным, зато силикон обеспечивает лучший отпечаток модели.

Во-вторых, необходимо определиться в количестве деталей, которые будут находиться в одной резиновой пресс – форме. В модели для массовых украшений каждая дополнительная деталь ведет к усложнению процесса монтировки изделий, и влечет за собой дополнительные пайки и подгонки, возрастают затраты модельной резины и т. д.

В-третьих, необходимо определить место подвода металла, т.е. литниковую систему. Необходимо учитывать геометрические параметры изделия, количество изделия и текучесть металла.

В-четвертых, не забывать о том, что размеры эталона, который помещается в резиновую пресс-форму, должны превышать размеры готового изделия на 5-6%. Данные размеры идут с учетом общей усадки металла при затвердевании отливок и припуска на механическую обработку.

В-пятых, определить последующее извлечение готовых изделий из резиновой пресс-формы без значительных деформаций и последствий. Различают разрезные и разъемные пресс-формы.

В рамках исследований, перед изготовлением резиновой пресс-формы была создана восковая мастер модель – эталон (рис.1). Образец-эталон изделия или его отдельный элемент выполнены из воска марки Ferris, с учетом художественных требований, а чистота поверхности соответствует 8-9 классу. При изготовлении образца-эталона учитывается то, что при последующей отливке по выплавляемой модели металл будет давать усадку. Поэтому предусмотрены припуски, которые определяются опытным путем, но не более 5-6% заданной размерной величины.



**Рис.1. Восковая мастер модель – эталон**

Восковую мастер модель укладывают на заранее подготовленную пластину пластилина рельефом вверх вместе с литниками. При этом все отверстия и поднутрения заклеивают. На данную пластину аккуратно накладывают несколько слоев силиконовой резины.

Используется силиконовая резина Пентэласт-710-двухкомпонентный материал (компаунд), состоящий из основы (пасты) и отвердителя (катализатора), отверждающихся после смешения до резиноподобного состояния при комнатной температуре. Данная силиконовая резина используется для изготовления форм для литья из воска и гипса. После нанесения данному составу дают высохнуть в течение суток при комнатной температуре. После высыхания резины на пластину пластилина крепится лист бумаги, свернутый в трубочку, для того, что бы в образовавшуюся форму залить гипсовую смесь. Для гипсовой смеси используется гипс формовочный марки Г6 БШ. Для приготовления гипсовой смеси нужной консистенции необходимо 50-60 % воды. Когда раствор готов, его заливают в заранее подготовленную форму. Процесс высыхания длится 40-60 минут при комнатной температуре. Затем лист бумаги и пластилин удаляются, и получается первая готовая полуформа.

Резиновая пресс- форма для второй полуформы готовится по аналогии с первой (рис.2). Затем первая гипсовая полуформа смазывается воском, что бы ни возникло трудностей при раскрытии формы. И первая полуформа заливается гипсовым раствором по той же технологии, что описана ранее. После высыхания гипсового раствора две полуформы раскрываются и оттуда удаляются восковые мастер-модели. В резиновой пресс- форме прорезаются отверстия для того, что бы заливать воск. Для заполнения расплавленным воском резиновых пресс-форм с целью создания выплавляемых моделей используется инжектор восковой электронный (PI-46) (рис.3).



Рис.2. Создание гипсовой формы: а) гипсовая форма в закрытом виде; б) гипсовая форма в открытом виде

В инжекторе используется литейный воск красного цвета марки Ferrix Mold – A – Wax. В готовую резиновую пресс-форму заливается воск, затем он остужается под струей холодной воды.

Полуформы раскрываются, и готовые восковые модели удаляются из резиновой пресс-формы. Восковые модели получаются достаточно хорошего качества, но требуют доработки: удаления излишков воска и прорезки отверстий. Таким способом можно получать большое количество восковых моделей.



Рис.6. Инжектор восковой

В ходе проделанной работы, были изучены и проанализированы основные этапы, а также преимущества и недостатки всех существующих методик изготовления резиновых форм.

*Т. В. Волкова, студ.; М.Ю.  
рук. Волкова к. т. н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСАДКИ МЕТАЛЛОВ ПРИ СОЗДАНИИ ИЗДЕЛИЯ**

Известно, что литьем (или литейным производством) называют метод производства, при котором изготавливают фасонные заготовки деталей путем заливки расплавленного металла в заранее подготовленную литейную форму, полость которой имеет конфигурацию заготовки детали.

Основной задачей литейного производства является изготовление литейных сплавов отливок, имеющих разнообразную конфигурацию с максимальным приближением их формы и размеров к форме и размерам детали. Но при литье невозможно получить отливку, форма и размеры которой соответствует форме и размерам детали. Общее уменьшение объема сплава в процессе усадки отливки дают три составляющие - наружная усадка, усадочная раковина и пористость.

Наружная усадка - изменение наружных размеров и объема. Усадочная раковина – полость в теле отливки или прибыльной части, образующаяся вследствие некомпенсированной объемной усадки при затвердевании. Различают внутренние раковины; образующиеся обычно в тепловых узлах, и наружную раковину, которая может быть открытой или закрытой (т.е. под коркой металла). Размер усадочной раковины зависит от усадочных свойств сплава, условий формирования отливки и технологических условий литья. Усадочная пористость – скопление мелких пустот, возникающих в изолированных микрообъемах отливки, обычно в междуосных пространствах дендритов, в условиях отсутствия питания жидким расплавом. Различают рассеянную пористость, распределенную более или менее равномерно по всему объему отливки, и зональную пористость, сосредоточенную в осевых частях, в тепловых узлах и других частях отливки.

Величина линейного и объемного расширения выражается в процентах. Коэффициент линейного и объемного расширения,  $\alpha$ , следовательно, и усадка для [материалов](#) и металлов есть величина постоянная. Усадкой называется уменьшение объема и линейных размеров отливки в процессе ее формирования, а также охлаждения с температуры заливки до температуры окружающей среды. Усадка является одним из важнейших литейных свойств сплавов. Различные материалы и металлы имеют различный коэффициент расширения.

Зная коэффициент усадки используемого [металла](#), следует делать некоторый допуск при изготовлении литейной [формы](#) из [воска](#) на примерную величину усадки.

В литейном производстве различают объемную и линейную усадку. Для удобства усадку обычно выражают в процентах по отношению к первоначальному объему жидкого сплава (объемная усадка) или первоначальным размером в полости формы (линейная усадка). Если при усадке сплава нет препятствий к уменьшению его объема и размеров, то такую усадку называют свободной. Усадка меняется в зависимости от химического состава сплава.

Объемную усадку выражают в процентах по отношению к разности между объемом полости формы и объемом готовой отливки к объему последней, т. е.

$$\varepsilon_{об} = \frac{V_{\phi} - V_{отл}}{V_{отл}} 100\%$$

Соответственно линейная усадка:  $\varepsilon_{лин} = \frac{l_{\phi} - l_{отл}}{l_{отл}} 100\%$ ,

где  $V_{\phi}$  - объем полости литейной формы;  $V_{отл}$  - объем готовой отливки;  $l_{\phi}$  - линейный размер формы;  $l_{отл}$  - соответствующий линейный размер отливки. Приблизительно можно считать, что линейная усадка в 3 раза меньше объемной.

Наибольшее практическое значение имеет линейная усадка, поскольку характеризует изменение геометрических размеров отливки. Процесс усадки сплава при формировании отливки можно разделить на три этапа. Соответственно линейная усадка может быть разделена на три составляющие:

$\varepsilon_{лин} = \varepsilon_{пер} + \varepsilon_{кр} + \varepsilon_{охл}$ , где  $\varepsilon_{пер}$  – усадка при охлаждении сплава от температуры заливки до температуры начала затвердевания (температура ликвидуса);  $\varepsilon_{кр}$  – усадка при затвердевании (от ликвидуса до солидуса);  $\varepsilon_{охл}$  – усадка при охлаждении сплава от температуры окончания затвердевания (температуры солидуса) до температуры окружающей среды. Чем больше каждая из этих составляющих, тем больше суммарная величина линейной усадки.

Практически при изготовлении отливок уменьшение их размеров происходит в условиях затрудненной усадки, при которой препятствиями являются выступающие части формы, стержни и т.д. Поэтому во многих случаях действительная усадка получается меньше, чем свободная. Действительная линейная усадка называется литейной и выражается в процентах.

Литейная усадка – это разность линейных размеров модели и отливки. Она оценивает полное изменение размеров отливки и поэтому наиболее удобна для использования в технологических расчетах и операциях. Литейная усадка зависит не только от свойств и состояния сплава, но также от конструкции отливки и формы, от технологических условий литья и других факторов.

Образцом будущей отливки является мастер-модель. Размеры мастер-модели должны превышать размеры готовой модели (на 5 - 6 %) с учетом общей усадки металла при затвердении отливок и припуска на механическую обработку.

Линейная усадка цветных металлов и сплавов определяется согласно ГОСТ16817 – 71 путем отливки пробы в сухую песчаную или металлическую (полукокильную) форму. Проба представляет собой призматический образец сечением 25 × 25 мм и длиной 130 мм с выемками с обоих концов. В результате усадки при затвердевании образец перемещает подвижную часть формы, что фиксируется стрелочным индикатором.

При литье деталей самым важным является борьба с усадкой сплавов и восковых композиций. Этому подчинены все промежуточные операции: уменьшение усадки восковых композиций, создание специальных компенсационных формовочных масс, система и характер литников и методы плавления сплавов.

Таким образом, анализируя проведенные исследования, сделан вывод:

Усадку восковых композиций уменьшают путем создания смесей с введением карнаубского, монтанного и других восков, а также моделированием деталей не из расплавленной, а из размягченной смеси.

Усадку сплавов компенсируют при помощи специальных компенсационных формовочных масс, которые имеют двойной коэффициент расширения: расширение в процессе затвердевания (0,8—1 %) и свойственное всем телам тепловое расширение при нагревании (0,6-0,75%).

Чем больше удастся уравновесить процент усадки восковых смесей и сплавов металлов расширением формовочных масс, тем точнее и качественнее получается литье.

#### Библиографический список

1. Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. Наука. М.: 1966.
2. Бочвар А.А., Жадаева О.С. Юбилейный сборник трудов Моск. Ин-та цветных металлов, вып.9, Металлургиздат: 1976.
3. Никитина М.Ф., Никитин С.Л. Литейное производство, №2, 1983.

*А.В. Русакова, студ.;  
рук. М.Ю. Волкова, к. т. н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Известно, что цена на возобновляемые ресурсы, в частности на драгоценные металлы (золото, серебро, платина и т.д.), которых всегда было относительно немного, постоянно растет и сказывается на себестоимости художественных изделий, выполненных из этих материалов. Исходя из этого, актуальным является вопрос о создании недорогих аналогов, по внешнему виду не уступающих оригиналу. В современном производстве для создания изделий стало актуально использование гальванических покрытий, где основными являются относительно недорогие материалы. После окончательной обработки на изделие наносят золотой или серебряное покрытие и по внешнему виду становится тяжело отличить его от изделия полностью выполненного из драгметалла.

Процесс нанесения гальванического покрытия состоит из трех этапов: подготовка поверхности, нанесение покрытия и окончательная обработка после покрытия.

Покрытие всегда является последней, заключительной операцией технологического процесса изготовления детали. С покрываемых поверхностей должны быть удалены заусенцы, раковины, окалина, слой ранее нанесенных покрытий и неметаллические включения. Поверхность покрываемого изделия должна быть тщательно обезжирена, а затем промыта в чистой проточной воде. Окислы, всегда имеющиеся на поверхности изделия, должны быть удалены путем травления или декапирования. Наличие окислов сильно снижает прочность сцепления покрытий с металлом изделия. После травления изделие следует тщательно промыть в холодной проточной воде.

После травления и промывки изделие должно быть немедленно погружено в ванну для гальванического покрытия.

В рамках исследований рассматривалось только осаждение драгоценных металлов (золочение и серебрение), так как именно они, по большей части используются в художественной промышленности. Но это лишь малая область применения процесса гальваники, ее использование в настоящее время очень широко.

Серебро легко растворяется в азотной кислоте, слабо — в серной и практически нерастворим в соляной кислоте и в щелочах. Анодное растворение серебра в цианистых растворах протекает беспрепятственно, что используется для его электрополирования. Серебро легко полируется и в полированном состоянии обладает хорошей отражательной способностью.

В соответствии с ГОСТ 2249—43 толщина серебряных покрытий в легких условиях атмосферной коррозии должна быть не менее 5 мк, в средних условиях не менее 10 мк и в жестких — не менее 20 мк.

Поэтому серебрение латунных, медных и предварительно медненных стальных деталей осуществляют обычно из цианистых электролитов по следующей схеме:

1. Промывка ил протирка с растворителями.
2. Монтаж на подвески.
3. Катодное электрообезжиривание.
4. Промывка в горячей воде.
5. Химическое декапирование в серной или соляной кислоте или же анодное декапирование в слабом растворе цианистого калия.
6. Промывка в холодной проточной воде.
7. Амальгамирование или предварительное серебрение в электролите с малым содержанием серебра и с высокой концентрацией свободного цианистого калия. Осаждение ведут с применением никелевых анодов и при завеске деталей под током.
8. Промывка в непроточной холодной воде (улавливание).
9. Серебрение.
10. Первая промывка в холодной непроточной воде (улавливание).
11. Вторая промывка в холодной непроточной воде (улавливание).
12. Отделочная обработка (пассивирование, оксидирование).
13. Промывка в холодной проточной воде.
14. Промывка в горячей воде.
15. Сушка.
16. Контроль.

Для всех электролитов при выходе по току, близком к 100%, скорость осаждения серебра при плотности тока  $0,1 \text{ а/дм}^2$  равна  $3,8 \text{ мк/час}$ . Химическое пассивирование для предохранения серебряных покрытий от окисления и образования сернистых соединений производят в 1-процентном растворе хромпика, без подогрева, в течении 20 мин.

Чернение под старое серебро производят раствором серной печени, которую готовят в цехе сплавлением одной весовой части серы с дву-

мя частями поташа в течении 15—20 мин. Толщина золота при покрытии ювелирных изделий колеблется от 0,25 до 3мкм и лишь в некоторых случаях доходит до 10 мк.

Для золочения применяют цианистые и железистосинеродистые электролиты. Соль для электролитов золочения готовят непосредственно в цехе двумя способами: анодным и химическим растворение металлического золота. Анодный способ проще и экономичнее химического, но пригоден лишь для приготовления цианистых электролитов. При анодном способе растворения золота рабочую ванну наполняют раствором цианистого калия в дистиллированной воде концентрацией 20—30 г/л, подогревают до 70° С, завешивают золотые аноды возможно большей площади (гофрированные) и производят анодное насыщение раствора золотом при плотности тока 1—1,5 а/дм<sup>2</sup>.

При осаждении золотого покрытия на латунь рекомендуется подслоем никеля, который предотвращает диффузию цинка на поверхность золотых покрытий из основного металла. Никелевый подслоем под покрытие золотом и сплавами золотом следует наносить из электролитов, обеспечивающих получение покрытия с низкими внутренними напряжениями.

Таким образом, можно сделать вывод, что [гальванические покрытия](#) из драгоценных металлов и их сплавов широко применяются при заключительной обработке ювелирных изделий для придания им определенного цвета, тона и блеска, создания цветовой гармонии при изготовлении изделий с драгоценными камнями, коррозионной защиты, повышения прочности и твердости. При золочении из экономических соображений пользуются нерастворимыми (угольными, платиновыми или стальными) анодами.

Наилучшими свойствами обладают гальванические покрытия из золота, серебра и их сплавов, полученные из цианистых электролитов, содержащих свободный цианистый калий. Однако при этом возникают проблемы с утилизацией промывных вод и отработанных электролитов, которые содержат свободные цианиды.

Покрытия, нанесенные с использованием нецианистых электролитов (гексаферроцианидных, роданидных, йодидных, пирофосфатных при серебрении и трилонатных, сульфитных, тиосульфатных, триполифосфатных при золочении) не требуют столь строгих мер по соблюдению экологической безопасности, но дают матовые гальванические поверхности и требуют дополнительной полировки, поэтому применяются на изделиях относительно простой конфигурации.

В связи с этим сейчас в промышленности уделяют особое внимание разработке новых полностью бесцианистых электролитов для нанесения блестящих гальванических покрытий.

*Д.В. Журавлев, студ.; А.С. Хахалин, студ.;  
рук. В.Н. Копосов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ САД-СИСТЕМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ**

В настоящее время основной тенденцией в достижении высокой конкурентоспособности западных и российских предприятий является переход от отдельных замкнутых САПР и их частичного объединения к полной интеграции технической и организационной сфер производства. Такая интеграция связывается с внедрением модели компьютерно-интегрированного производства (КИП) или в западной версии CIM (Computer Integrated Manufacturing).

Основой КИП являются: САЕ-системы (автоматизированные системы инженерных расчетов), САД-системы (автоматизированные системы геометрического моделирования и проектирования изделий), САРР-системы (системы автоматизированного проектирования технологических процессов), САМ-системы (системы автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ), РDM-системы электронного документооборота, PLM-системы поддержки жизненного цикла изделия и собственно само оборудование с числовым программным управлением.

Для эффективного использования указанных автоматизированных систем проектирования на промышленных предприятиях и в учебных заведениях важным моментом является их выбор, т.к. в настоящее время на рынке имеется целый ряд таких систем. В данной работе была поставлена задача – проанализировать имеющиеся САД-системы с точки зрения пользователей.

Для анализа САД-систем предлагаются следующие показатели их оценки:

1. Доля продаж на рынке (доверие потребителей).
2. Условия приобретения (количество предлагаемых лицензий (рабочих мест)) и их стоимость.

3. Наличие, условия и стоимость технической поддержки и обучения.
4. Наличие и условия опытной эксплуатации.
5. Наличие и степень ограниченности «открытых» версий.
6. Основные функциональные возможности.
7. Наличие других собственных разработок в рамках интегрированной CAE/CAD/CAPP/CAM/PDM/PLM-системы.
8. Стыкуемость с элементами интегрированной CAE/CAD/CAPP/CAM/PDM/PLM-системы других фирм-разработчиков.
9. Наличие и география сети фирм-дилеров, занимающихся распространением соответствующего программного обеспечения.
10. Наличие и полнота информации о системах, представленной разработчиками в свободном доступе.

На основе имеющейся информации проанализированы следующие CAD-системы: T-FLEX, Компас, AutoCAD, SolidWorks (разных исполнений и комплектаций). Некоторые результаты анализа заключаются в следующем.

Наиболее популярной системой является AutoCAD. Разработчики заявляют о более 10 миллионах пользователей. Системы семейства «Компас» внедрены более чем на 7000 предприятиях, семейства T-FLEX – более чем на 1500 предприятиях.

Средняя стоимость коммерческих CAD-систем T-FLEX, Компас и AutoCAD как в абсолютном, так и в относительном выражении сохраняется на протяжении последних 10 лет. Стоимость 3D систем T-FLEX и Компас составляет порядка 3000 долларов за одно рабочее место, подобных систем AutoCAD – в среднем (в зависимости от комплектации) 4000 долларов. Информация о стоимости SolidWorks 3D на официальном сайте российского представителя компании-разработчика отсутствует. В интернет-магазинах, продающих эти системы, указывается цена за одно рабочее место более 230000 рублей.

Самые выгодные условия для приобретения указанных систем учебными заведениями и отдельными пользователями для некоммерческого использования предлагаются разработчиками AutoCADa. Совершенно бесплатно можно приобрести полнофункциональную версию этой системы. Другие указанные системы предлагаются за небольшую плату с некоторыми функциональными ограничениями.

Функциональные возможности всех этих систем практически одинаковы. В них реализованы многочисленные возможности 3D моделирования и проектирования сборочных единиц, деталей и т.д.

В отличие от компании Autodesk (разработчика AutoCADa) компании «Топ Системы», АСКОН и SolidWorks corp. (разработчики соответственно систем T-FLEX, Компас и SolidWorks) предлагают кроме 3D-систем практически все составляющие интегрированной CAE/CAD/CAPP/CAM/PDM/PLM-системы.

В любом случае при выборе автоматизированных систем проектирования и управления необходимо учитывать весь перечень показателей оценки их эффективности.

*А.Б. Курочкин, студент,  
рук. Н.В. Третьякова, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

При разработке технологического процесса получения изделий из композиционных материалов (КМ) в комплексе решают многие вопросы: выбор материалов арматуры и матрицы, их химическое взаимодействие, смачивание, способы ориентации армирующих волокон и окончательного объединения волокон и матрицы в единое целое и др.

Для армирования композиционных материалов с металлической матрицей (МКМ) используют высокопрочные волокна углерода, бора, карбида кремния и вольфрама, оксидов алюминия и циркония, проволоку из сталей, вольфрамовых и молибденовых сплавов, а также нитевидные кристаллы ("усы"). Волокна в чистом виде применяют редко, на них тонким слоем наносят барьерные и технологические покрытия: барьерные покрытия предназначены для защиты волокна от разрушения в результате физико-химического взаимодействия с матричными сплавами; технологические – для улучшения смачивания волокна матричным расплавом и повышения сил адгезии.

В качестве материала матриц в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств, применяют сплавы на основе алюминия, магния, титана и меди, жаропрочные и жаростойкие сплавы на основе железа, никеля и кобальта, тугоплавкие сплавы на основе вольфрама, мо-

либдена и ниобия. Технологическому процессу получения КМ предшествуют вспомогательные операции: объединение волокон в жгуты или каркасы, получение элементарных соединений матрица – волокно, сборка чередующихся слоев элементов и др. Короткие армирующие элементы вводят в матричные материалы в разориентированном состоянии или предварительно ориентируют их в определенном направлении. Из разориентированных кристаллов, коротких волокон и проволок изготавливают полуфабрикаты: войлок, маты и др. Используют способы войлокования: жидкостные, воздушные, вакуумные и гравитационные. Например, при жидкостном войлоковании коротких волокон, суспензия из питающего бака поступает на сетку, покрытую фильтровальной бумагой. С помощью роликов она проходит над камерами для отсоса жидкости. Прижимными валками войлок уплотняется и поступает в печь, где он просушивается или спекается.

Для получения армирующих элементов с требуемой ориентацией короткие волокна перерабатывают в пряжу, которую можно использовать для непосредственного армирования КМ или шивать нитями в ткань или ленты. Жесткие волокна из вольфрама, молибдена, ниобия и их сплавов, ориентируют в материале матрицы в виде пакетов, листов, рулонов и т.п. Пакеты получают путем послонной укладки рифленой фольги из материала матрицы, армирующих волокон и волокон из материала матрицы. Набранные пакеты определенной высоты соединяют полосами материала матрицы. Ленты получают путем поочередной укладки армирующих и матричных волокон между полосами. В отдельных случаях ленты сматывают в рулоны. Полуфабрикаты выпускаются в виде листов, труб, профилей и т.д. Основой производства полуфабрикатов и изделий из КМ служат препреги, представляющие собой однослойные ленты с одним рядом армирующих волокон или тканей, пропитанных или покрытых материалом матрицы с одной или с обеих сторон. Все технологические способы получения препрегов, полуфабрикатов и изделий из МКМ можно разделить на четыре основные группы: парогазофазные, жидкофазные, твердожидкофазные и твердофазные.

*Парогазофазные способы* применяют для нанесения на волокна, ленты и ткани барьерных или технологических покрытий.

*Жидкофазные способы* используют на всех стадиях производства КМ. К ним относятся протяжка волокон, жгутов и тканей через расплав материала матрицы для получения препрегов; пропитка пакетов препрегов материалом матрицы на стадии получения полуфабрикатов или готовых изделий; плазменные и другие виды газотермического

распыления металлов для получения ленточных препрегов и "корковых" полуфабрикатов, подвергаемых последующему компактированию методами обработки давлением.

Универсальным способом изготовления МКМ является пропитка. Этот способ имеет ряд преимуществ перед твердофазными способами: более высокую производительность; отсутствие силового воздействия на компоненты, что обеспечивает возможность получать крупногабаритные изделия, в том числе сложного фасонного профиля; возможность создания непрерывности процесса пропитки, механизации и автоматизации технологического процесса. В зависимости от условий обеспечения смачиваемости системы «армирующий каркас – расплав материала матрицы» применяют две схемы пропитки: самопроизвольную пропитку и пропитку под давлением. Самопроизвольную пропитку осуществляют путем заливки расплавленного материала в форму с уложенным в ней каркасом из армирующих волокон. Более производительным является способ непрерывной протяжки армирующих каркасов через расплав материала матрицы. На этой схеме основаны технологические процессы непрерывного литья полуфабрикатов из КМ. Преимущества этого способа производства КМ в его непрерывности, малом времени контакта волокон с расплавом, малых трудозатратах и капиталовложениях. Перспективной считается вертикальная схема пропитки, при которой волокна, ленты, препреги проходят через ванну с расплавом и на выходе через фильеру получают форму сечения полуфабриката. Поэтапное сужение сечения фильеры на выходе позволяет получать полуфабрикаты с высоким объемным содержанием армирующих волокон.

Принудительную пропитку используют при недостаточной смачиваемости в системе «матрица – волокно» или для ускорения процесса пропитки для компонентов с удовлетворительной и хорошей смачиваемостью. При вакуумной пропитке КМ заполнение пор расплавленным металлом осуществляется за счет разности между атмосферным давлением и давлением, созданным в порах при вакуумировании. Вертикальное расположение тигля обеспечивает ускорение процесса протекания за счет дополнительного давления массы расплава.

Разновидностью пропитки под давлением является создание избыточного давления сжатым газом на зеркало расплавленного металла. Эффективность процесса пропитки значительно повышается при наложении ультразвуковых колебаний.

*Твердожидкофазные способы* используют для получения полуфабрикатов и изделий из КМ методами горячего прессования, волочения и

прокатки. Необходимым условием является нанесение матричного материала на полуфабрикаты в количестве, достаточном для равномерной пропитки волоконного каркаса расплавом. Прессование осуществляется в интервале кристаллизации материала матрицы. Прессование КМ в условиях твердожидкого состояния матрицы способствует снижению давления и уменьшает вероятность разрушения волокон.

*Твердофазные способы* используют для компактирования изделий из полуфабрикатов. Основным критерием применимости этих способов является возможность деформирования компонентов КМ. При этом совместное пластическое деформирование не должно приводить к разрушению арматуры. Если в качестве арматуры выбраны волокна или проволоки со значительным запасом пластичности, то уплотнять МКМ можно ковкой, прокаткой, импульсным прессованием и др. К процессам предъявляют высокие требования: высокая чистота поверхностей контакта, отсутствие оксидных пленок и т.д.

На практике применяют пропитку, непрерывное литье, прокатку.

*Т.В. Волкова, студ.;*

*рук А.С. Орлов, к.т.н., ст. препод.*

*(ИГЭУ, г.Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА ДЛЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ**

Литьё - технологический процесс изготовления заготовок (реже - готовых деталей), заключающийся в заполнении предварительно изготовленной литейной формы жидким материалом ([металлом](#), [сплавом](#), [пластмассой](#) и т. п.) с последующим его затвердеванием.

Известно множество разновидностей литья:

- в песчаные формы (ручная или машинная формовка);
- в многократные (цементные, графитовые, асбестовые формы);
- в оболочковые формы;
- по выплавляемым моделям;
- по замораживаемым ртутным моделям;
- центробежное литье;
- в [кокиль](#);

- литьё под давлением;
- по газифицируемому (выжигаемому) моделям;
- вакуумное литьё;
- [электрошлаковое](#) литьё;
- литьё с утеплением.

Рассмотрим один из видов литья - литье по выплавляемым моделям. Существует несколько методов изготовления формы. Один из них изготовление керамической формы на основе жидкого стекла.

Этот способ применяется в случаях изготовления деталей высокой точности. Из легкоплавкого материала: [парафин](#), [стеарин](#) и др., (в простейшем случае — из [воска](#)) изготавливается точная модель изделия и литниковая система. Модель обезжиривается керосином, раствором пищевой соды или хозяйственным мылом. Затем модель окунается в жидкую суспензию на основе связующего и огнеупорного наполнителя. Для раствора требуются компоненты: кварцевый песок и разбавленное жидкое стекло, в соотношении 60 % и 40% соответственно.

Наиболее употребительным является натриевое стекло содовой варки состава  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ . Плотность жидкого стекла зависит от количества воды в нем и определяется ареометром. Жидкое стекло нуждается в предварительной подготовке для ускорения образования коллоидального кремнезема в облицовочном слое формы. Жидкое стекло перед употреблением подготавливают одним из двух способов:

- 1) разбавляют водой до необходимого удельного веса;
- 2) повышают модуль обработкой хлористым аммонием.

Требуемое для разбавления жидкого стекла количество воды определяется по формуле:

$$V_B = V_C \frac{Y_C - Y_{p.c}}{Y_{p.c} - 1}$$

$V_C$  - объем исходного разбавляемого жидкого стекла в л;

$Y_C$  - плотность исходного жидкого стекла в  $\text{г/см}^3$ ;

$Y_{p.c}$  - необходимая плотность разбавленного жидкого стекла в  $\text{г/см}^3$ .

Обычно разбавление жидкого стекла производят до плотности 1,32  $\text{г/см}^3$ .

За исходный твердый материал берется кварцевый песок - наиболее распространенный материал для огнеупорных покрытий, что объясняется его распространенность в природе, низкой стоимостью, достаточной огнеупорностью (температура плавления  $1700^\circ\text{C}$ ) для большинства металлов и простотой подготовки для использования.

Облицовочные огнеупорные покрытия являются наиболее ответственной частью литейной формы, а иногда и всей формой, поэтому они должны соответствовать разнообразным требованиям:

1) обеспечивать хорошее смачивание поверхностей моделей без появления пузырьков и пор в образующемся слое и в дальнейшем не отставать от моделей;

2) не вступать в химическое взаимодействие с модельным составом и металлом;

3) не коробиться, не образовывать трещин и иметь малую постоянную величину расширения и сжатия при нагревании и охлаждении форм;

4) прочно соединяться с наполнителем и не отставать от него при прокаливании и заливке формы;

5) обладать достаточной прочностью, чтобы не разрушаться и не деформироваться: при выплавлении модели и прокаливании формы — под действием веса удаляемого из формы модельного состава и формовочного материала (наполнителя), при заформовывании — под действием веса формовочного материала и уплотняющих его усилий, при заливке — под действием жидкого металла;

6) иметь достаточную огнеупорность (для стали более 1700° С);

7) иметь гладкую поверхность (шероховатость не ниже 4-го класса);

8) иметь высокую газопроницаемость (не должно быть газообразования при заливке металла);

9) легко отделяться от отливки;

10) применяемые материалы должны быть дешевыми и недефицитными.

На модельный блок наносят суспензию и производят обсыпку, так наносят от 6 до 10 слоёв. С каждым последующим слоем фракция зерна обсыпки меняются для формирования плотной поверхности оболочковой формы. Сушка каждого слоя занимает не менее получаса, для ускорения процесса используют специальные сушильные шкафы. Особым этапом при изготовлении керамической формы на основе жидкого стекла является закрепление. Оно производится окунанием формы в 18% раствор хлористого аммония, в котором он выдерживается в течение 0,5-2 минут. Выделяющийся кремнезем скрепляет зерна пылевидного кварца и песка присыпки, образуя твердую корку. что позволяет керамической форме быстро затвердеть и сохранить форму при дальнейшем выплавлении модельного состава. Из сформировавшейся оболочки выплавляют модельный состав: в

горячей воде, выжиганием, паром высокого давления. Для предупреждения омыления формы в воду добавляют соляную кислоту. После сушки и вытопки блок прокаливают при температуре примерно 1000°С для удаления из оболочковой формы веществ, способных к газообразованию. После чего оболочки поступают на заливку. Перед заливкой блоки нагревают в печах до 1000°С. Нагретый блок устанавливают в печь и разогретый металл заливают в оболочку. Залитый блок охлаждают в термостате или на воздухе. Когда блок полностью охладится, его отправляют на выбивку. Ударами молота по литниковой чаше производится отбивка керамики, далее отрезка литниковой системы. Таким образом получаем отливку.

Хотя данный метод не является особо распространенным в производстве, его нельзя не рассматривать как один из способов изготовления отливок.

В целом преимущества способа литья по выплавляемым моделям заключается в: возможности изготовления деталей из сплавов, не поддающихся механической обработке; получении отливок с точностью размеров до 11—13 квалитета и шероховатостью поверхности Ra 2,5—1,25 мкм, что в ряде случаев устраняет обработку резанием; возможности получения узлов машин, которые при обычных способах литья пришлось бы собирать из отдельных деталей. Литье по выплавляемым моделям используют в условиях единичного (опытного), серийного и массового производства.

*В.А. Соколов курсант, Ю.Н. Садовников, студ.;*  
*рук. В.В. Смирнов, В.В. Киселев*  
*(ИиГПС МЧС России, г. Иваново)*

## **К ВОПРОСУ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОЦИСТЕРН ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ**

Автоцистерны, а также заправщики для специальных жидкостей и нефтепродуктов монтируются на автомобилях, полуприцепах и прицепах. Эти резервуары изготавливаются чаще всего из стали и имеют эллиптическое, чемоданное или круглое сечение. В некоторых случаях цистерны выполняют с переменным сечением, либо в составе одноосного тягача, либо на шасси прицепов и полуприцепов. Это

обеспечивает более эффективное распределение нагрузки как по осям базового полуприцепа, так и на седельное устройство тягача. А благодаря низкому центру тяжести придается дополнительная устойчивость при совершении транспортировки с полной массой. Эллиптическое и чемоданное сечение являются наиболее распространенными, так как они позволяют обеспечить снижение центра масс и благодаря этому улучшается устойчивость самой автоцистерны.

Из-за существенного увеличения объемов реализации и перевозок нефтепродуктов автомобильным транспортом особое внимание необходимо уделить требованиям безопасности конкретных образцов автомобилей для транспортировки нефтепродуктов.

Следует заметить, что опасные ситуации могут быть связаны с неправильным наливом топлива в [автоцистерны](#) на нефтебазы, сливом нефтепродукта на АЗС или нефтебазе, а также могут возникать непосредственно при транспортировке нефтепродукта. Имеет место также создание аварийных ситуаций при движении пустых автоцистерн или при их обслуживании.

Основные требования безопасности направлены в основном на снижение риска возможного возникновения аварий и катастроф при эксплуатации автоцистерн. Кроме того, необходимо по возможности исключить поражения и травмы персонала, повреждения автоцистерны и сопрягаемых изделий, обеспечить поддержание работоспособности и эффективности применения транспортного средства, исключить и свести до допустимых пределов вредные воздействия на окружающую среду. Все эти требования обязательно должны приниматься в качестве исходных при оценке безопасности автоцистерны.

Согласно современным международным требованиям безопасности перевозок опасных грузов для безопасного функционирования автоцистерн необходимо выполнять целый комплекс организационно-технических мероприятий грузоотправителями, грузоперевозчиками и грузополучателями. Различают следующие основные виды безопасности в зависимости от природы действия опасных и вредных факторов: взрывобезопасность, пожаробезопасность, механическая безопасность, токсическая безопасность, электробезопасность и функциональная безопасность. Оценка безопасности автоцистерны проводится на всех этапах ее жизненного цикла, начиная с разработки и изготовления транспортного средства.

Опрокидывание автомобиля может произойти при движении его на повороте или смены полосы движения при превышении некоторой скорости движения в результате разгрузки колёс одной стороны автомобиля.

Для определения скорости опрокидывания ( $V_{\text{опр.}}$ ) автомобиля проводился сбор и анализ необходимых расчетных данных. Приняли вес оснащённого автомобиля АЦ –  $G=18700$  Н; ширину колеи АЦ –  $b=2,3$  м; высоту расположения центра тяжести  $h=1,5$  м.

На рис. 1 показана траектория движения автоцистерны на пути следования при проходе Т-образного перекрестка.

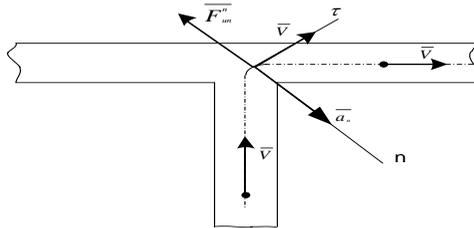
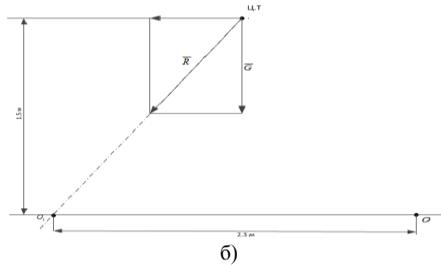
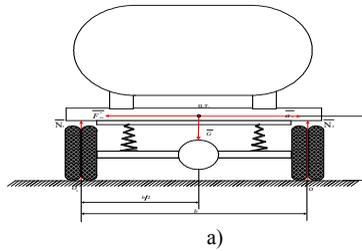


Рис 1. Схема движения я автомобиля (АЦ) на повороте.

Если принимать во внимание, что автомобиль проходит перекресток с постоянной скоростью, то полное его ускорение будет соответствовать нормальной составляющей. При движении АЦ по дуге окружности возникает нормальная составляющая силы инерции, которая и может привести к опрокидыванию автомобиля, если он будет двигаться со скоростью превышающей критическую скорость, которую будем называть – скоростью опрокидывания  $V_{\text{опр.}}$ . Для определения скорости опрокидывания автомобиля предлагаем следующую расчетную схему (рис. 2).

Будем считать, что полотно дороги представляет собой горизонтальную плоскость, также пренебрегаем фактором заноса и трением. При решении данной задачи примем принцип Даламбера, согласно которому при приложении силы инерции система будет находиться в равновесии, следовательно, задачу динамики можем решить с помощью уравнений статики. Опрокидывание произойдёт если  $N_2 = 0$ , т.е. произойдёт отрыв колеса.



**Рис 2. Расчетная схема движения автомобиля:**  
**а – силы, действующие на автоцистерну в повороте, б – графическое выражение**  
**критерия устойчивости**

Составим уравнение:

$$\sum M_{o_1}(F) = 0 : F_{un}^n \cdot h - G \cdot \frac{b}{2} = 0 \quad (1)$$

Опрокидывание произойдет если:

$$M_{o_1}(\vec{F}_{un}^n) \geq M_{o_1}(\vec{G}) \quad (2)$$

Уравнение (2) можем представить в следующем виде:

$$M_{o_1}(\vec{F}_{un}^n) = (F_{un}^n \cdot a_n) \cdot h, \text{ где} \quad (3)$$

$$M_{o_1}(\vec{F}_{un}^n) = \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot h, \quad M_{o_1}(\vec{G}) = G \cdot \frac{b}{2} \quad (4)$$

Подставив выражения (4) в неравенство (2) получаем значение скорости опрокидывания автомобиля:

$$V \geq \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot b}{2 \cdot h}} \quad (5)$$

Определим скорость, при которой произойдет опрокидывание автоцистерны при радиусах поворота: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 (м) и величину силы инерции.

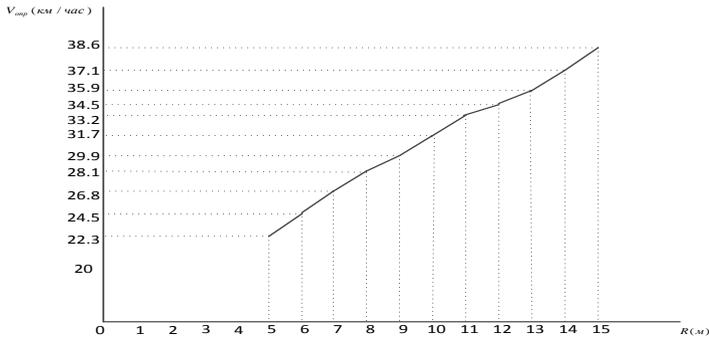


Рис. 3. Схема зависимости  $V_{опр.}$  от  $R_{пов.}$  (км/час)

Проблема обеспечения безопасности движения транспортных средств, перевозящих жидкости весьма актуальна. В связи с этим разрабатываются мероприятия по снижению влияния колебаний жидкости внутри резервуаров на динамику транспортного средства. Первый способ предполагает установку внутренних перегородок. Второй заключается в изменении формы резервуара цистерны. Третий вариант основан на введении в подвеску базового шасси или в крепление цистерн к раме автомобиля специальных элементов с целью изменения жесткости.

Все перечисленное выше относится к техническим усовершенствованиям никак не затрагивающим человеческий фактор. Устойчивость и управляемость пожарного автомобиля во многом зависит от водителя. Данная работа по определению скорости опрокидывания от радиуса поворота призваны оказать помощь водителю при выборе скоростного режима при движении на пожар.

#### Библиографический список

1. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 2001.

*И.Е. Смирнов, курсант,  
рук. В.В. Киселев, А.В. Топоров, П.В. Пучков  
(ИиГПС МЧС России, г. Иваново)*

## **УЛУЧШЕНИЕ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПОЖАРНОЙ ТЕХНИКЕ**

Пожарная техника выходит из строя в основном в результате износа подвижных деталей. Помимо затрат на их ремонт при износе, увеличивается расход топлива, смазочного материала и запасных частей. В автомобилях на преодоление трения расходуется более половины потребляемого ими топлива [1].

Одним из возможных путей снижения износа трущихся поверхностей является улучшение используемых в пожарной технике смазочных материалов, в частности эту проблему можно решить путем разработки металлосодержащих присадок для смазок.

Из множества металлосодержащих соединений, которые способствуют снижению износа, большинство присадок имеют один существенный недостаток. Металлические компоненты данных присадок находятся в масле в виде мелких частиц, которые не способны проходить через системы фильтров, что резко снижает их круг применения, другими словами такие присадки не являются универсальными, они, как правило, имеют узко направленную область применения [2].

Все вышеизложенное предопределило задачи исследований и цель данной работы, которая заключалась в разработке присадок к маслам на основе стеаратов мягких металлов (никеля, олова, меди и кобальта), для эксплуатации в двигателях пожарной техники.

Исследование триботехнических характеристик проводилось с помощью экспериментальной установки - триботехнический маятник [3].

При исследовании износостойкости образца в моторном масле с разработанной присадкой режимы трения были выбраны усредненными, применительно к режимам работы большинства узлов трения машин.

Определение линейного износа проводилось методом "искусственных баз" по заранее нанесенным отпечаткам на твердомере коническим твердосплавным индентором.

Для оценки и сравнения разработанной присадки были исследованы следующие триботехнические характеристики – зависимость коэф-

фициента трения от нагрузки и зависимость интенсивности изнашивания от приложенной нагрузки при фиксированном пробеге. Эти характеристики определяют границы работоспособности пары трения, стойкость материалов к изнашиванию при различных режимах трения, и как следствие ресурс и срок службы узлов трения [4].

На рис. 1, 2 представлены результаты проведенных испытаний разработанной присадки в моторном масле М20.

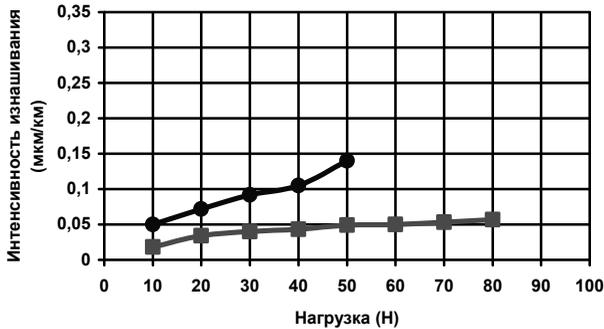


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нагрузки:  
 ● — моторное масло М-20;  
 ■ — масло моторное М-20 с разработанной присадкой

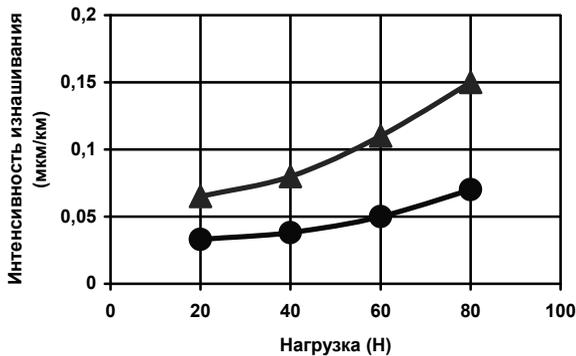


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания поверхности трения от нагрузки:  
 ▲ — моторное масло М-20;  
 ● — масло моторное М-20 с разработанной присадкой

Нагрузка при испытаниях повышалась ступенчато до резкого увеличения момента трения, путь трения при смазке маслом с присадками составлял 20 км. Смазочная композиция вводилась в зону трения капельным способом 8 – 10 капель в минуту. Испытания проводились при скоростях скольжения от 0,5 м/с до 2 м/с.

Анализ зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- введение присадки в испытуемое масло позволяет в полтора раза увеличить нагрузочную способность и снизить коэффициент трения до двух раз.

- при введении в базовые масла разработанной присадки наблюдается снижение интенсивности износа до 2 раз.

Проведенные эксперименты дали возможность предполагать, что на стальных поверхностях трения образуется пленка мягких металлов. При помощи металлографического микроскопа с увеличением 600 раз, производилось фотографирование поверхностей трения. Полученные фотографии позволили зафиксировать на поверхности стальных образцов наличие пленки мягких металлов.

Полученные показатели позволяют предполагать, что использование металлоплакирующих присадок позволит добиться положительных результатов, а именно продлить ресурс работы узлов автотранспортной техники МЧС России до 2 раз, резко снизить аварийные разрушения узлов, сократить затраты на внеплановые ремонты пожарных автомобилей, экономить горюче-смазочные материалы.

#### **Библиографический список**

1. **Киселев В.В.**, Мельников В.Г. Исследование свойств разработанных присадок на основе солей мягких металлов// Эффект безызносности и триботехнологии. – 2004. – №1. – С. 16 – 20.
2. **Киселев В.В.**, Топоров А.В., Пучков П.В. Перспективы использования модернизированных смазочных материалов в пожарной и аварийно-спасательной технике// Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2011. - №3. – С. 23–29.
3. **Киселев В.В.**, Полетаев В.А. Исследование триботехнических характеристик металлосодержащих присадок к маслам, используемым в электрических машинах// Вестник ИГЭУ. – 2011. – Выпуск 2. – С. 65 – 67.
4. **Киселев В.В.**, Топоров А.В., Пучков П.В. Повышение надежности пожарной техники применением модернизированных смазочных материалов// Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2010. - №3. – С. 24–28.

*А.Е. Акулов, курсант,  
рук. П.В. Пучков, А.В. Топоров, В.В. Киселёв  
(ИиГПС МЧС России, г. Иваново)*

## **ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Стали являются основным конструкционным материалом для изготовления механизмов, машин и конструкций, работающих при низких температурах. Стали для этих условий должны обеспечивать необходимую прочность в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью, обладать малой чувствительностью к концентраторам напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению. Так как на большей территории России в зимний период времени температура понижается до  $-30^{\circ}\text{C} \div -50^{\circ}\text{C}$ , то проблема использования и изготовления подходящих сталей для климатических условий России очень актуальна и важна.

Для большинства металлов способность к пластической деформации в значительной степени зависит от температуры. С понижением температуры эта способность для большинства металлов и сплавов уменьшается. При критических температурах резко возрастает сопротивление сдвигу, металл переходит в хрупкое состояние и разрушается без признаков пластической деформации. Сопротивление такому разрушению называется хрупкой прочностью, а свойство металлов хрупко разрушаться со снижением температуры называется хладноломкостью. Обратное понятие хладноломкости – хладностойкость. Явление хладноломкости, т.е. хрупкого разрушения, связанного с действием низких температур, впервые стало предметом широкого обсуждения в связи с бурным строительством железных дорог в конце XIX века. В настоящее время нередко случаи разрушения железнодорожного полотна по причине образования трещин в зимний период. Результаты исследований показали, что металлы с объемноцентрированной кубической решеткой (например: железо, хром, вольфрам), а также некоторые металлы с гексагональной решеткой (например: титан, цинк, кадмий) при снижении температуры быстро охрупчиваются. У металлов с более плотно упакованной решеткой гранцентрированного куба (например: медь, никель, алюминий, магний, свинец) с понижением температуры вязкость сохраняется, а иногда даже повышается.

Подобные закономерности имеют и многокомпонентные сплавы, имеющие соответствующие кристаллические решетки. Явление охрупчивания с точки зрения природы кристаллических решеток объясняется отсутствием плоскостей скольжения у металлов с объемно-центрированной кубической и гексагональной решеткой. Трещины образуются в местах встречи или пересечения полос двух систем скольжения. При этом возможность хрупкого разрушения тем больше, чем сильнее препятствия, тормозящие свободное передвижение групп дислокаций. Если скорость распространения микротрещин превысит скорость пластической деформации, то наступит хрупкое разрушение. Пути сдвигов примерно равны диаметру зерна, поэтому измельчение зерна способствует увеличению интервала пластического состояния. Поэтому углеродистые и легированные перлитные и мартенситные стали, после закалки с отпуском при наличии очень мелкого действительного зерна имеют более низкие критические температуры хрупкости. Известны два типа хрупкого разрушения: транскристаллитное и интеркристаллитное. Чистые металлы обычно разрушаются по телу зерна. Интеркристаллитному разрушению, когда трещина распространяется по границам зёрен (всегда хрупкое разрушение) благоприятствует наличие включений по границам зерен. Сплавы с объемно-центрированной кристаллической решеткой разрушаются по телу зерна и между зёрнами; сплавы с гексагональной решеткой – преимущественно только по телу зерна; сплавы с гранцентрированной кубической – только по границам зерен. С увеличением общего периметра границ зерен межзёренное вещество распределяется в форме более тонких прерывистых пленок, что увеличивает межкристаллические связи и затрудняет распространение микротрещин за счет увеличения путей сдвига. Границы зерен характеризуются значительными нарушениями кристаллической решетки, негативное влияние которых существенно ослабляется с повышением гранулярности структуры, за счет дробления путей сдвига, уменьшения длины микротрещин и соответствующего увеличения интервала пластического состояния. Таким образом, прочность металлов и их сопротивляемость хрупкому разрушению в значительной степени обуславливаются состоянием границ зерен. Еще больше влияют на величину хрупкой прочности неметаллические включения, располагающиеся как по границам зерен, так и внутри них. Но при этом включения рассматриваются как концентраторы напряжений, а границы включений как пути, по которым

распространяются трещины разрушения. Но влияние природы и формы включений на хладноломкость изучено не в полной мере. Большое влияние на хладноломкость оказывают микродефекты в структуре металлов, являющиеся своеобразными концентраторами напряжений. Особенно опасны дефекты типа усадочных раковин, микропористости и газовых пузырей, нарушающих однородность и сплошность структуры. Поэтому плотность металла является объективным показателем для оценки его хладноломкости. Несмотря на достижения в развитии теоретических представлений о природе хладноломкости металлов, общей теории, объясняющей все многообразие этого явления, до сих пор не предложено. Теоретические представления основаны на опытных данных многочисленных исследований, рассматривающих влияние отдельных параметров состояния и свойств металла на критическую температуру его перехода в хрупкое состояние. Важным является признание необходимости повышения уровня хрупкой прочности металлов, как основного фактора, определяющего хладноломкость.

В качестве независимой переменной при определении металла к хрупкости выбирают температуру, определяющую критический интервал хрупкости. Известный метод испытания ударной вязкости является весьма чувствительным и удобным способом оценки степени хладноломкости стали. Надежность и долговечность изделия в значительной степени определяется его склонностью к хрупкому разрушению, которому способствуют не только низкие температуры, но и такие параметры, как усиление концентрации напряжения, увеличение скорости деформации и другие. Опыт показывает, что сталь с более низкой температурой хрупкости лучше сопротивляется высоким напряжениям и увеличенным скоростям нагружения и дольше сохраняет свою пластичность. Следовательно, метод испытания ударной вязкости, выявляющий критический интервал хрупкости, носит универсальный характер и характеризует склонность стали к хрупкому разрушению. Также следует отметить, что технологические факторы производства стали также оказывают влияние на хладноломкость стали. Опыт показывает, что детали, изготовленные из стали с более низкой температурой хрупкости, способны оставаться вязкими при более высоких скоростях нагружения. В подобной стали распространение микротрещин существенно затрудняется. На хладноломкость стали оказывает влияние комплекс физико-химических и физико-механических факторов. Основные из них следующие: 1. Качество стали,

определяемое металлургическими особенностями производства. 2. Геометрия изделия. 3. Вид напряженного состояния, при котором изделие работает в практических условиях, характер нагружения, скорость нагружения и т.д. Все указанные факторы влияют самостоятельно и независимо друг от друга и учесть долю влияния каждого весьма сложно. Для решения этих задач прибегают к опытным испытаниям изделий.

*М.В. Смирнов, студ.,  
(ИиГПС МЧС России), г. Иваново  
рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ), г. Иваново*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 45**

Детали электронасосов испытывают воздействие факторов внешней среды: агрессивных газов и аэрозолей, морской воды, отделочных растворов и т.п. При этом у деталей разрушается рабочая поверхность, контактирующая, например, с жидкостью. В основном эти детали изготавливают из дорогостоящих сталей 40X13 и 12X18Н10Т или из стали 45 с металлизированным покрытием [1].

Коррозия металлов протекает различно. Она может происходить либо равномерно по всей поверхности, либо на ограниченной площади или в отдельных точках (так называемая «точечная» или «питтинговая» коррозия) и вдоль граней кристаллов металла – вглубь; это так называемая «межкристаллическая коррозия».

Равномерное растворение металлов с поверхности представляет собой часто встречающееся явление. Стойкость металла в этом случае может быть легко выражена количественно.

Точечная коррозия представляет собой более опасную форму коррозии, так как здесь количественно трудно определить величину коррозии: металл может оказаться негодным при небольшой потере его в весе. При точечной коррозии происходит или растворение самих примесей, являющихся анодами в основном металле, или же разъедание самого металла около примесей, являющихся катодами. Точечной коррозии подвержены все технические металлы.

Скорость коррозии определяется двумя основными показателями коррозионной стойкости металлов:

а) глубинный показатель коррозии  $K_n$  – глубина коррозионного разрушения  $\Pi$  в единицу времени  $\tau$ ,

$$K_n = \Pi/\tau \text{ (мм/год);}$$

б) показатель изменения массы  $K_m$ – изменение массы образца металла в результате коррозии, отнесенное к единице поверхности металла  $n$  в единицу времени,

$$K_m = \Delta m/S \cdot \tau \text{ (л/м}^2 \cdot \text{час)}$$

Скорость коррозии определяется объемным методом, т.е. по объему выделившегося водорода. Затем определяется группа и балл коррозионной стойкости. Для этого используется аппарат с самоциркулирующей для коррозионных испытаний с выделением водорода (по Льюису и Эвансу). В качестве агрессивных сред использовался 5 % раствор серной кислоты  $H_2SO_4$ .

Исследования проводились с деталями из стали 45 и стали 45 с металлизированным покрытием из стали 40X13. Поверхности образцов обрабатывались точением, шлифованием и алмазным выглаживанием.

По объему выделившегося водорода с помощью формулы находили изменение массы образцов по формуле

$$\Delta m = \frac{A \cdot V_o}{n \cdot 11,2 \cdot 1000}, \quad (1)$$

где  $A$  – атомный вес металла;

$V_o$  – объем выделившегося водорода (мл);

$n$  - валентность металла.

Затем определяли показатель изменения массы  $K_m$  и глубинный показатель коррозии  $K_n$  соответственно по формулам:

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} \text{ (г/м}^2 \cdot \text{час)}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поверхности образца ( $m^2$ ),

$\tau$  - время испытаний (час).

$$K_n = \frac{K_m \cdot 8,76}{\gamma_{\mu e}} \text{ (мм/год)}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{\mu e}$  - плотность материала ( $г/см^3$ ).

Потом по найденным величинам  $K_m$  и  $K_n$  определяли группу и балл коррозионной стойкости [2]. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

1	2	3	4	5	6
3	Сталь 45 с металлизированным покрытием				
	– обработка точением;	2,2	1,0	Стойкие	2
	– обработка шлифованием;	2,0	0,82	Стойкие	2
	– обработка алмазным выглаживанием.	1,6	0,71	Стойкие	2

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что коррозионная стойкость деталей, обработанных алмазным выглаживанием больше, чем при обработке точением и шлифованием. Основной причиной повышения коррозионной стойкости при алмазном выглаживании являются остаточные напряжения сжатия [3], а для металлизированного покрытия – технология нанесения покрытия, приводящая к увеличению твердости поверхности.

#### Библиографический список

1. **Королькова Г.С.** Электродуговая металлизация деталей электронасосов./ Современные технологии в машиностроении / Королькова Г.С.// XIII Междунар. научн.-практ. конф. – Пенза, 2009. – с.56-58.
2. **Структура** и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Справ. Изд./ Сокол И.Я., Ульянов Е.А. и др. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
3. **Повышение** несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В.Н. Яценко, Г.З. Зайцев и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

*А.С. Хахалин, студ.;*  
*рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.*  
*(ИГЭУ) г. Иваново*

## ДИСЛОКАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Многочисленными исследованиями в строении реальных металлов и сплавов доказано, что имеются многочисленные отклонения от совершенного кристалла, характеризующиеся нарушениями правильного геометрического строения решетки. Такие нарушения связаны со смещением отдельных атомов или их рядов из регулярного положения в решетке с наличием несовершенства кристаллического строения. Хотя эти искажения геометрии решетки могут быть небольшими, они опре-

деляют весьма существенные изменения таких свойств, как сопротивление пластической деформации, релаксация различных видов, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность.

Существует несколько типов несовершенств кристаллического строения. Наличие атомов ничтожных количеств примесей, всегда присутствующих в реальных металлах, приводит к тому, что в тех местах кристаллического построения основного металла, где располагаются включения инородных атомов, будут происходить искажения правильного геометрического строения решетки. При высокотемпературной закалке, наклепе могут возникнуть условия выхода атомов из регулярного положения в узле решетки и перехода в межузлие, т.е. образуются вакансии. Включения инородных атомов и вакансий относятся к точечным несовершенствам. Единицей измерения энергии таких дефектов будет произведение модуля упругости (сдвига)  $G$  на линейный размер дефекта « $v$ », равному минимальному параметру трансляции решетки. Для случая вакансий энергия составляет  $\sim 0,2Gb^3$  для линейных дефектов на единицу длины дислокаций  $\sim 0,5Gb^2$  поверхностная энергия кристалла  $\sim 0,1Gb$ . Объемные изменения, связанные с неодновременностью (в разных сечениях) процесса формирования поликристаллического тела (например, из-за неравномерного охлаждения, усадки и т.д.), приводят к возникновению напряжений внутри этого тела. Эти напряжения могут достигнуть значительной величины и вызвать пластическую деформацию кристалла путем скольжения или двойникования. Эти процессы связаны с наличием или возникновением в кристалле таких несовершенств, как дислокации, имеющие значительную протяженность в одном направлении и малую – в двух других. К линейным несовершенствам (отличающимся от дислокаций) также относятся ряд вакансий или ряд внедренных атомов. Дислокационная модель строения реальных металлов впервые была использована при изучении процесса пластической деформации (наклепа) и позднее при фазовых превращениях и росте зерна, явлениях, связанных с остаточными деформациями, прочностью кристаллических тел и т.д.

В процессе роста кристаллов в поликристаллическом материале наступает такой момент, когда они сталкиваются, и между ними образуется граница. Согласно современным представлениям границу следует рассматривать как узкую переходную область шириной в несколько атомных слоев» в которой происходит перестройка решетки

кристалла с одной кристаллографической ориентировкой в решетку кристалла, имеющего упругую кристаллографическую ориентацию. Атомно-кристаллическое строение такой переходной области характеризуется многими нарушениями геометрически правильного расположения атомов. Также образом, создается другой тип несовершенств «плоские или поверхностные несовершенства». Дислокационная модель для описания строения границ ограничивается оценкой величины угла разориентации  $\Theta$ . Исследованиями установлено [79], что границы могут быть малоугловые ( $1-3^\circ$ ), среднеугловые ( $4-15^\circ$ ) и высокоугловые ( $15-30^\circ$ ).

При малых и средних углах расстояние между дислокациями велико по сравнению с параметром решетки. Строение таких границ описывается дислокационной теорией, причем скопление дислокаций на границах имеет сложную конфигурацию, и естественные направления скольжения для разлитых типов дислокаций, составляющих эти границы, не совпадают. Отсюда относительно малая подвижность границ.

При больших углах ( $15-30^\circ$ ) расстояние между соседними дислокациями близко к межатомным. Подвижность границ с большими углами является сравнительно легкой; это определяется тем, что каждый атом на такой границе имеет по соседству дефект, аналогичный вакантному месту в решетке. Атомы в этих объемах могут двигаться независимо от своих соседей и движение границ с большими углами становится достаточно свободным, поскольку атомы сравнительно легко переходят из одного кристалла в другой в результате диффузии через границу (по дефектным местам).

*А.В. Власов, аспирант,  
рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ) г. Иваново*

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Температура вращающихся тел измеряется датчиками температуры, которые могут соединяться с индикатором через скользящий электрический контакт или бесконтактным способом. Возможно использование измерителей разового действия. При использовании скользящего электрического контакта в качестве термопреобразователей исполь-

зуются терморпары, термометры сопротивления или терморезисторы, которые через контактные кольца и щетки или жидкометаллические контакты соединяются с измерительными приборами. При использовании скользящего контакта в зоне последнего возникает коммутационная ЭДС. Сопротивление контакта сильно зависит от температуры, влажности, вибрации, скорости вращения и других факторов. В меньшей степени влияние указанных факторов проявляется в случае применения жидкометаллических контактов. Скользящие контакты должны подвергаться испытаниям как в процессе изготовления, так и при эксплуатации, что затрудняет их использование. Кроме того, в ряде модификаций электрических машин нет места для установки дополнительного щеточно-контактного узла. Бесконтактная передача информации с термопреобразователя на измерительное устройство может осуществляться с использованием индуктивной, емкостной или СВЧ связи. Широкое распространение получили бесконтактные методы измерения температуры, основанные на измерении теплового излучения ротора. Индукционная связь может осуществляться с помощью вращающегося трансформатора — воздушного или с ферромагнитным сердечником. Вращающаяся катушка соединена с термометром сопротивления или терморезистором, а неподвижная включена в мостовую измерительную схему. Питание моста осуществляется от источника переменного тока. В случае применения емкостной связи одна из обкладок конденсатора (обычно цилиндрического) вращается, а другая неподвижна. Время заряда или разряда конденсатора и его ток зависят от сопротивления термопреобразователя, соединенного с вращающейся обкладкой конденсатора. В качестве термопреобразователей применяют и датчики с сердечниками из материалов, точка Кюри которых соответствует предельно допустимой температуре контролируемого элемента вращающегося ротора электрической машины. СВЧ-связь применяется редко и осуществляется с помощью миниатюрных СВЧ-резонаторов, устанавливаемых на роторе. При изменении температуры в результате теплового расширения изменяются линейные размеры резонатора и его резонансная частота, что улавливается неподвижными приемниками частоты (частотомеры). Приемник может иметь шкалу в градусах либо может быть снабжен специальной градуировочной таблицей или кривой, которые позволяют по известному значению частоты определять температуру. Использование теплового излучения вращающихся частей электрических машин для измерения их температуры стало возможным после разработки приемников излучения, имеющих длину волны около 5 мкм, что соответствует области излучения

слабонагретых тел с температурами около  $100^{\circ}\text{C}$  (в частности, на базе сернистого свинца). Для бесконтактного измерения температуры вращающихся частей можно использовать стандартные фотоэлектрические пирометры и тепловизоры, которые серийно выпускаются промышленностью.

*А.Э. Беляев, асп.;*  
*рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц.*  
*(ИГТА, ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

В зависимости от степени развития указанных явлений в материале различают несколько видов поверхностной лазерной обработки, возможность реализации которых определяется основным уровнем плотности мощности излучения.

Упрочнение без фазового перехода предполагает структурные изменения в материале при уровне плотности мощности излучения, не приводящем к расплавлению облученной зоны. При этом виде обработки сохраняется исходная шероховатость обрабатываемой поверхности. Быстрый локальный нагрев поверхности и последующее охлаждение за счет теплоотвода в массив материала приводят к образованию в поверхностном слое стали специфической высоко-дисперсной, слаботравящейся, дезориентированной в пространстве структуры, имеющей микротвердость, в 2 – 4 раза превышающую микротвердость основы (матрицы). При малых плотностях мощности, скоростях нагрева и охлаждения, не превышающих критических значений, может быть реализован режим отжига (отпуска) ранее закаленных материалов. Упрочнение с фазовым переходом предполагает плавление материала в облученной зоне. Этот вид упрочнения требует более высокой плотности мощности излучения, что позволяет добиться значительных глубин упрочненного слоя. Поверхность этого слоя имеет характерное для закалки из жидкого состояния дендритное строение. Затем идет ЗТВ, а между ней и материалом основы расположена переходная зона. При данном виде поверхностной обработки, естественно, нарушается исходная шероховатость, что требует введения в технологический про-

цесс изготовления изделия дополнительной финишной операции (шлифования).

При реализации рассмотренных видов обработки не требуется специальной среды, процесс проводится на воздухе. При этом возможна частичная диффузия составляющих воздуха в облученную зону.

При следующем виде поверхностной обработки – лазерном легировании для насыщения поверхностного слоя легирующими элементами требуется специальная среда (газообразная, жидкостная, твердая). В результате на обрабатываемой поверхности образуется новый сплав, отличный по составу и структуре от матричного материала.

Лазерная наплавка (напыление) позволяет нанести на поверхность обрабатываемого материала слой другого материала, улучшающий эксплуатационные характеристики основного.

Новая разновидность лазерного упрочнения – аморфизация поверхности сплава в условиях скоростного облучения (очень коротким импульсом или сканирующим лучом). Сверхвысокие скорости теплоотвода, достигаемые при этом, обеспечивают своеобразное «замораживание» расплава, образование металлических стекол (метгласса) или аморфного состояния поверхностного слоя. В результате достигаются высокая твердость, коррозионная стойкость, улучшенные магнитные характеристики и другие специфические свойства материала. Процесс лазерной аморфизации можно осуществить при обработке сплавов специальных составов (в том числе и на основе железа), а также других материалов, предварительно покрытых специальными составами, которые самостоятельно или совместно с матричным материалом склонны к аморфизации.

Лазерная обработка алюминиевого сплава Д16 после глубокого анодирования осуществлялась излучением неодимового лазера ГОС-301 одиночными микросекундными импульсами при различной энергии накачки и степени расфокусировки  $\Delta F$ . Диапазон, действующий на поверхность излучения, варьировался от 5 до 200 кВт/см<sup>2</sup>.

При воздействии лазерного излучения интенсивностью ниже 30 кВт/см<sup>2</sup> видимых изменений на поверхности не наблюдается. Внешние изменения начинаются при  $q$  свыше 30 кВт/см<sup>2</sup>, поверхность становится матовой и плохо рассеивает свет. На некоторых участках поверхности темный цвет покрытия изменяется на белый, плотность и толщина покрытия уменьшаются. Это свидетельствует о начале термодеструкции покрытия. При  $q$  свыше 100 кВт/см<sup>2</sup> на поверхности образуется зона оплавления. Она имеет форму эллипсоидного кратера

размерами 3÷5 мм с углублением по середине и натеками расплавленного металла по краям. Явно видны закалочные трещины.

Структура в зоне оплавления является типичной для сплавов, закаленных из расплавленного состояния при лазерной обработке. Она представляет собой мелкие ячейки светлого поля, очерченные темным полем размером несколько микрометров. Степень травимости различных макроучастков расплава различна, что свидетельствует о химической неоднородности легированного слоя. Форма макроучастков указывает на конвективный характер перемешивания расплава. Фазовый состав ЗЛЛ – ячейки светлого поля –  $\alpha$ -фаза, на границах ячеек – квазиэвтектика.

Для фазового анализа в режиме микродифракции готовилась реплика, содержащая частицы порошка, полученного при диспергировании поверхности микротомиранием алмазным надфилем. После соскабливания порошок оксидного покрытия переносился на очищенную путем кипячения в дистиллированной воде стеклянную подложку – предметное стекло. Затем на поверхность подложки наносилась капля этилового спирта для дополнительной диспергации порошка, после чего спирт испарялся. В дальнейшем порошковая реплика готовилась по стандартной методике.

Установлено, что микродифрактограммы поверхности до лазерной обработки являются микродифрактограммами поликристаллического объекта, т.е. кольцевыми. Согласно этих результатов структура может быть интерпретирована как ГЦК с периодом решетки  $a = 4,051 \pm 0,022$ , что соответствует поликристаллическому алюминию ( $a = 4,0494 \text{ \AA}$ ). Других фаз, например оксидов или гидроксидов алюминия не обнаружено. Очевидно, оксидное покрытие до обработки не имеет выраженной кристаллической структуры – оно аморфно. Дифракция же получается только от частичек матрицы сплава Д16, отделяемых вместе с покрытием при микротомирании.

Вид микродифрактограмм после лазерной обработки существенно изменяется. Все полученные дифрактограммы точечные, что говорит о том, что порошок имеет кристаллическую структуру. Из-за сложности индентирования точечных электронограмм мы затрудняемся определить тип кристаллической решетки образующейся фазы. Анализ затрудняется еще и тем, что алюминий с кислородом и водой может образовывать большое число возможных соединений с различными типами кристаллических решеток.

Тем не менее, можно говорить о том, что при лазерной обработке перед его разрушением в изначально аморфном оксидном покрытии

интенсивно развиваются процессы кристаллизации. Этот факт косвенным образом подтверждает и внешнее изменение цвета покрытия — с темно-коричневого на белый.

*Т.Г. Гулиев, студ.,  
рук. Т.Ю. Степанова, к.т.н., доц.  
(ИГХТУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО- МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

Увеличение долговечности и надежности, повышение работоспособности механизмов и оборудования применяют смазочные материалы, к которым относятся органические и неорганические вещества способные снижать трение, уменьшать износ трущихся поверхностей.

Смазочные материалы представляют собой двухкомпонентную систему, состоящую из жидкой основы – дисперсионной среды и твердого загустителя – дисперсионной фазы. Дисперсионная среда составляет 75-95% от состава материала, а дисперсионная фаза, несмотря на относительно низкую концентрацию (5-25%), определяет основные эксплуатационные характеристики смазочных материалов [1-3].

В качестве смазочного материала разработаны композиционные составы, не содержащие минеральных и растительных масел. Роль дисперсионной среды выполняют оксиэтилированные спирты – полиэтиленгликоли. Дисперсионная фаза смазки включает, высшие карбоновые кислоты и эфиры жирных кислот. Для регулирования структурообразования в смазку также введены поверхностно-активные вещества.

Структурно-механические свойства смазочных материалов исследовали методами реологии. Согласно второй аксиоме реологии, любая материальная система обладает реологическими свойствами, основными из которых являются вязкость и прочность. Вязкость и прочность проявляются при сдвиговой деформации.

При исследовании разработанных смазочных материалов было установлено, что они относятся к неньютоновским жидкостям. Течение неньютоновских жидкостей не следует закону Ньютона, их вязкость зависит от напряжения сдвига. Опытные смазочные материалы содержат асимметричные частицы и растворы полимеров. При увели-

чении напряжения сдвига частицы смазки ориентируются перпендикулярно поверхности трения. Движение частиц становится упорядоченным, что ведет к уменьшению вязкости.

Реологические исследования опытных смазочных материалов проводили на ротационном вискозиметре «Реотест RV-2», предназначенного для измерения вязкости жидкости при различных скоростях вращения цилиндра от 1 до 243 об/мин.

Результаты испытаний исследуемых смазочных материалов приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Результаты реологических испытаний смазочных материалов**

№ п/п	Молекулярная масса полимера дисперсной фазы	Динамическая вязкость, МПа·с	Модуль сдвига, Н/м <sup>2</sup>
1	600	37-35	2,5-7,8
2	1200	60-36	4,2-10
3	1500	70-33	6,1-13

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что с увеличением молекулярной массы полимера дисперсной фазы увеличивается вязкость и напряжение сдвига смазочного материала.

Установлено, что повышением напряжения сдвига динамическая вязкость снижается, так как хаотическое движение частиц меняется на упорядоченное, что ведет к уменьшению динамической вязкости, соответственно улучшаются смазочные свойства материала.

#### **Библиографический список**

1. **Синицин, В.В.** Пластичные смазки в СССР. Ассортимент: справочник. 2 изд., перераб. и доп. – М.: 1984. – 192 с.
2. **Заславский, Ю.С.** Трибология смазочных материалов. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
3. **Фролов, Ю.Г.** Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для вузов. – М.: Химия, 1988. – 464 с.

*А.А. Косоурова, студ.;  
рук. В.В. Марков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ), Иваново*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ДЕКОРАТИВНЫЕ ПОКРЫТИЯ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

В настоящее время широкое распространение получили декоративные покрытия металлов, основной задачей которых, является придании повышенных декоративных свойств обрабатываемым поверхностям и получение на поверхности защитной твердой пленки из наносимого материала.

На сегодняшний день наиболее распространенными вакуумно-плазменными декоративными покрытиями на художественные изделия из цветных сплавов являются покрытия: титаном, цирконием, нитридом титана ( $TiN_x$ ), нитридом циркония ( $ZrN_x$ ), карбонитридом титана ( $Ti_xN_yC_z$ ), карбонитридом циркония ( $Zr_xN_yC_z$ ). Эти методы пользуются большой популярностью благодаря экологической чистоте производства и высокому качеству получаемых декоративно-защитных плёнок.

Защитно-декоративные покрытия наносятся вакуумными методами на художественные изделия из меди, латуни, мельхиора, нейзильбера, стали, алюминиевых сплавов, томпака, пластмасс, стекла, керамики, и т.д. Качество покрытий полностью определяется качеством подготовки поверхности заготовок. Среди основных критериев различают: шероховатость, фактуру, наличие загрязнений, наличие окисных плёнок, степень активации поверхности ионным травлением.

Одним из материалов, используемых для нанесения защитно-декоративных покрытий, является нитрид титана. Он наносится на поверхность как с помощью физических, так и с помощью химических методов осаждения. Область гомогенности  $TiN$  очень широка, поэтому свойства  $TiN$  существенно зависят от количества азота в нитриде. При высокой скорости осаждения может быть получена очень мелкозернистая и, следовательно, очень искаженная структура, содержащая метастабильные фазы, в то время как при низких скоростях осаждения формируется чешуйчатая структура. Микротвердость пленок  $TiN$  изменяется в широких пределах (20-40 ГПа) в зависимости от содержания азота и структурных особенностей. Большая твердость конденсированного  $TiN$  является следствием высокого уровня внутренних напряжений. Покрытия, полученные физическими методами, обычно находятся в состоянии сжатия и измеренные напряжения составляют  $10^9$ - $10^{10}$  Па. Наличие таких напряжений подтверждается увеличением

параметра решетки ( $a$ ). Для стехиометрических пленок наиболее часто приводят величину  $a = 0,425$  нм (для стехиометрического массивного TiN  $a = 0,424$  нм). Значение параметра решетки определяется рядом факторов: отмечают рост  $a$  с увеличением содержания азота, с уменьшением толщины пленки, а также с ростом внутренних напряжений.

Нитрид титана — материал уникальный: такое покрытие по эстетическим характеристикам не уступает золоту, а по прочностным превосходит его: не корродирует, не окисляется, не тускнеет, материал очень износостойкий. Имеет светорассеивающие характеристики (от матового до зеркального), высокую стойкость к воздействию химических веществ. Это современный технологичный материал с гарантийным сроком эксплуатации даже в атмосфере промышленного города не менее 50 лет без изменения внешнего вида. Визуально, этот материал имеет цвет золота.

Большое внимание еще уделяется карбидам и оксидам металлов.

Представленный метод нанесения декоративно-защитного покрытия имеет следующие преимущества:

1. Универсальность, возможность нанесения покрытий из соединений различной природы и регулирование при этом в широких пределах стехиометрией соединений путем изменения тока дуги, давления реакционного газа и температуры поверхности. 2. Высокую скорость нанесения и адгезия покрытий. 3. Высокая технологичность процесса. Совмещение в едином технологическом цикле стадий очистки, нагрева поверхности до рабочей температуры (200...600 °C) со стадией нанесения функционального покрытия, не используя при этом отдельную технологическую оснастку.

Основные недостатки метода:

1. Существенная зависимость свойств покрытий от технологических режимов, что требует практически для каждого изделия проведения отдельных работ по их оптимизации. По этой причине загрузка в вакуумную камеру, в которой наносится покрытие, производится только для однотипных изделий.

2. Наличие капельной фазы. При нанесении таких покрытий на поверхность трения капли действуют на поверхность контртела как абразивные частицы.

Эффективным технологическим направлением повышения эксплуатационных свойств любого изделия является нанесение многослойных покрытий. В этих покрытиях первый слой нитридов, карбидов является износостойким, а последующие (молибден, титан, серебро

политетрафторэтилен) – мягкими, прирабочными. При этом главным образом повышается износостойкость.

#### Библиографический список

1. Карпенко Г. Д., Рубинштейн В. Л. Современные методы генерации осаждаемого вещества при нанесении тонкопленочных покрытий в вакууме. Минск: БелНИИНТИ, 2010 - 36 с.
2. Бутовский К. Г., Лясников В. Н. Напыленные покрытия, технология и оборудование. - Саратов.: «Саратовский госуд. техн. университет», 2011 - 117 с.
3. Кудинов В. В., Бобров Г. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. - М.: «Металлургия», 2009 - 431 с.

*М.Н. Карпинский, студ.;*  
*рук. Е.В. Киселева, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ), г. Иваново*

## ВЛИЯНИЕ АКТИВИРОВАННОЙ СОТС НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Повышение эффективности действия технологических жидкостей при обработке металлов производится как путем создания новых составов с более высокими функциональными свойствами, так и путем усовершенствования их способов приготовления [1,5,6,7].

В основе современного технологического процесса при приготовлении технологических жидкостей лежит не только процесс перемешивания компонентов, входящих в их состав, но и активация смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). В результате можно в значительной степени повысить технологические характеристики и качество СОТС.

В связи с этим данное исследование направлено на изучение процесса перемешивания эмульсий с помощью специального гидродинамического кавитационного смесителя циркуляционного типа с элементами механохимической активации. Эффективность применения данного смесителя обеспечивается за счет интенсивной турбулизации потоков жидкости и создания дополнительных ускоренных потоков.

При использовании специального перемешивающего устройства, оснащенного трубками переменного сечения, происходит высокая го-

могенизация компонентов, что приводит к получению водных СОТС устойчивых во времени. Готовая СОТС в этом случае не расслаивается как при транспортировке, так и при хранении. Кроме того, происходит механическая активация всей жидкости, которая впоследствии оказывает положительное влияние на потребительские и эксплуатационные свойства.

Приготовление СОТС в специальном смесителе привлекает простотой конструктивных решений, незначительными потреблением электроэнергии смесителя, уменьшением времени приготовления СОТС, возможностью обработки ее вне зоны резания [3].

Для научного исследования взяты водосмешиваемые СОТС (эмульсии и полусинтетические жидкости). Они обладают рядом преимуществ: высокая охлаждающая способность, высокая проникающая способность, а также экономичность и доступность.

В результате кавитации, эмульсии активно диспергируются, т.е. уменьшается размер частиц СОТС и происходит более интенсивное протекание физико-химических процессов. А циркуляция способствует выравниванию состава жидкости по всему объему.

Являясь наиболее простым по технологии и сложности необходимого оборудования, этот метод позволяет формировать частички СОТС, размеры которых находятся в диапазоне от десятых долей микрометров до сотен микрометров в зависимости от режимов обработки.

В процессе исследования изучалось влияние активированной СОТС на качество обработанной поверхности нержавеющей стали. Исследовали влияние на шероховатость обработанной поверхности на операциях получистового и чистового точения стали 12Х18Н10Т. Резание проводилось резцами постоянной геометрии, при следующем режиме резания:  $v = 1,5 \dots 1,85$  м/с, подача  $s = 0,1$  мм/об, глубина резания  $t = 0,1 \dots 0,5$  мм. В качестве режущего инструмента использовались упорные отогнутые резцы с углом  $\varphi = 90^\circ$  формы 2103 с пластинками из твердых сплавов ВК8 по ГОСТ 2209.

Геометрия режущей части: Геометрия резцов была постоянной:  $\gamma = 9^\circ$ ;  $\alpha = 9^\circ$ ;  $\delta = 81^\circ$ ;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_l = 45^\circ$ ;  $\alpha_1 = 7,5^\circ$ ;  $\lambda = 0^\circ$ . Переходное лезвие выполнялось по дуге радиуса  $0,5 \pm 0,05$  мм. СОТС подавалась к зоне резания в виде свободно падающей струи сверху на снимаемую стружку в месте отделения ее резцом. Расход жидкости составлял 300-500 мл/мин. СОТС использовалась однократно, т. е. без возвращения в охлаждающую систему станка. Составы жидкостей приготавливались на основе дистиллированной воды.

Результаты испытаний представлены на рис.1,2.

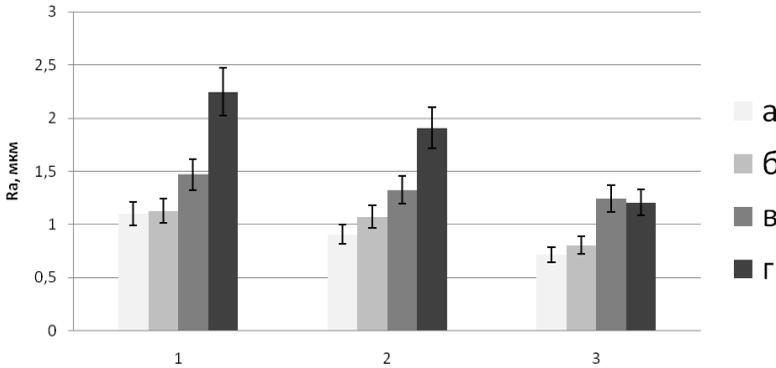


Рис. 1. Влияние размера частиц COTC на шероховатость обработанной поверхности. Исследование: точение стали 12Х18Н10Т резцами ВК8; Режимы резания: скорость резания  $v = 1,5$  м/с; подача  $s = 0,1$  мм/об. 1-глубина резания  $t = 0,5$  мм; 2- глубина резания  $t = 0,3$  мм; 3-глубина резания  $t = 0,1$  мм. а, б, в, г – размер частиц COTC, представленный на рис.2

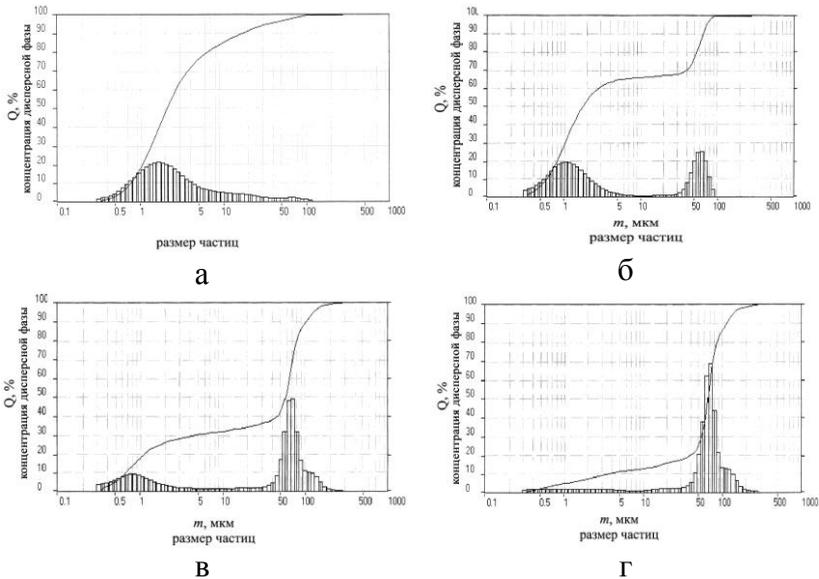


Рис. 2. Размер частиц COTC: а – высокодисперсная COTC, б,в – среднedisперсная COTC, г – низкодисперсная COTC

Как видно, из графических зависимостей величина шероховатости Ra уменьшилась в среднем на 35 %, при этом одновременно произошло упорядочение и более равномерное расположение неровностей по поверхности. Это явление можно объяснить улучшением смазочных свойств обработанной жидкости и снижением адгезионных явлений, в результате применения активированной СОТС и как следствие уменьшение величины образующего на передней поверхности инструмента нароста и стабилизации его размеров в процессе резания.

Вследствие изменения технологии приготовления СОТС можно также наблюдать изменение показателей вязкости, стабильности, а также изменение трибологических характеристик [2,4].

#### Библиографический список

1. **Годлевский, В.А.**, Марков, В.В. Синергизм действия поверхностно- и химически-активных компонентов СОТС для резания металлов / В.А. Годлевский, В.В. Марков. // Безызносность и триботехнологии. 2004. №1. С.61 -65.
2. **Годлевский, В.А.**, Латышев, В.Н., Волков, А.В., Маурин, Л.Н. Проникающая способность СОТС как фактор эффективности процесса обработки резанием / В.А. Годлевский, В.Н. Латышев, А.В. Волков, Л.Н. Маурин. // Трение и износ, 1995. - Т. 16. –С. 938–949.

*Е.А. Булгачев, студ.;*  
*рук. Е.В. Киселева, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ), г. Иваново*

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФОРМИРОВАНИИ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Известно, что введение ПАВ в состав СМ при трении и резании практически всегда снижает трение по сравнению с чистым растворителем. Этот эффект объясняется присутствием граничной смазки, по крайней мере, на части интерметаллического контакта. Поскольку влияние капиллярности в условиях высоких температур незначительно, наиболее важной фазой кинетики смазочного действия становится адсорбция: химическая и физическая. На химической стадии процесса формирования пассивационных пленок происходит с высокой скоростью (весьма активированы и поверхности, и реакционные частицы). Процесс последующей физисорбции с элементами структурирования граничного слоя является более медленным по сравнению с первой,

химической стадией и поэтому, скорее всего, будет лимитирующим в общей картине физико-химических эффектов смазки при резании.

Формирование граничного смазочного слоя на поверхности раздела «инструмент — обрабатываемый материал» рассматривается как сложный многостадийный процесс. Смазочный слой формируется и одновременно разрушается непосредственно в контактной зоне. Действие растворов ПАВ происходит по механизму внешней смазки, а это означает, что в данном случае становятся критически важными вопросы кинетики физико-химических процессов формирования смазочных слоев, в особенности на этапе проникновения смазки в контактную зону [13]. Рассмотрение процесса проникновения жидкой смазки через сеть межповерхностных капилляров для процесса лезвийной обработки является особенно актуальным, поскольку решает вопросы, связанные с ограниченностью доступа СМ в этих экстремальных контактных условиях.

Основная трибологическая роль СМ при резании сводится к уменьшению области адгезии между резцом и стружкой. В этом контексте эффективность каждого СМ зависит от двух факторов. Во-первых, СМ должен успевать проникнуть в контактную зону за определенное (достаточно короткое) время, и, во-вторых, он должен образовывать там пленки с малым сопротивлением сдвигу. Д. Кламанн, например, указывает, что «хорошие смачивающие свойства необходимы <...> чтобы смазочно-охлаждающая жидкость попала даже на труднодоступные поверхности трения» [1, с. 105]. Г. Роу высказывает следующее утверждение: «Скорость, с которой хемосорбированная пленка может формироваться на резце, ограничена скорее кинетическими, чем термодинамическими факторами» [2, с. 572]. Это привело некоторых исследователей к утверждениям о том, что эффективный транспорт среды может осуществляться лишь в высококомобильной газовой фазе. Этот аргумент тем более убедителен, что реальная контактная температура при большинстве операций лезвийной обработки заведомо превышает температуру кипения большинства жидких СОТС.

Много лет длится дискуссия о том, каким образом происходит внедрение СОТС на контакт металлических поверхностей. При этом иногда высказывались прямо противоположные точки зрения: от полного отрицания факта присутствия СОТС на контактной поверхности [3] до утверждения, что смазка всегда проникает в зону резания, вплоть до режущей кромки. Так, М. Б. Гордон писал: «Нами получены прямые экспериментальные доказательства дискретности контакта,

проникновения смазочно-охлаждающей жидкости, ее смазочного действия на любых режимах резания» [4, с. 71]. Подобной точки зрения придерживался и М. И. Клушин, который утверждал, что, по крайней мере, «кислород воздуха проникает на площадки трения при сколь угодно высоких скоростях резания...» [5, с. 44].

Н. Н. Зорев [6], а позднее П. Уэллэйс и Г. Бутройд [7] отмечали, что неровности поверхности резца образуют ответные отпечатки на прирезковой стороне стружки, и некоторые исследователи рассматривали эти данные как подтверждающие тот факт, что имеет место обширная адгезионная зона, примыкающая к режущей кромке. Образование граничного смазочного слоя при резании происходит в условиях высокой температуры и ограниченного доступа смазочной среды. Приемлемым модельным представлением смазочного процесса в этом случае является капиллярная модель. Впервые описание такого процесса было разработано Дж. Уильямсом и Д. Тейбором. Возможность реализации механизма капиллярного проникновения в зону контакта была более подробно показана в работах [8,9], где граница раздела представлена динамичной сетью межповерхностных капилляров, вдоль которых перемещается смазочная среда по направлению от периферии к режущей кромке.

Согласие подобных теоретических моделей с экспериментальными фактами, наблюдаемыми при металлообработке, приводит к идее о том, что элементы такого подхода могли бы быть применены и для случая трения скольжения, и в большей мере это было бы оправдано для режимов трения, близких к условиям схватывания и задира, ибо именно здесь действуют факторы высокой температуры, наличия областей адгезии, ограничения доступа СМ.

Анализом литературы и исследований установлено, что при резании, как правило, процесс формирования граничного смазочного слоя из окружающей среды осуществляется внутри динамичной сети межповерхностных капилляров на границе между контактирующими материалами [10, 11, 5, 12]. Процесс формирования граничного смазочного слоя между инструментом и обрабатываемым материалом протекает в несколько последовательных этапов [11]. В табл. 1, приведенной ниже указаны возможные варианты физико-химических процессов в зависимости от состояния среды.

**Таблица 1. Этапы процесса формирования граничного смазочного слоя из мезогенной смазочной среды при ограниченном ее доступе**

№ этапа, характерное время	Характер физико-химических процессов	Агрегатное состояние среды			
		Газ	Жидкость		Твердая смазка
			жидкотекучая	высоковязкая	
I	Капиллярное проникновение	+	+	-	-
II	Испарение	-	×	×	-
III	Термокаталитическое разложение компонентов	×	×	×	-
IV	Образование хемосорбированного слоя	×*	×*	×*	-
V	Физическая адсорбция с формированием граничного смазочного слоя	×**	×*	×**	-
VI	Образование многослойных структурно упорядоченных пленок	×**	×*	×**	+

*Примечание.* + — процесс обязательно происходит; - — процесс не происходит; × — процесс может происходить; \* — в присутствии химически-активных веществ; \*\* — в присутствии мезогенов.

Для СОТС, находящихся в разном агрегатном состоянии и имеющих отличия в составе компонентов, будут характерны различные цепочки из описанных выше процессов. Причем каждый из этапов, расположенный ниже в таблице, требует большего времени на осуществление. Любое ужесточение фрикционного режима будет ограничивать цепочку процессов верхними (по положению в таблице) членами. Исходя из такого представления о процессе пассивации поверхностей при трении, можно сделать вывод, что суммарное время последовательно протекающих элементарных процессов формирования смазочного слоя, не должно превышать времени существования капилляра.

В свою очередь, время существования каждого из спонтанно возникающих межповерхностных каналов определяется их длиной и скоростью относительного движения пары трения «инструмент — стружка».

С точки зрения кинетики процесса для улучшения трибологии зоны контакта необходимо предпринять меры, которые приводили бы к уве-

личению концентрации адсорбированного вещества на стенках межповерхностного капилляра, моделирующего элемент геометрии зоны контакта.

По сути, два главных фактора определяют смазочную эффективность растворов в процессе резания: во-первых, возможность внешней среды с достаточной скоростью и на достаточное расстояние проникать на контактные площадки и, во-вторых, поверхностная (адсорбционная) активность среды, позволяющая создавать граничный смазочный слой.

Для снижения трения необходимы следующие предпосылки: 1) повышение концентрации адсорбата в жидкой смазочной среде; 2) увеличение относительной доли заполнения капилляра жидкой фазой путем снижения скорости трения, подачи среды под значительным внешним напором или соответствующей оптимизации пространственных характеристик капиллярной сети; 3) возрастание адсорбционной активности среды за счет изменения молекулярной структуры присадок.

#### Библиографический список

1. **Годлевский, В.А.**, Латышев, В.Н., Волков, А.В., Маурин, Л.Н. Проникающая способность СОТС как фактор эффективности процесса обработки резанием / В.А. Годлевский, В.Н. Латышев, А.В. Волков, Л.Н. Маурин. // Трение и износ, 1995. - Т. 16. □ 5. - С. 938–949.
2. **Кламани, Д.** Смазки и родственные продукты: синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты: пер. с англ. М. : Химия, 1988. 488 с.
3. **Rowe G.W.** Lubricaton in Metal Cutting and Grinding // Philosophical Magazine A. 1981. Vol. 43. № 3. P. 567-585/
4. **Талантов Н.В.**, Черемушников Н. П., Дудкин М. Е. Исследование проникающей способности СОЖ // Обработка конструкционных материалов резанием с применением СОЖ. М. : МДНТП, 1978. С.108-111.
5. **Гордон М. Б.** Исследование трения и смазки при резании металлов // Трение и смазка при резании металлов. Чебоксары : Изд-во Чуваш. гос. ун-та 1972. С. 7-138
6. **Технологические** свойства новых СОЖ для обработки резанием / Под ред. М. И. Клушина. М : Машиностроение, 1979. 192 с.
7. **Zorev N. N.** Results of Work in the Field of the Mechanics of the Metal Cutting Process // Proc. Conf. Technology of Engineering Manufacture / Inst. Mech. Engrs. P. 255-268

*Е.А. Булгачев, студ.;  
рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛА**

Многие ответственные детали работают на истирание и одновременно подвергаются действию ударных нагрузок. Такие детали должны иметь высокую поверхностную твердость, что достигается применением способа поверхностного упрочнения деталей, либо нанесения на них различного рода покрытий. В последнее время для поверхностной термической обработки деталей все более находят применение источники высококонцентрированной энергии. При закалке относительно массивных деталей с использованием источников высококонцентрированной энергии, как правило, не требуются охлаждающие среды, так как локально нагретые слои очень быстро остывают в результате отвода теплоты в холодную массу детали. Термическое упрочнение стальных деталей является одним из наиболее эффективных и ответственных способов увеличения ресурса работы нагруженных элементов машин и механизмов, а также снижения их материалоемкости.

Плазменное упрочнение деталей подчиняется основным закономерностям термической обработки железоуглеродистых сплавов. Основным отличием его от традиционных методов термической и химико-термической обработки является наличие сверхинтенсивного ввода энергии в металл и столь же активного отвода от поверхности в холодную сердцевину, благодаря чему достигаются значительные скорости нагрева и охлаждения металла, при которых формируется структура высокой дисперсности с резким повышением твердости и износостойкости поверхностных слоев.

Пламя сжатой дуги на выходе из плазматрона имеет температуру порядка 10000 – 20000 °С. Поверхность детали нагревается до температуры закалки за очень короткий промежуток времени, в течение которого нижележащие слои металла не успевают прогреться до критической точки и поэтому не закаляются. Метод отличается высокой производительностью, низкие удельные энергозатраты, высокий уровень автоматизации благодаря локализации зоны обработки позволяет значительно снизить деформацию деталей, вести обработку труднодоступных и сложнопрофильных поверхностей. Переналадка оборудования при упрочнении разнопрофильных деталей занимает незначительное время. Применение плазменной технологии упрочнения суще-

ственно снижает затраты и повышает твердость деталей, подверженных обработке плазменной дугой. Как показали исследования, износостойкость чугуновых деталей, упрочненных плазменной дугой, возрастает в 8-10 раз, а стальных в 3-5 раз по сравнению с традиционными методами термической и химико-термической обработки. Кроме того, плазменное упрочнение позволяет в 3-4 раза повысить ресурс работы новых деталей.

Плазменное упрочнение в сочетании с другими способами: такими как объемная закалка, закалка ТВЧ, лазерная закалка, ультразвуковая обработка, термомеханическое упрочнение, наплавка, напыление и др. позволяют повысить механические свойства упрочненных деталей. Использование комплексного упрочнения позволяет повысить трещиностойкость, микротвердость и износостойкость, по сравнению с простой плазменной закалкой в 1,5-2 раза. Плазменное упрочнение в сочетании с предварительной закалкой ТВЧ позволяет повысить трещиностойкость, ударную вязкость, пластичность в 1,3-2 раза, при сохранении твердости и износостойкости поверхности на высоком уровне. Комплексная технология плазменного упрочнения включает в себя:

-закалка ТВЧ + плазменное упрочнение;

-закалка ТВЧ + отпуск + плазменное упрочнение;

(температура отпуска 290, 300, 400 °С).

Упрочненная таким способом деталь имеет композиционный рабочий слой с высокой износостойкостью и трещиностойкостью, и относительно, мягкую пластичную сердцевину. Природа образования внутреннего отпущенного слоя аналогична случаю плазменного упрочнения предварительно закаленных сталей.

Более сложный композиционный рабочий слой образуется после комбинации:

- объемная закалка + плазменная закалка + лазерная закалка + отпуск (температура отпуска 200 °С);

- закалка ТВЧ + отпуск + плазменная закалка + лазерная закалка + отпуск (температура отпуска 200 °С);

- закалка ТВЧ + отпуск + плазменная закалка + лазерная закалка (температура отпуска 200 °С).

Использование этих способов в определенной комбинации позволяет повысить микротвердость рабочей поверхности и трещиностойкость. Повышение трещиностойкости обусловлено увеличением степени дисперсности мартенсита, т.к. критическое напряжение хрупкому разрушению обратно пропорционально размеру зерна. Кроме того, образование нескольких слоев в упрочненном слое, после комплексной

обработки, (с различными структурными составляющими) изменяет микромеханизм разрушения. Трещины, распространяющиеся от поверхности в глубь упрочненного слоя, при переходе из твердого и хрупкого слоя лазерной закалки тормозятся в мягком и пластинчатом слое отпуска. Несмотря на усложнение технологии упрочнения, комплексная обработка позволяет регулировать эксплуатационные характеристики в достаточно широких пределах, что позволяет добиться благоприятного соотношения параметров прочности, пластичности и трещиностойкости.

Более высокий комплекс механических свойств металлов и сплавов достигается совмещением различных средств воздействия на структуру (например, термическое и деформационное воздействие). Максимальная поверхностная твердость после упрочнения пропорциональна величине углеродного эквивалента  $S_{эkv}$ , а глубина упрочнения зависит от коэффициента температуропроводности. Регулируя скорость нагрева (т.е. количество введенной энергии в поверхностный слой металла), можно получать различные соотношения возникновения центров (зародышей) и их роста. Поэтому использование скоростного нагрева позволяет различное состояние аустенита – от крупнозернистого до мелкозернистого. Аустенит, образующийся при плазменном нагреве, обладают более развитой субструктурой. Дальнейшее деформирование такого аустенита при высокой температуре приведет к значительным изменениям в субструктуре после закалки. Кроме того, микронеоднородность аустенита, образующегося при плазменном нагреве (вследствие частичной гомогенизации), при его дальнейшем деформировании приводит к образованию мелкой текстуры неоднородностей, что усложняет морфологию мартенсита после закалки. Положительное влияние на результат плазменного упрочнения оказывают термоупругие напряжения, которые с одной стороны увеличивают плотность дефектов, с другой – способствуют развитию рекристаллизационных процессов измельчения зерна.

Основная цель поверхностного упрочнения концентрированными потоками энергии сталей, чугунов, цветных сплавов, является повышение износостойкости. Однако, высоко дисперсная структура упрочненного поверхностного слоя металла, характеризующуюся высокой твердостью, оказывает определенное влияние на изменение не только износостойкости, но и других механических свойств (прочность, пластичность, выносливость, трещиностойкость) тепло- и коррозионностойкость. Кроме того, работоспособность многих деталей часто зависит не только от механических свойств, сколько от физических. Так, напри-

мер, стойкость режущего инструмента тем выше, чем меньше тепло- и температуропроводность инструментальной стали. В случае низкой теплопроводности разогрев режущей кромки инструмента меньше, так как теплоотвод осуществляется больше стружкой, чем инструментом.

Таким образом, плазменное упрочнение в сочетании с другими способами является эффективным методом упрочнения металлов.

*М.Н. Карпинский, студ.;*  
*рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ), г. Иваново*

## **ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Фундаментальная проблема современного материаловедения в машиностроении – исследование процессов, приводящих к повышению прочностных свойств материалов, механизмов упрочнения и разработка на этой основе эффективных технологий получения высокопрочных материалов. Без таких материалов невозможно дальнейшее развитие машиностроения, авиации и космической техники, судостроения, добывающей промышленности, атомной энергетики.

Повышение прочности или упрочнение материала – условно необратимое повышение прочностных характеристик при механическом, химическом, тепловом воздействии на материал. Упрочнение может достигаться, во-первых, при обработке уже полученного материала, и, во-вторых, при его получении.

Поверхностное упрочнение металлов и сплавов широко применяется во многих отраслях промышленности, в частности в современном машиностроении. Оно позволяет получить высокую твердость и износостойкость поверхностного слоя при сохранении достаточно вязкой сердцевины, способствует повышению долговечности и усталостной прочности. Некоторые методы поверхностного упрочнения отличаются высокой производительностью. В ряде случаев они с большой эффективностью используются вместо обычных методов термической обработки.

Повышению износостойкости инструмента посвящено много исследований, и как результат качественных работ в этой области – ши-

рокая номенклатура всевозможного инструмента ведущих фирм-производителей в области металлообработки. Предлагается инструмент с различным спектром износостойких покрытий, оптимальной геометрией, изготовленного из высококачественного инструментального материала для всех существующих условий работы инструмента на современном оборудовании, включая и скоростную обработку. Но, не смотря на это, для отечественного машиностроения, заводов и предприятий, где лезвийная обработка составляет 60-80% технологического процесса, проблема увеличения стойкости инструмента остается открытой. Зачастую это связано с ошибками в определении режимов обработки материалов, с неверным выбором инструментального материала для обработки и упрочняющего покрытия. Существует так же и экономическая причина – дороговизна самого инструмента. И тогда встает вопрос об улучшении режущих свойств инструмента отечественных производителей, стоимость которого отличается в разы в сравнении с продукцией иностранных поставщиков.

Наибольшее распространение в промышленности сегодня находят методы упрочнения нанесением специальных покрытий – пленок толщиной в единицы микрометров. Но следует обратить внимание на существенные недостатки, связанные с нанесением покрытий, такие как изменение геометрического размера инструмента; изменение геометрии режущего клина через радиус скругления режущей кромки; возможность отслоения покрытия; высокие напряжения между пленкой и основой. В этой связи следует обратить внимание на другие методы улучшения качества поверхности инструмента, например – лазерное упрочнение.

Лазерное упрочнение позволяет снизить в 3—4 раза износ инструмента путем повышения его поверхностной твердости при сохранении общей высокой динамической прочности, повышения теплостойкости, снижения коэффициента трения пары режущий инструмент — заготовка. Упрочнение может проводиться до передней или задней поверхности, а также одновременно по двум поверхностям.

Лазерное поверхностное упрочнение является окончательной операцией для инструмента, прошедшего полную механическую и термическую обработку. Его применяют для повышения стойкости технологической оснастки инструмента, изготовленных из различных сталей (углеродистых, легированных и быстрорежущих). Лазерный метод упрочнения основан на явлении высокоскоростного нагрева металла под действием лазерного луча до температур, превышающих температуру фазовых превращений в стали ( но ниже температуры плавления),

и последующего быстрого отвода тепла в основную массу металла. Скорости нагрева и охлаждения очень высоки. При этом образуется, как и в случае обычной закалки, структура мартенсита и остаточного аустенита. Глубина упрочненной зоны составляет до 0,1 мм. Между упрочненным слоем и основным металлом имеется зона отпуска шириной около 0,02 мм, микротвердость которой несколько ниже микротвердости исходного материала. Объем этой зоны значительно меньше объема упрочненного лазерным излучением слоя, поэтому зоны отпуска практически не влияют на износостойкость. Наличие такой зоны положительно сказывается на стойкости инструмента. Толщина упрочненного слоя в зоне лазерной импульсной закалки зависит от плотности, мощности лазерного излучения и времени импульса. Для лазерного упрочнения удлиненных кромок инструмента и деталей технологической оснастки применяют 50% перекрытие «пятен» закалки, которые обеспечивают получение упрочненной зоны практически одинаковой глубины по всей длине упрочненного слоя.

При лазерной обработке поверхностей в результате покрытия облучаемых участков на ней образуются зоны с пониженной микротвердостью материала. Наилучший результат от лазерного упрочнения получается при обработке инструментов с односторонней заточкой. В этом случае эффект упрочнения сохраняется при последующих переточках режущей кромки, поскольку переточка затрагивает лишь часть кромки и основного материала. Стойкость инструмента увеличивается в 2-10 раз.

*А.С. Спорягин, соиск.;  
рук. А.А. Киселев, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ**

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований в динамических и статических режимах импульсно-фазового электропривода [1], построенного на dsPIC контроллере и силовом интеллектуальном транзисторном модуле PM50RSD120. Исследования проводились на лабораторном стенде, включающем в себя

бесколлекторный электродвигатель 2ДВМ115 с присоединенным датчиком положения ВТ60 и нагрузочным маховиком с общим моментом инерции  $0,025 \text{ кгм}^2$ . Все испытания проводились при напряжении звена постоянного тока, равном 310 В.

На рис. 1 представлен график отработки приводом ступенчатого сигнала с амплитудой 400 об/мин и частотой 0,15 Гц при включенном датчике интенсивности с темпом  $S=50 \text{ (об/мин)/с}$ .



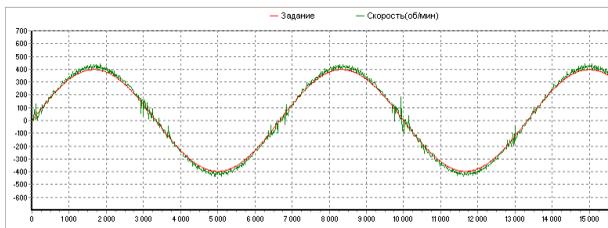
Рис. 1. Отработка импульсного сигнала с частотой 0,15 Гц и амплитудой 400 об/мин при  $S=50 \text{ (об/мин)/с}$

На участках торможения явно прослеживается влияние люфта в соединении вала двигателя с нагрузочным маховиком. Время спада частоты вращения с 400 об/мин до нуля составляет 0,3 с. Это соответствует моменту двигателя, равному 8,3 Нм, что в 3,5 раза превышает его номинальный момент (2,3 Нм). Общее время останова двигателя не превышает 0,5 сек.

Эксперименты отработки скачка управляющего сигнала при малом темпе датчика интенсивности, например при  $S=500 \text{ (об/мин)/с}$ , показали, что выбросов скорости практически не наблюдается, а время торможения до нулевой скорости не превышает 0,8 с.

Следует отметить, что при увеличении темпа ускорения  $S$  вала величина перенапряжений в звене постоянного тока уменьшается. Это объясняется тем, что из-за достаточно большой индуктивности статорных обмоток при высоких частотах вращения и при высоких темпах торможения двигатель переводится в режим торможения «противовключением», в котором двигатель потребляет ток от сети. При меньших темпах торможения оно осуществляется в генераторном режиме, когда энергия отдается в звено постоянного тока.

На рис. 2 представлен график отработки синусоидального сигнала задания скорости с частотой 0,15 Гц и амплитудой 400 об/мин.



**Рис. 2. Обработка синусоидального сигнала с частотой 0,15 Гц и амплитудой 400 об/мин**

Фазовая ошибка воспроизведения скорости  $\delta\varphi$  составляет 0,5 град или 8,7 мрад. При этом ошибка дискретизации временного интервала составляет 15 мс, что для частоты 0,15 Гц аналогично углу в 0,8 град. То есть ошибка измерения фазового рассогласования находится внутри погрешности измерения. Среднеквадратичная погрешность дискретизации  $\delta_S$  составляет 0,33 град. Ошибка воспроизведения траектории без погрешности дискретизации равна 6,5 мрад и определяется как

$$\delta\varphi_1 = \sqrt{\delta\varphi^2 - \delta_S^2}$$

Амплитуда углового перемещения определяется как

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot n}{60 \cdot 2\pi \cdot f}$$

Для принятых исходных данных в результате экспериментов получаем  $\varphi=44,4$  рад.

Ошибка воспроизведения траектории определяется как

$$\Delta\varphi = \varphi \cdot \sin(\delta\varphi_1)$$

В итоге получаем, что ошибка воспроизведения траектории на валу двигателя  $\Delta\varphi=0,29$  рад. Приведенная к валу механизма ошибка воспроизведения составляет всего 0,73 мрад.

На рис. 3 представлен гармонический состав сигнала фазовой ошибки, снятый при частоте вращения вала 135 об/мин. При этом обо-

ротная частота равна 2,25 Гц. Именно гармоника с этой частотой имеет максимальное значение, равное 6 мрад. Кроме того, достаточно большую амплитуду имеет гармоника с двойной оборотной частотой и гармоника с полюсной частотой датчика положения, частота которой равна 18 Гц, а амплитуда – 2 мрад.

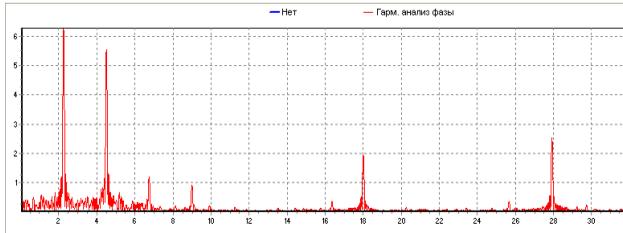


Рис. 4. Гармонический состав фазовой ошибки при частоте вращения 135 об/мин

Коэффициент неравномерности, определенный на оборотной частоте  $K_{НО}=0,0071$ , а на полюсной частоте  $K_{НР}=0,019$ . То есть, несмотря на относительно большую амплитуду фазовой погрешности, её доля влияния на неравномерность вращения вала относительно невелика.

Приведенные данные показывают, что максимальное влияние на неравномерность вращения вала оказывают пульсации сигнала ВТ60, обусловленные его внутренними погрешностями измерения положения вала. Из анализа гармонического состава фазовой ошибки видно наличие не соосности и не параллельности осей вращения сопрягаемых элементов лабораторного макета.

Анализ ошибок в статических режимах показывает, что коэффициент неравномерности при частоте вращения 0,2 об/мин составляет 8,4%, а среднеквадратичная угловая ошибка равна 1,84 мрад. Измерения проводились за время поворота на угол 1,263 град (22 мрад). Если считать, что в среднем коэффициент редукции реального приводного механизма станка равен 400, то угловая ошибка равна 0,055 мрад, а приведенная угловая ошибка составляет 0,0046 мрад.

В результате исследований также установлено, что даже при большой маховой массе при торможении двигателя с частот вращения от 800 об/мин выброс энергии в сеть минимален. Величина перенапряжений в звене постоянного тока не превышает (30-50) В и составляет 350 В, а узел сброса энергии, настроенный на напряжение срабатывания 380 В, не срабатывает.

Максимальная частота вращения вала двигателя при напряжении звена постоянного тока 310 В составляет  $\pm 1200$  об/мин, что соответствует практически максимальной степени использования возможностей двигателя для точного машиностроительного оборудования.

#### Библиографический список

1. **Фалеев М.В.** Импульсно-фазовые электроприводы мехатронных модулей. / М.В. Фалеев, А.Н. Ширяев. – ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» - Иваново, 2008. – 216 с.

*А.С. Хахалин, студ.;*  
*рук. Л.И. Птуха, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СТАНКОВ

Машиностроение является основой научно-технического прогресса в различных отраслях народного хозяйства. Непрерывное совершенствование и развитие машиностроения связано с прогрессом станкостроения, поскольку металлорежущие станки вместе с некоторыми другими видами технологических машин обеспечивают изготовление любых новых видов оборудования.

О высоком уровне развития конструкторской мысли западных гигантов ежегодно дают возможность судить экспозиции с их участием специализированных отраслевых выставках, где часто впервые демонстрируются новые станки. Ряд новинок в области металлообработки были представлена на последнем форуме «Mashex».

Последнее ноу-хау японской **фирмы «DANLIN»** – новые модели вертикальных фрезерных **станков** колонного типа для высокоскоростного чистового и получистового фрезерования – MCV-510 и MCV-1200. Станки разработаны для высокоскоростной обработки деталей типа пресс-форм, штампов и других деталей общего машиностроения, оснащены направляющими качения, что обеспечивает высокие скорости быстрых перемещений и значительно сокращает общее время обработки. А широкий выбор типа и характеристик привода шпинделя,

элементов дополнительного оснащения дает возможность скомплектовать **станок**, в полной мере отвечающий потребностям конкретного производства.



Существенные заделы для производства сложных видов станкостроительной продукции имеются на ряде отечественных заводов. К примеру, многооперационные обрабатывающие центры и гибкие производственные модули создаются и осваиваются на «Стерлитамакском станкозаводе – МТЕ» и «Савеловском машзаводе», заводах «Красный пролетарий», «Саста», «РСЗ», MAO «Седин», «ИЗТС». Современные внутришлифовальные автоматы и круглошлифовальные прецизионные станки производятся на Владимирском станкозаводе «Техника», зубообрабатывающие **станки** с ЧПУ – на Саратовском и Рязанском станкозаводах.

Так, **ОАО «Ивановский завод тяжелого станкостроения»** – одно из крупнейших станкостроительных предприятий по производству высокотехнологичного и наукоемкого оборудования – выпускает и предлагает к продаже высокоточные горизонтально-расточные станки, обрабатывающие центры с грузоподъемностью стола до 25 т. Среди последних новинок – мощный высокоскоростной горизонтальный **станок** ИСБ 1200-2.

ИСБ-1200.

Новый быстроходный обрабатывающий модуль ИСБ-1200 отличается скоростным выдвигным шпинделем диаметром 130 мм, вращающимся со скоростью до 2250об/мин с высоким крутящим моментом



1700Нм, мощностью 30кВт, высокой скоростью установочных перемещений 20 м/мин. Подача СОЖ осуществляется как внешним поливом, так и через шпиндель под давлением до 5МПа.

Станок имеет ограждение зоны обработки кабинетного типа и двух- или пятиместный накопитель сменных паллет размером 1200\*1200 мм.

Преимуществом является полная автоматизация модуля и возможность обработки на нем деталей комплектно., то есть на каждой паллете размещаются различные детали, и при завершении цикла обработки по все паллетам получается полностью обработанный комплект, отпадает необходимость синхронизация прохождения деталей на операциям. Производственная программа наращивается установкой модуля-дублера. Имея автоматическую загрузку паллет из накопителя большой емкости, реализуется принцип безлюдной технологии.

Несомненный интерес представляет также тяжелый горизонтальный обрабатывающий центр ИР1600МФ4 для обработки крупногабаритных корпусных деталей из черных и цветных металлов в условиях серийного производства массой до 40 т, длиной до 8 м и высотой до 2 м. Станок имеет усиленный выдвижной шпиндель диаметром 160 мм, рабочий стол 1600x2000 мм (2000x2500 мм),

стендовые плиты 2700x4000 мм (2700x8000 мм). Конструктивные особенности: прецизионные шариковинтовые пары по всем осям, стальная телескопическая или рулонная защита направляющих, бесконсольная термосимметричная конструкция шпиндельной бабки, расположенной внутри стойки портального типа (гарантирует высокую жесткость и виброустойчивость при работе в тяжелых режимах и обеспечивает высокую точность обработки), фрезерный шпиндель в радиальном направлении смонтирован в двух прецизионных двухрядных цилиндро-роликовых подшипниках, а в аксиальном направлении – в двух прецизионных двухрядных радиально-упорных подшипниках. На фрезерном шпинделе могут устанавливаться фрезы с помощью специального фланца, входящего в комплект поставки станка, на правом торце стойки **станков** установлен лифт с индивидуальным приводом, на котором расположено рабочее место оператора, на левом торце стойки станка модели ИР1600МФ4 смонтировано устройство автоматической смены инструмента с магазином на 80 инструментов и двух-захватным поворотным манипулятором; автоматическая централизованная система дозированной смазки.

#### **Токарно-фрезерный станок DMG CTX gamma 2000 TC**



В итоге можно сказать, что современное развитие технологий не ограничивается на перечисленном выше оборудовании. С каждым днем изобретаются все новые приспособления, инструменты, станки. И представленные в данном докладе станки, всего лишь малая часть того современного станкостроения, которая существует на сегодняшний день.

*Т.А. Носкова, студ.; Д.В. Журавлев, студ.;*

*Л.И. Птуха, к.т.н., доц.*

*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ РЕЛЬЕФА**

Геоморфологией называется наука, занимающаяся изучением и описанием форм земной поверхности. Совокупность форм поверхности, характеризующих ту или иную часть литосферы, называют рельефом. Рельеф складывается из отдельных элементов - элементарных форм.

Зарисовка и фотографирование являются могущественным подспорьем при геоморфологических исследованиях и описаниях. Фотографическая камера далеко не всегда может дать желательное представление о тех деталях рельефа, которые исследователю представляются наиболее важными. В таких именно случаях на помощь должен прийти рисунок эскизный или полный. Особый вид схематических перспективных рисунков, получивших широкое применение в современной геоморфологии и действительно могущих оказать в деле геоморфологического освещения изучаемой территории весьма ценные услуги, представляют так называемые блокдиаграммы. Блокдиаграммами называются такие схематизированные изображения рельефа, по которым можно одновременно получить представление и о геоморфологии и о геологическом строении района. Данные о рельефе могут быть получены путем натуральных измерений, включая топогеодезические работы на местности, промерные работы на водоемах, дистанционное зондирование, а также на основе картометрических работ.

Описание рельефа и обнажений обычно сопровождается зарисовкой характерных форм рельефа (или комплексов форм) и обнажений, их фотографированием, составлением схематических геолого-геоморфологических профилей. В последнем случае довольно часто прибегают к инструментальным способам полевых исследований, в частности, к использованию нивелиров или теодолитов-тахеометров. Применение топографо-геодезических инструментов чаще всего бывает необходимо для составления детальных геолого-геоморфологических профилей, для получения точных данных о высоте речных или морских террас, о глубине эрозионных врезов, о величине углов наклона склонов и т. п.

Методы исследований, используемые с 30 - 50-х гг. XX в.

Из этих методов особенно большую популярность получили аэро-методы -- исследование территории с помощью летательных аппара-

тов. Они подразделяются на аэровизуальные и различные виды съемок, из которых в физико-географических исследованиях находит применение аэрофотосъемка.

*Объектно-ориентированная цифровая модель рельефа.*

Предлагается физико-математическая цифровая модель, описывающая реальную земную поверхность, обеспечивающая дискретное и континуальное представление и анализ рельефа и динамическое моделирование в трехмерном геоинформационном пространстве.

Физико-математическая модель рельефа создается в результате интеграции двух моделей:

векторного дискретно-континуального представления поверхности рельефа на основе метода «сферической квадратоангуляции» и растровой физической модели гравитационного переноса.

## Голография

Голография (т. е. «полная запись», от греческого: голос — весь, графо — пишу) есть особый способ фиксирования на фотопластинке структуры световой волны, отраженной предметом. При освещении этой пластинки (голограммы) пучком света зафиксированная на ней волна восстанавливается в почти первоначальном виде, так что при восприятии восстановленной волны глазом зрительное ощущение бывает практически таким, каким оно было бы при наблюдении самого предмета.

Голография была изобретена в 1947 г. английским физиком Д. Габором. Однако полное осуществление идеи Габора стало возможным только после появления в 1960 г. источников света высокой степени когерентности — лазеров. Исходная схема Габора была усовершенствована американскими физиками Э. Лейтом и Ю. Упатниксом, которые получили в 1963 г. первые лазерные голограммы. Советский ученый Ю. Н. Денисюк предложил в 1962 г. оригинальный метод фиксирования голограмм на толстослойной эмульсии. Этот метод, в отличие от голограмм на тонкослойной эмульсии, дает цветное изображение предмета.

Мы ограничимся элементарным рассмотрением метода получения голограмм на тонкослойной эмульсии. Испускаемый лазером световой пучок, расширенный с помощью системы линз, делится на две части. Одна часть отражается зеркалом к фотопластинке, образуя так называемый опорный пучок 1. Вторая часть попадает на пластинку, отразившись от фотографируемого предмета; она образует предметный пучок

2. Оба пучка должны быть когерентными. Это требование выполняется, поскольку лазерное излучение обладает высокой степенью пространственной когерентности (световые колебания когерентны по всему поперечному сечению лазерного пучка). Опорный и предметный пучки, налагаясь друг на друга, образуют интерференционную картину, которая фиксируется фотопластинкой.

Экспонированная таким способом и проявленная фотопластинка и есть голограмма. В образовании голограммы участвуют два пучка света, в связи с чем описанная схема получения голограмм называется двухлучевой.

Для восстановления изображения проявленную фотопластинку располагают относительно источника света так, как она находилась при фотографировании, и освещают опорным пучком света (часть лазерного пучка, которая освещала при фотографировании предмет, теперь перекрывается). Опорный пучок дифрагирует на голограмме, в результате чего возникает волна, имеющая точно такую структуру, как волна, отражавшаяся предметом. Эта волна дает мнимое изображение предмета, которое воспринимается глазом наблюдателя. Наряду с волной, образующей мнимое изображение, возникает еще одна волна, которая дает действительное изображение предмета. Действительное изображение псевдоскопично; это означает, что оно имеет рельеф, обратный рельефу предмета, - выпуклые места заменены вогнутыми и наоборот.

Рассмотрим характер голограммы и процесс восстановления изображения. Пусть на фотопластинку падают два когерентных параллельных пучка световых лучей, идущих под углом друг к другу. Пучок 1 является опорным, пучок 2 — предметным (предмет в данном случае представляет собой бесконечно удаленную точку). Для простоты предположим, что пучок 1 падает на пластинку нормально. Все полученные ниже результаты останутся справедливыми и при наклонном падении опорного пучка, однако формулы в этом случае более громоздки.

Вследствие интерференции опорного и предметного пучков на пластинке образуется система чередующихся прямолинейных максимумов и минимумов интенсивности. Пусть точки А и В соответствуют серединам соседних интерференционных максимумов.

Зафиксировав на пластинке (путем экспонирования и проявления) интерференционную картину, направим на нее опорный пучок 1. Пластинка для этого пучка играет роль дифракционной решетки, период  $d$  которой определяется формулой.

## Секция 24. ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ, ВИБРОДИАГНОСТИКА

Председатель – к.т.н., доцент **Ноздрин М.А.**

Секретарь – ассистент **Круглов А.В.**

*А.В. Круглов, асс.*

*(ИГЭУ, г. Иваново)*

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО МАТЕРИАЛА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИБРОИСПЫТАНИЙ КОНСОЛЬНОГО СТЕРЖНЯ

Исследуются свободные колебания жестко-защемленного стержня из твердого поливинилхлорида (PVC-U). Приводится численное решение уравнения свободных колебаний нелинейной системы с одной степенью свободы методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Производится оптимизация решения методом Нелдера-Мида по ключевым параметрам, по результатам которой определяются параметры диссипации и нелинейности материала.

Широкое применение в промышленности поливинилхлорид получил вследствие своих хороших электроизоляционных свойств, высокой стойкости к кислотам, щелочам и растворам солей, самозатуханием после удаления пламени, возможностью легкой обработки с помощью сварки, термоформованием и др. Типичные области применения данного материала это химическая промышленность, машиностроение, медицина [1].

Для вывода уравнения колебаний стержня принимается связь между механическим напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $\varepsilon$

в виде:  $\sigma = E(\varepsilon + \alpha\varepsilon^3 + \eta_0\dot{\varepsilon} + \beta\dot{\varepsilon}^3)$ , где  $E$  – модуль упругости первого рода (модуль Юнга),  $\alpha$  – коэффициент упругой нелинейности,  $\beta$  – коэффициент нелинейности диссипации,  $\eta_0$  – коэффициент внутреннего трения [2].

Далее, пользуясь технической теорией изгиба [3], принятой связью между напряжениями и деформацией для нелинейно-упругих матери-

алов и произведя некоторые математические действия, было получено уравнение изгибных колебаний стержня из нелинейно-упругого материала (точками в уравнении обозначены производные по времени, штрихами – по координате):

$$\gamma\alpha(6w''(\dot{w}''')^2 + 3(\dot{w}''')^2 w^{IV}) + \gamma\beta(6\dot{w}''(\dot{w}''')^2 + 3(\dot{w}''')^2 \dot{w}^{IV}) + \omega_0^2(w^{IV} + \eta_0 \dot{w}^{IV}) + \dot{w} = 0,$$

где введены следующие обозначения: безразмерное перемещение  $w_* = w/L$  и координата  $x_* = x/L$  (звездочки далее опускаем),

$$\omega_0 = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{EJ_y}{\rho F}}, \quad \gamma = \frac{EJ_{yy}}{\rho F}, \quad w - \text{перемещение точек средней линии}$$

стержня,  $M$  - изгибающий момент,  $L$  - длина стержня,  $\rho$  - плотность материала,  $F$  - площадь поперечного сечения стержня,

$$J_y = \int_F z^2 dF, \quad J_{yy} = \int_F z^4 dF - \text{моменты инерции сечения второго}$$

и четвертого порядков соответственно,  $z$  - координата точек сечения по вертикали.

Решение данного уравнения представим в виде разложения по базисной функции в одномодовом и двумодовом приближениях. После подстановки выбранных базисных функций в полученное ранее уравнение свободных колебаний и применив процедуры Бубнова-Галеркина, получим уравнение свободных колебаний нелинейной системы с одной и двумя степенями свободы, которые затем решаются методом Рунге-Кутты четвертого порядка с контролем погрешности на двойном шаге интегрирования, при этом минимизируется целевая функция:

$$Z = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{i=1}^K (\varphi_i - \varphi_{i*})^2}, \quad \text{где } \varphi_i - \text{результат интегрирования урав-$$

нения в  $i$ -ой точке,  $\varphi_{i*}$  - массив экспериментальных данных,  $K$  - число экспериментальных точек. Целевая функция является осредненным значением разницы между теоретическим и экспериментальным результатом в рассматриваемом массиве данных.

По результатам эксперимента исследования свободных колебаний стержня из поливинилхлорида был сформирован массив данных  $\varphi_{i*}(t_i)$  в интервале одной секунды с шагом  $h = 4 \cdot 10^{-4} \text{ c}$  [4].

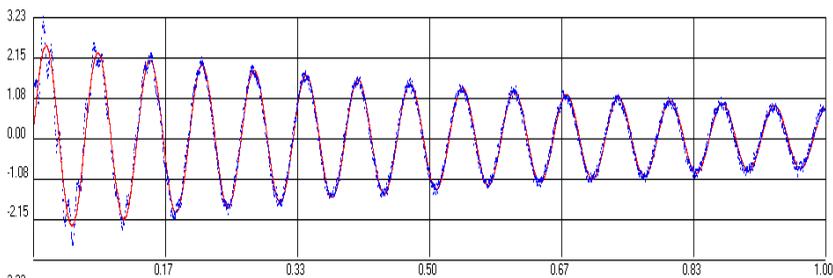
Далее производилась оптимизация методом Нелдера-Мида по шести параметрам: модуль упругости материала  $E$ , коэффициент внутреннего трения  $\eta_0$ , коэффициент упругой нелинейности  $\alpha$ , коэффициент нелинейности диссипации  $\beta$ , начальные условия  $\varphi(0), \dot{\varphi}(0)$ . По результатам оптимизации получены следующие значения:

$$E = 3,258 \text{ ГПа}, \quad \eta_0 = 2,364 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

$$\alpha = -1,886 \cdot 10^4, \quad \beta = -6,22 \text{ с}^3.$$

при этом значение целевой функции равно 0,148.

На рис. 1 сопоставлены результаты экспериментальных данных виброускорения (показаны синим цветом) и численного решения уравнения с учетом полученных параметров по результатам оптимизации (сплошная красная кривая).

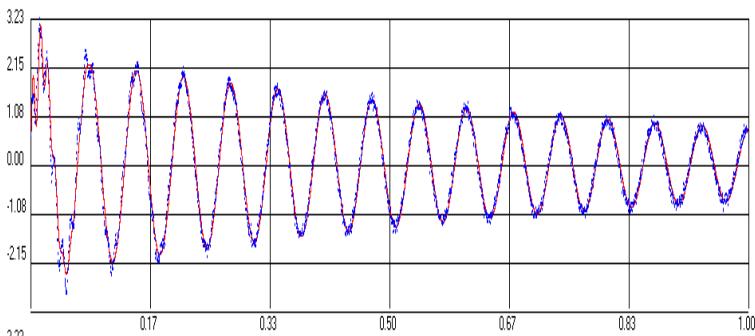


**Рис. 1. Сопоставление данных эксперимента (синий цвет) и численного решения (красный цвет) с учетом только первой гармоники**

В случае системы с двумя степенями свободы оптимизация проводится по восьми параметрам, т.к. необходимо учитывать еще два начальных условия. Минимуму целевой функции  $Z=0,114$  соответствуют значения параметров материала:

$$E = 3,259 \text{ ГПа}, \quad \eta_0 = 2,456 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad \alpha = -1,005 \cdot 10^3, \quad \beta = -0,237 \text{ с}^3.$$

Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей  $\dot{w}(l)$  приведено на рис. 2.



**Рис. 2.** Сопоставление данных эксперимента (синий цвет) и численного решения (красный цвет) с учетом второй гармоники

Учет в решении задачи второй формы колебаний балки позволяет значительно улучшить совпадение зависимостей виброускорений. Полученное значение модуля упругости материала совпадает при учете одной и двух форм колебаний, значения параметра диссипации различаются в пределах 5%. Значения параметров нелинейности различаются на порядок, что говорит о необходимости их дальнейшего уточнения и совершенствования методики идентификации.

#### Библиографический список

1. **Technical data sheet.** Röchling. High Performance Plastics. [электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.roechling.com/en/high-performance-plastics/thermoplastics/materials/trovidur/trovidur-en.html>
2. **Муницын А.И.** Пространственные колебания консольного стержня из нелинейно-упругого материала / А.И. Муницын // Вестник машиностроения. – 2009. – № 6. – С. 24-27.
3. **Прочность. Устойчивость. Колебания.**: Справочник. В 3-х т. – М.: Машиностроение, 1968. – Т. 3./ Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. 1968. – 567 с.: ил.
4. **Иорш Ю.И.** Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ГНТИМЛ, 1963. – 756 с.

*И.А. Еремченко, студ.; М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЫШЕЧНО-СУХОЖИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ГОЛЕНИ ЧЕЛОВЕКА**

Результаты биомеханических исследований лежат в основе инженерных расчетов при разработке новых или усовершенствовании имеющихся медицинских приборов, создании различного рода протезов и экстракорпоральных систем, хирургических инструментов, а также используются для расчета и оптимизации конструкций тренажеров и спортивных снарядов, специальной одежды. Наиболее эффективно достижения Б. реализуются в травматологии и ортопедии при создании эндопротезов с учетом адаптационных свойств тканей.

Повреждение ткани вызывает изменение жесткости исследуемой структуры и характеристик демпфирования (трения). В свою очередь, это неизбежно приводит к изменению частоты собственной колебательной структуры и частоты резонансных колебаний [1].

Физической основой метода вибродиагностики является понятие биомеханического резонанса. На обследуемый объект посредством вибровозбудителя подается гармонически изменяющаяся сила с частотой, совпадающей с собственной частотой колебаний виброобъекта. В итоге сотрудничества медиков, инженеров, технологов, биологов, программистов создан комплекс для вибрационной диагностики при повреждениях и заболеваниях конечностей [2].

Влияние вибрации сопровождается специфическими и неспецифическими реакциями физиологических систем. Разные органы, структуры, ткани имеют свои частоты, и задача состоит в выявлении их, измерении и правильном использовании этих данных для диагностики и лечения.

В качестве объекта рассматривается голень человека и ее физическая модель (рис1).

Основные задачи:

- ✓ нахождение собственной частоты колебания экспериментальной модели голени человека
- ✓ провести сравнительный анализ результатов четырех опытов – на реальной голени и экспериментальном стенде с расслабленным и натянутым ахилловым сухожилием

- ✓ определить чувствительность комплекса вибрационной диагностики
- ✓ выработка рекомендаций на основании полученных данных

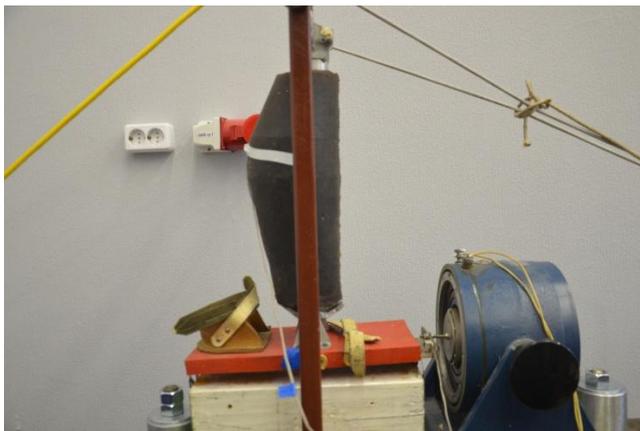


Рис. 1 Экспериментальный стенд

Результаты измерений представлены на графике (рис. 2)

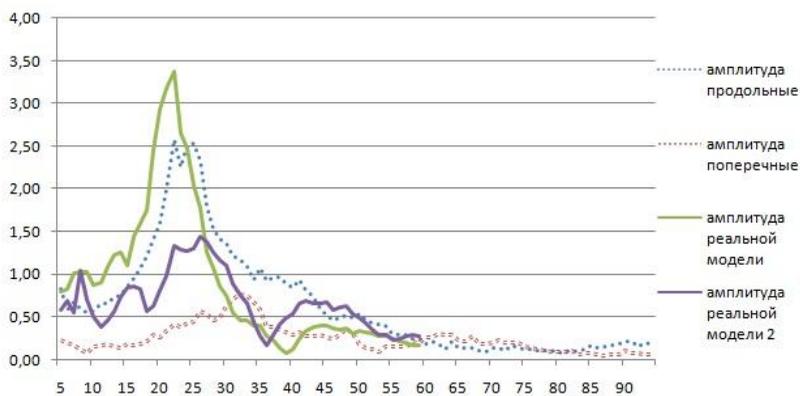


Рис. 2 Амплитудно-частотные характеристики реальной и физической модели мышечно-сухожильного комплекса человека

Проведение экспериментов позволяет сделать выводы о точности и чувствительности программного комплекса и экспериментального стенда в целом.

#### Библиографический список

1. **К.В.Фролов** и др. Вибрационная биомеханика. Использование вибрации в биологии и медицине/ М.: Наука. 1989. 142 с.
2. **Мальшев И.В.** и др.. Стенд для вибродиагностики ахиллова сухожилия. Патент РФ № 2077266. Б.И.1997. №11

*А.Ю.Киселёв, студ.; А.И.Муницын, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

### РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ МОДЕЛЕЙ ТРЕНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований разработана конструкция на четырех гибких, жестко закрепленных стойках, к которым подведен источник вибрации (рис.1). Для определения коэффициента трения на верхнюю поверхность установки помещался груз.

Рассмотрим 2 случая, когда проскальзывания нет, и когда проскальзывание есть.

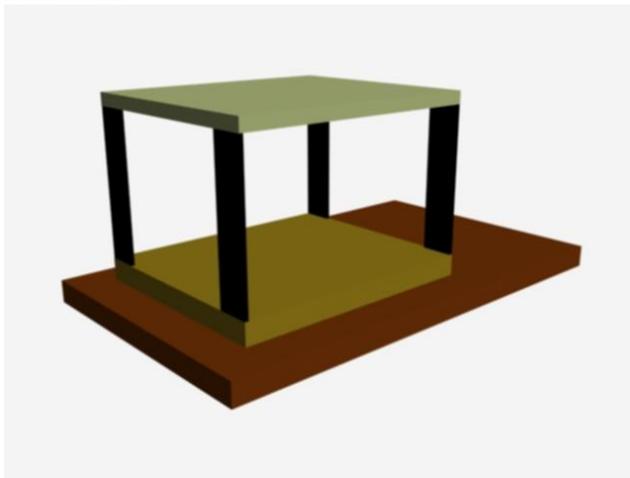


Рис.1. Экспериментальный стенд

1 случай – проскальзывания нет.

$$U = 0.$$

$$\text{Тогда, } F_{\text{тр}} = \mu \cdot m_1 \cdot g \cdot \text{sign}(U) = m_1 \cdot A \cdot \theta \cdot \cos(\theta t).$$

$$\text{В результате получаем: } \mu \cdot m_1 \cdot g \geq m_1 \cdot A \cdot \theta$$

2 случай – проскальзывание есть.

$$m_1 \cdot \ddot{u} + \mu \cdot m_1 \cdot g \cdot \text{sign}(U) = m_1 \cdot A \cdot \theta \cdot \cos(\theta t + \phi).$$

$$\text{Принимаем } U = B \cdot \cos(\theta t).$$

Находим амплитуду величины проскальзывания груза по плоскости стола установки:

$$B := \sqrt{A^2 - \left(\frac{4 \cdot \mu \cdot g}{\pi \cdot \theta}\right)^2},$$

$$\theta = \frac{4 \cdot \mu \cdot g}{\pi \cdot A}.$$

Проведённые расчёты используются для разработки лабораторного стенда по исследованию моделей трения.

*П.О. Норовков, студ.; Л.Б. Маслов, д.ф.-м.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЁТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Тема работы выбрана по месту преддипломной практики на предприятии ОАО «Электротяжмаш-Привод», г. Лысьва Пермского края. Основное направление деятельности ОАО «Электротяжмаш-Привод» – производство электродвигателей различных типов.

Предварительный этап научно-исследовательской работы на предприятии:

- 1) ознакомление с рабочими документациями и чертежами электродвигателей;
- 2) визуальные осмотры конструкций;
- 3) работа в программных комплексах SolidWorks, Компас;

- 4) расчет собственных частот двигателей взрывозащищенных асинхронных обдуваемых ВАО5-560-400-2(Д)У2, ВАО5-560-500-2(Д)У2, ВАО5-560-630-2(Д)У2 (рис. 1).

Главная задача научно-исследовательской работы заключается в расчете собственных частот каждой детали в отдельности, а так же целого двигателя в сборе. Расчет проводится в программном комплексе Solid Works и Ansys Workbench.

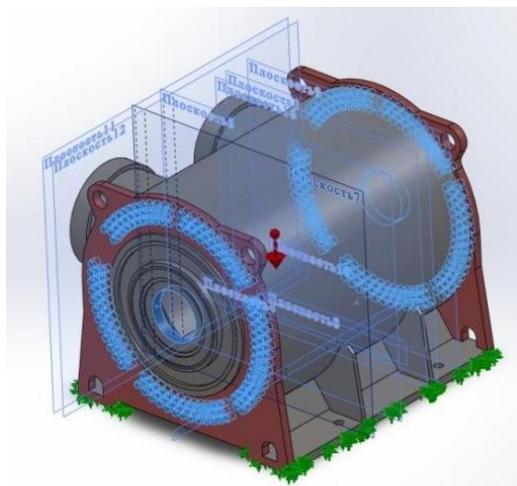


Рисунок 1. Двигатель ВАО5-560-400-2(Д)У2.

Одним из этапов проектирования является упрощение деталей двигателя, их расчет в программе Ansys Workbench, а также сравнение результатов с оригиналами. Основной проблемой является совпадение собственных частот электродвигателя с критическими.

При расчете собственных частот сердечника, щита, трубки охлаждения и целого двигателя в программе Ansys Workbench получены следующие результаты:

**Таблица 1. Результаты расчета собственных частот деталей**

	Трубка охлаждения	Сердечник	Щит	Двигатель в сборе
1.	111,62	458,88	483,35	249,19
2.	111,63	460,1	483,47	328,53
3.	305,6	670,16	768,68	350,88
4.	305,61	671,3	851,33	399,77
5.	593,15	1173,1	851,58	401,05
6.	593,16	1175,9	1041,7	419,42
7.	967,79	1468,6	1043,	431,47
8.	967,8	1469,6	1165,4	444,79
9.	1207,7	1801,9	1167,9	469,78

Второй этап: упрощение конструктивных особенностей сердечника и щита для расчётов, так как сложные конфигурации сердечника и щита затрудняют расчет, но не влияют на конечные результаты. Повторный расчет «упрощенных» деталей, табл. 2.

**Таблица 2. Результаты расчета собственных частот упрощенных деталей**

	Сердечник	Щит	Двигатель в сборе
1.	460,04	485,53	245,29
2.	460,28	485,62	320,37
3.	671,3	774,73	343,15
4.	671,41	859,2	397,39
5.	1175,8	859,5	400,87
6.	1176,	1048,	415,09
7.	1470,1	1050,1	422,7
8.	1470,2	1169,	430,01
9.	1801,4	1171,8	454,74

В работе проводится анализ собственных частот деталей электродвигателя.

*С.С. Попов, студ.; Ф.Б. Огурцов к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИБРАЦИИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ**

Подшипники качения являются самым распространенным и наиболее уязвимым элементом любого роторного механизма. Они осуществляют пространственную фиксацию вращающихся роторов и воспринимают основную часть статических и динамических усилий, возникающих в механизме. Поэтому техническое состояние подшипников является важнейшей составляющей, определяющей работоспособность механизма в целом.

Для повышения ресурса и надежности оборудования, сокращения затрат, связанных с ремонтом и простоями, необходима точная систе-

ма диагностирования текущего технического состояния подшипников качения. Широкое распространение во всём мире получили методы контроля и диагностики подшипников качения, базирующиеся на измерении параметров вибрации. Обусловлено это тем, что вибрационные сигналы несут в себе информацию о состоянии механизма и подшипников в частности. При этом теория и практика анализа вибросигналов к настоящему времени столь отработана, что можно получить достоверную информацию о текущем техническом состоянии не только подшипника, но и его элементов.

В настоящее время на практике используются четыре метода оценки технического состояния подшипников качения:

1. [метод ПИК-фактора;](#)
2. [метод прямого спектра;](#)
3. [метод спектра огибающей;](#)
4. [метод ударных импульсов.](#)

Правильная смазка необходима для успешной эксплуатации любого подшипника. Успешный выбор подшипника подразумевает выбор оптимального вида смазки, необходимого ее количества и способа подачи смазки в подшипник.

Смазка выполняет три основополагающих функции:

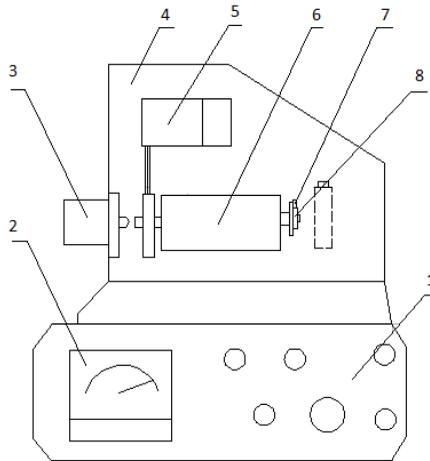
- разделение сопряженных поверхностей
- теплопередача (жидкая смазка)
- защита от коррозии и, в случае консистентной смазки, от проникновения посторонних частиц.

В ходе проектирования рассмотрены следующие задачи:

- количественная оценка чувствительности метода при диагностике подшипников;
- накопление базы данных дефектов подшипника;
- исследования влияния состояния смазки на характеристики диагностических признаков.

На рис. 1 приведен эскиз стенда.

На основании 1 расположены органы управления двигателем и прибор 2 предназначенный для отображения частоты вращения вала 9, для определения частоты вращения служит тахогенератор 3. На подвижном основании 4 установлен электродвигатель СЛ261, который через ременную передачу приводит во вращение вал 9, установленный в подшипниковом узле 6. На валу установлена насадка-переходник 8 для шарикоподшипника типа 203 (на эскизе показана в сборке).



**Рис.1. Эскиз экспериментального стенда**

#### **Библиографический список**

1. **Барков А.В.** Диагностика и прогнозирование технического состояния подшипников качения по сигналу вибрации.-Судостроение,1985.
2. **Мартин Анжело.** Мониторизация механических колебаний машинного оборудования.- Брюль и Къер, Технический обзор №1, 1987.

*А.А. Rogozin, студ.; А.Б. Колобов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВИБРОМОНИТОРИНГ РОТОРНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Вибромониторинг оборудования должен реализовывать следующие принципы:

- осуществляться на основе измерения и анализа параметров вибрации при в рабочих режимах эксплуатации роторного электромеханического оборудования;

– выполняться по технологии «off-line» контроля с использованием переносных измерительных средств - виброметров и поддерживаться программной системой для ведения базы данных;

– использовать разработанную методику определения технического состояния оборудования на основе распределения вибрации в контрольных точках, оценки текущего запаса работоспособности по предельному состоянию и влияния параметров распределения вибрации на выбор пороговых значений технических состояний, а также формирования эталонов состояния и распознавания принадлежности оборудования к виду технического состояния.

Исходная база данных измерений вибрации принята по результатам измерения на сетевых насосах АЦМС-90-3 (агрегаты центробежные моноблочные секционные высокого давления), представляющий вертикальный электронасосный агрегат с центробежным многоступенчатым секционным насосом. Привод - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А. Измерения вибрации проводились виброметром VD-200М.

В ходе работы сформирован эталон работоспособного состояния в виде усредненного вектора значений СКЗ виброскорости в реперных точках. Считая, что распределение вибрации подчиняется нормальному закону, а оценки числовых характеристик СКЗ виброскорости происходит в условиях ограниченной выборки, рассчитываются границы доверительного интервала с доверительной вероятностью 90%.

Распознавание видов технического состояния произведено метрическими методами. Оценена эффективность распознавания при использовании различных метрик: евклидово расстояние, расстояние Хемминга и квадрат расстояния. Наиболее эффективным является метрика Хемминга, поскольку отличается стабильностью во времени.

Использование контурного распределения вибрации для определения технического состояния не отменяет количественного нормоконтроля вибрации согласно ГОСТ 10816. Ввиду недостаточной статистики, позволяющей корректно сформировать эталон работоспособного состояния и заниженные значения порогов в ГОСТ, что вызвано их универсальностью, необходимо проанализировать возможность исключения некорректных ситуаций, связанных с превышением уровней вибрации в контурных точках порогового значения и одновременно гарантированным нахождением объекта в работоспособном состоянии. Для этого произведены исследования влияния на выбор порогового значения параметров распределения вибрации в работоспособном со-

стоянии и состоянии с ограниченной работоспособностью (с подозрением на дефект).

Основываясь на статистических методах распознавания для одномерных диагностических признаков, выберем такое значение СКЗ виброскорости, при котором минимизируется целевая функция среднего риска (минимум среднего риска). Поскольку вибрация лишь с определенной вероятностью характеризует состояние объекта, то имеется случайный разброс значения диагностического признака (СКЗ виброскорости) в пределах каждого из технических состояний.

Поскольку плотности распределения вибрации в распознаваемых состояниях пересекаются, то принципиально невозможно выбрать то единственное пороговое значение, которое позволяло бы получить минимальное количество ошибок и минимизировать средний риск. В отношении правдоподобия, получаемого из условия минимума среднего риска, входят условные цены ошибок первого и второго рода и априорные вероятности нахождения оборудования в диагностируемых состояниях. В виду трудности достоверной оценки величин указанных параметров рассмотрен частный случай метода минимального риска - метод наибольшего правдоподобия, когда пороговое значение отношения правдоподобия принимается равным 1, что соответствует точке пересечения плотностей распределения.

Произведено моделирование зависимости изменения порогового значения от числовых характеристик распределения. Диапазон значений СКО определен из условия, что максимальное значение не должно превышать трети среднего значения СКЗ виброскорости.

Оценка остаточного ресурса проводилась на основе регрессионной модели. Основой для проведения технического обслуживания оборудования является выдача прогнозных значений.

Полученные результаты могут быть использованы при постановке спецкурсов для учебного процесса подготовки бакалавров по направлению 010800.

*А.В. Белов, студ.; В.И. Шапин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КИСТИ РУКИ**

В работе рассматривается устройство МКИ-А61, которое способно регистрировать пространственные измерения силовых и кинематических параметров кисти.

Устройство МКИ-А61 относится к устройствам для диагностики, и может быть использовано для функционального исследования в травматологии, ортопедии, хирургии, неврологии, спортивной медицине, в процессе реабилитации, для профотбора, исследований в физиологии труда, спорта, экспертиз трудоспособности, для оценки мышечной усталости, мышечной памяти.

Устройство включает фиксатор локтевого сустава. На неподвижном основании установлен узел, позволяющий осуществить вращательное движение кисти относительно трёх координатных осей, измерять датчиками соответствующие углы поворота при синхронном измерении силы посредством кистевого динамометра на базе тензометрического моста и блока управления и регистрации результатов. Технологический результат заключается в обеспечении объективной оценки функционального состояния мышц кисти и предплечья при различном пространственном расположении кисти.

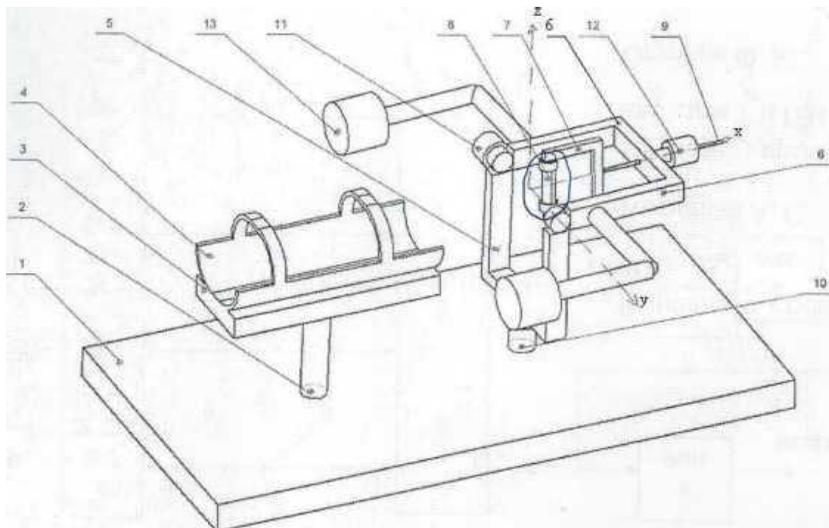
Целью устройства МКИ-А61 является рассмотрение функциональных возможностей динамометрических исследований и повышение их точности.

Указанный результат применительно к динамометрии кисти достигается тем, что устройство содержит механическую часть, и измерительный блок.

На рис. 1 показаны элементы устройства МКИ-А61.

На общем основании 1 установлен узел фиксации локтевого сустава, состоящий из регулируемой по высоте стойки 2 и опорной площадки 3 с закреплённым на ней ложементом 4.

На этом же основании установлен узел, позволяющий осуществлять вращательное движение кисти последовательно относительно трех координатных осей:  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Он включает три рамы: вертикальную — 5 горизонтальную - 6 и рабочую рамку кистевого захвата 7.



**Рис. 1. Устройство для пространственного измерения силовых и кинематических параметров кисти**

На рамке кистевого захвата установлен опорный элемент - рукоятка 8, выполненный в виде двух полуцилиндрических траверс, диаметр которых может изменяться путём наложения и снятия сменных накладок, выполненных в виде полых деревянных полуцилиндров и встроенным датчиком силы на базе тензометрического моста из восьми тензодатчиков.

Компенсация веса рамок 6 и 7, захвата 8 посредством регулируемых грузов - противовесов 13.

Положение рукоятки вдоль продольной оси может регулироваться посредством регулировки крепления оси 9.

В шарнирах рам установлены датчики угла поворота кисти резистивного типа: относительно вертикальной оси  $Z$  - 10, горизонтальной оси  $y$  - 11 и продольной оси  $x$ — 12.

Таким образом, устройство позволяет при фиксированном локтевом суставе совершать вращательное движение кисти последовательно относительно всех трёх координатных осей.

В процессе работы пациент сжимает рукоятку 8 с определённым диаметром двух сменных накладок и совершает заданные пространственные формы движения кисти.

Измерение положения кисти по трём угловым координатам проводится с погрешностью  $\pm 1$  градус в диапазоне  $\pm 120^\circ$  при дискретности измерения во времени не более 0,1 с. Измерение тяговых характеристик проводится в диапазоне от 0 до 100 кгс с погрешностью  $\pm 1$  кгс и дискретностью измерения во времени не более 0,1 с и допустимым дрейфом нуля в процессе измерений - не более 2 кгс в минуту. Предусмотрен вывод результатов измерения в виде фазовых диаграмм сила-угол по трём координатам с возможностью их сохранения и протоколирования. В качестве базы измерительного блока используется стандартный компьютер типа IBM-PC-AT, работающий под управлением операционной системы Windows XP.

При использовании предлагаемого устройства для измерения кинематических и силовых параметров кисти обеспечиваются следующие положительные эффекты:

- 1) устройство обеспечивает объективную оценку функционального состояния кисти в динамике;
- 2) устройство позволяет проводить исследования при непрерывно изменяющихся угловых поворотах кисти последовательно относительно трёх ортогональных осей вращения;
- 3) устройство позволяет фиксировать локтевой сустав при динамометрических и динамографических исследованиях;
- 4) приложение предлагаемого устройства в любых условиях стационарной и амбулаторной служб практической медицины.

В работе исследуются возможности использования устройства МКИ-А61.

#### Библиографический список

1. Букин И.В., Якобсон Я.С. «Приборы для измерения силы схвата и моментна ротации кисти» Протезирование и протезостроение, - Сб. трудов. Вып. 3. М., 1977, с.94-96.

*А.В. Дремченко, студ.; М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛЕНИ ЧЕЛОВЕКА**

Ортопеды всерьез занялись изучением биомеханики движений всего четыре десятилетия назад, когда многие люди увлеклись бегом. Именно бегуны и их синдром «перенапряжения передней части стопы» заставили даже самых консервативных ученых признать, что многие заболевания позвоночника и суставов вызваны именно изменениями в стопах. К изучению отклонений от нормы вынудила необходимость лечения заболеваний ног, которые все чаще встречались в практике ортопедов. Прогресс привел к тому, что появился метод изучения сил и нагрузок, которые существуют в стопе при движении.

На рис.1 показана установка экспериментального вибрационного стенда для вибродиагностики состояния мышечно-сухожильного комплекса голени (трехглавой мышцы голени в совокупности с ахилловым сухожилием).



**Рис.1 Модель мышцы, закрепленная на стальной раме П-образной формы**

Модель мышцы выполнена из резиноподобного материала.

Экспериментально определяется модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

На схемах 1 и 2 (рис.2) представлены образцы до нагружения и при нагружении.

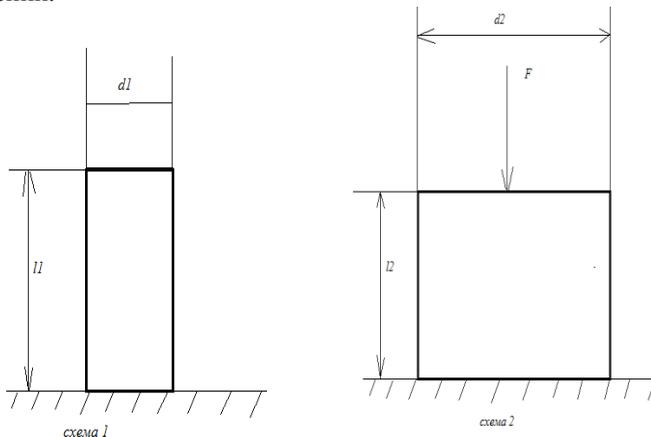


Рис. 2. Вид образцов до и после нагружения

Модуль Юнга определяется по формуле:

$$E = \frac{F \cdot l}{S \cdot x},$$

где:  $E$  – модуль упругости;  $F$  – сила, приложенная к образцу;  $l$  – длина образца;  $S$  – площадь образца;  $x$  – модуль изменения длины образца в результате упругой деформации.

Размеры образца:

– длина  $l_1 = 13 \text{ мм} = 0,013 \text{ м}$ ,

– диаметр  $d_1 = 9 \text{ мм} = 0,009 \text{ м}$ .

Площадь образца:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,009^2}{4} = 6,36 \cdot 10^{-5}$$

К образцу прикладываем силу равную 1 Н, после приложения силы длина стержня:  $l_2 = 0,011 \text{ м}$ , диаметр:  $d_2 = 0,010 \text{ м}$ .

Модуль изменения длины образца:  $X = 0,013 - 0,011 = 0,002 \text{ м}$ .

$$E = \frac{1 \cdot 0,013}{6,36 \cdot 10^{-5} \cdot 0,002} = 0,1022 \text{ МПа.}$$

Коэффициент Пуассона – абсолютная величина отношения поперечной и продольной относительной деформации образца материала.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|,$$

где:  $\varepsilon'$  - деформация в поперечном направлении;  $\varepsilon$  - продольная деформация.

$$\varepsilon' = d_1 - d_2 = 0,009 - 0,010 = -0,001,$$

$$\varepsilon = l_1 - l_2 = 0,013 - 0,011 = 0,002.$$

$$\mu = \left| \frac{-0,001}{0,002} \right| = 0,5.$$

Расчётная величина коэффициента  $\mu$  даёт возможность понять, что материал по свойствам схож с резиной.

Более достоверной моделью голени является макет мышцы из резиноподобного материала с внедренным «сухожилием» из смеси льна и лавсана. Исследуемые АЧХ модели сравниваются с экспериментальными данными голени человека.

#### Библиографический список

1. <http://traumachel.ru/>
2. <http://www.uhlib.ru/>

*К.С. Горева, студ.; А.С. Шаронова, студ.;*

*В.И. Шапин, к.т.н., проф.*

*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ**

Известны различные способы стимуляции развития растений. Цель очевидна – повышение урожайности при сохранении требований экологичности. При этом различаются два вида стимуляции: посредством химических воздействий на семена и почву, а также посредством воздействия достаточно громоздких конструкций различных электромагнитных полей. В частности внесением в почву намагниченного вещества, в котором используют омагниченные трудно растворимые

мые фосфаты. На параметры стволов и скелетных ветвей воздействуют магнитным полем, которое создаётся смесью ферромагнитного порошка с пластическим веществом. Существует и способ путём создания излучателей электростатического поля над растениями. Из химических методов, например, – путём обработки семян и растений в период вегетации водным раствором, содержащим микроколичества перекиси водорода, ионов меди и щавелевой кислоты, водным раствором бикарбонатовой кислоты и т.д.

В настоящей работе рассматривается следующая постановка задачи: исследование влияния вибрации на развитие растений.

Рассматривались две группы растений по два в каждой группе. Одни – в дальнейшем называем «вибрационными», или кратко «вибро», подвергались воздействию горизонтальной вибрации путём кинематического возмущения основания от момента пикировки в раскладные пакеты в начале апреля до высадки в стационарный грунт в начале июня. Вторая группа растений – «неподвижные» - контрольные.

Блок-схема виброиспытаний стандартная: звуковой генератор или карта компьютера, предварительный усилитель мощности, электродинамический возбудитель и визуальное, и, как оказалось вполне достойное, наблюдение резонансных показателей исследуемых биообъектов по отношению к подвижному кинематическому основанию.

В лабораторных условиях системно с 26.03.2012 по 25.05.2012 проводилось измерение следующих параметров: длины основного стволового стебля, диаметра стебля у основания, количества листьев, а также максимальной длины листа, числа бутонов и изгибной жёсткости стволового стебля при нормированной высоте измерения параметров сила–линейное перемещение.

Характерно, что в лабораторном этапе развития растений не были выявлены явные различия в параметрах исследуемых структур за исключением длины стебля. У «виброперцев» длина больше, по сравнению с контрольными. В конечном итоге показатели составили:

- длина стеблей: первый и второй (вибро) – 270 и 237 мм, третий и четвёртый (контрольные) – 211 и 225 мм;
- диаметр стволового стебля: соответственно 7,6; 7,3; 7,5 и 7,5 мм;
- количество листьев: 27, 27, 28, 27 ед.;
- число бутонов: по 8 шт.

Подстройки частоты практически не требовалось.

В начале июня рассада переносилась в грунт в стандартную теплицу. Продолжалось наблюдение за урожайностью в три приёма. В середине июля число плодов и их вес при одновременном съёме был примерно одинаков. Результат счёта в августе оказался в пользу «виброперцев». Вес каждой из пар растений: 700 г и 400 г при количестве плодов соответственно 8 и 6 ед. Результаты третьего одновременного съёма в сентябре от 30.09.2012 г. приведены на рис.1 и не требуют комментариев. Налицо большая продолжительность вегетационного периода. Объяснение очевидно, рис.2,3,4. Корневая система «виброперцев» имеет ажурную и более развитую структуру. Характерно, что при этом корневая система «виброперцев» плоская, рис. 2,3. Причём, плоскость корневой системы перпендикулярна направлению вибровоздействия, что пока необъяснимо. Иначе: корневая система «поворачивается» фронтом к направлению вибрации.



Рис. 1. Плоды заключительного одновременного съёма в сентябре: слева – вибро, справа - контрольные



Рис. 2. Корневая система «виброперцев»

Таким образом, получено, что под воздействием механических резонансных колебаний развитие биообъектов на стадии лабораторных исследований в условиях визуального наблюдения принципиально не отличаются. Однако, в итоговых полевых условиях корневая система и урожайность культур подверженных вибрации безусловно превалирует по сравнению с контрольными растениями.



**Рис. 3. Корневая система «виброперцев», профиль**



**Рис.4. Корневая система «виброперцев» – слева, контрольных растений – справа**

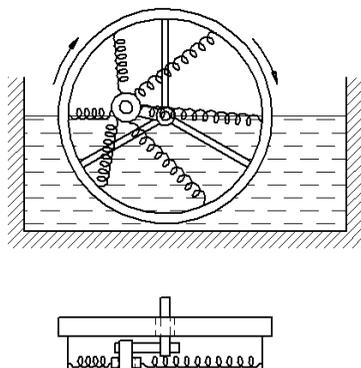
В развитии работы предполагается повторение экспериментов, включая исследование нанотехнологической гистологии клеточного строения свежего среза ствольного стебля в обеих группах растений, равно как и объяснение причины выявленной «ажурности» и плоскостности построения корневой системы при воздействии вибрации на этапе выращивания рассады.

*Е.С. Лоснова, студ.; З.В. Зарубин, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) принадлежат к классу функциональных материалов, позволяющих управлять своим поведением. Эффект памяти формы заключается в обратимости пластических деформаций и восстановлении первоначальной формы конструкции из материала с ЭПФ. Благодаря данному свойству рассматриваемые материалы получают все более широкое распространение в современной науке и технике [1].

Объектом исследования в данной работе является двигатель с кривошипно-шатунным механизмом на основе сплавов с ЭПФ(рис.1), [2].



**Рис. 1. Двигатель на основе сплавов с ЭПФ**

В двигателе используется пружина с ЭПФ из сплава NiTi с температурным переходом 45°C.

Рассчитываются кинематические и силовые параметры двигателя:

- жесткость пружин в аустенитном и мартенситном состоянии;
- крутящий момент;
- геометрические размеры.

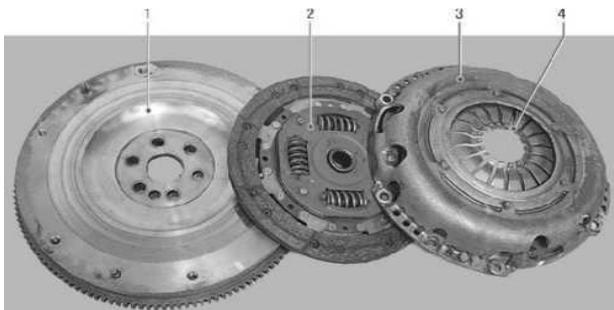
#### **Библиографический список**

1. Зарубин З.В., Ноздрин М.А. Деформационные расчеты материалов с эффектом памяти формы / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». - Иваново, 2012. – 116 с.
2. <http://uas.su/books/newmaterial/103/razdel103.php>

*А.А. Навдаев, студ.; И.А. Белов, ст.преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТА АВТОМОБИЛЯ

Рассмотрим детали автомобиля, составляющие сцепление [1]. Сцепление представляет собой узел трансмиссии, передающий во включенном состоянии крутящий момент и имеющий устройство для кратковременного его выключения (рис.1).

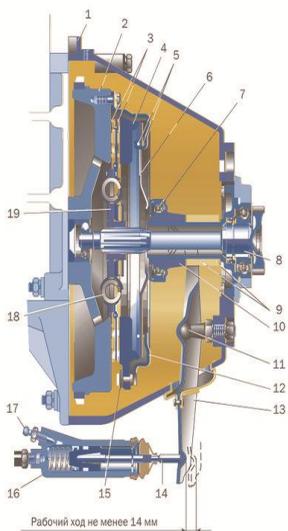


**Рис. 1. Общий вид сцепления легкового автомобиля**

**1 – маховик; 2 – ведомый диск; 3 – кожух сцепления с нажимным диском;  
4 – диафрагменная пружина**

Сцепление предназначено для плавного трогания автомобиля и кратковременного разъединения двигателя и трансмиссии при переключении передач и предотвращения воздействия на трансмиссию больших динамических нагрузок, возникающих на переходных режимах. На легковые автомобили, оборудованные механической коробкой передач, устанавливают сухое однодисковое сцепление с центральной диафрагменной пружиной. К сцеплению предъявляются следующие требования: надежная передача крутящего момента от двигателя к коробке передач; полнота включения, т.е. отсутствие пробуксовывания ведущих и ведомых деталей сцепления, обеспечивающая надежную передачу крутящего момента двигателя; полнота выключения, обеспечивающая полное разъединение двигателя от трансмиссии; плавное включение, обеспечивающее заданную интенсивность трогания с места автомобиля или после включения передачи; предохранение трансмиссии и двигателя от перегрузок и динамических нагрузок [2]. Любой автомобиль с механической коробкой переключения передач (МКПП) имеет однодисковое сцепление с диафрагменной пружиной.

ной. В работе рассматривается фрикционное однодисковое сцепление, которое в большинстве случаев является оптимальным конструктивным решением для рассматриваемого узла трансмиссии. Оно состоит из ведущих частей: маховика, кожуха, нажимного диска, вращающегося с частотой вала двигателя, и ведомого диска (рис.2) расположенного на шлицах ведущего вала коробки передач. Кроме того, во фрикционном сцеплении выделяют группу деталей, осуществляющих включение-выключение и привод сцепления. Включение сцепления осуществляется под действием силы, создаваемой пружинами, а выключение — в результате преодоления этой силы при воздействии на педаль сцепления, которая обеспечивает перемещение выжимного подшипника.



**Рис.2. Фрикционное однодисковое сцепление**

1 – картер сцепления; 2 - маховик; 3 – фрикционные накладки ведомого диска; 4 – нажимной диск; 5 – опорные кольца; 6 – диафрагменная пружина; 7 – подшипник выключения сцепления; 8 – первичный вал коробки передач; 9 – поролоновые кольца; 10 – муфта выключения; 11 – шаровая опора вилки; 12 – кожух; 13 – вилка; 14 – шток рабочего цилиндра; 15 – соединительная пластина; 16 – рабочий цилиндр; 17 – штуцер прокачки; 18 – демферная пружина; 19 – ступица ведомого диска

В зависимости от типа пружин, создающих сжимающие силы, фрикционные сцепления разделяются на следующие виды:

- сцепления с периферийными пружинами;
- сцепления с центральной конической пружиной;
- сцепления с диафрагменной пружиной.

Большинство механических трансмиссий современных легковых автомобилей имеют сцепления с диафрагменной пружиной [3]. На грузовых автомобилях нашли применение двухдисковые сцепления, использование которых вызвано необходимостью увеличения площади поверхностей трения без увеличения внешних размеров сцепления.

В работе проводится исследование и расчеты прочности и жесткости сцепления.

#### Библиографический список

1. Солтус А.П. Теория эксплуатационных свойств автомобиля: Учебное пособие для ВУЗов/ А.П.Солтус. К.: [текст]:/ Аристей, 2004. - 188с.
2. Шляхтинский К.А. автомобилист /За рулем, [текст]:/ 1994, №7.
3. <http://www.auto-auto.ru/>

*А.П. Алешина, асп.; Е.Р. Брик, асс.  
(ИГАСУ, г.Иваново)*

*В.А. Огурцов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ВИБРОГРОХОТАХ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ ДВИЖЕНИЯ СИТ**

Возрастающие в настоящее время требования к качеству фракционирования сыпучих материалов, к затратам электроэнергии на выпуск единицы продукции и к повышению производительности труда на сортировочных предприятиях, определяют необходимость совершенствования технологий, модернизацию классифицирующего оборудования, повышающую интенсивность вибровоздействия сит на слой сыпучего материала. Нами предложена схема виброгрохота, защищенного авторским свидетельством и патентами на полезную модель, короб которого совершает независимые вертикальные и горизонтальные колебания. Устройство грохота позволяет реализовывать различные траектории движения сита: круговые, прямолинейные, эллиптические с различными углами наклона оси эллипса к просеивающей поверхно-

сти, а также многие другие траектории, включая, кривые Лиссажу. Таким образом, предлагаемый вибрационный грохот имеет более широкие возможности, чем инерционные и самобалансные грохоты, которые традиционно используют на сортировочных предприятиях. Если упругие элементы, установленные между коробом и подвижной рамой и упругие элементы между подвижной рамой и фундаментом, имеют жесткость, обеспечивающую окологрезонансный режим колебаний, то при окологрезонансном режиме работы грохот позволяет получить высокие значения амплитуд колебаний при использовании источников возбуждения малой мощности.

Грохот может осуществлять высококомбинированный переход от одного колебательного режима к другому, если происходит изменение характеристик сыпучей среды или осуществляется переход к грохочению другого материала.

Изменение колебательного режима может осуществляться автоматически, что позволяет использовать грохот в автоматизированных технологических линиях. Это является дополнительным преимуществом предлагаемого аппарата перед типовыми. Силы инерции, имеющие большие значения чем в типовых аппаратах, не создают высоких локальных напряжений, как у инерционных и самобалансных грохотов, а распределяются на упругие элементы. Таким образом, допустимое ускорение колебаний грохота может быть выше, чем  $80 \text{ м/с}^2$  – допустимое ускорение колебаний инерционных и самобалансных грохотов.

Во многих непрерывных технологических процессах преимущество отдается грохотам с двух, трех и более этажной компоновкой сит, напрямую включенным в технологический процесс. Данные грохоты позволяют отсеять из исходной сыпучей среды некондиционные крупные и мелкие частицы. В данной работе предлагается математическая модель кинетики для многоситового грохочения. При известных производительности аппарата и характеристике крупности исходного сырья, скорости транспортирования материала по грохоту, определяется извлечение проходных частиц на верхнем и нижних ситах, то есть эффективность работы грохота и, что особенно важно, засоренность товарного продукта некондиционными мелкими частицами. Данная модель позволит вести целенаправленный поиск эффективных решений в практике эксплуатации и проектирования классифицирующего оборудования.

Е.Н. Фирсов, студ.; М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ДЕФОРМАЦИИ БРУСА ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

В машиностроении, авиастроении и других отраслях широко применяются тонкостенные стержни с открытыми профилями поперечных сечений. Поэтому расчёты на кручение и изгиб таких тонкостенных стержней имеют большое практическое значение.

Целью работы является нахождение нормальных и касательных напряжений в брусе открытого профиля при кручении с изгибом.

Для того, чтобы найти значения нормальных и касательных напряжений рассматривается расчётная схема (рис.1) с сечением бруса открытого профиля (рис.2)

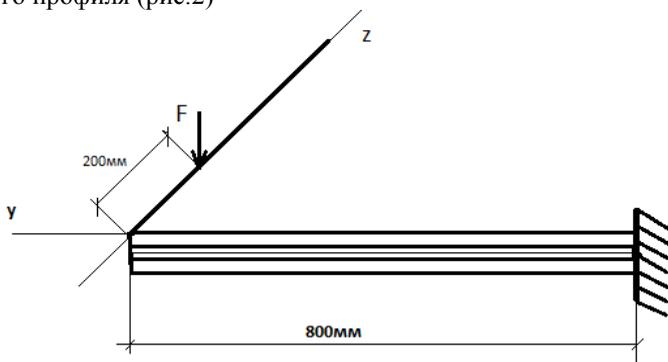


Рис.1. Расчётная схема

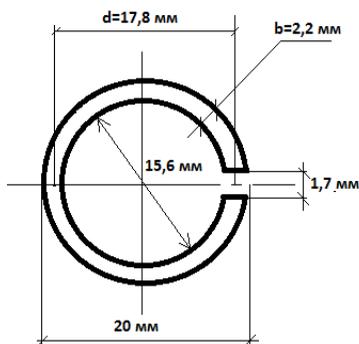


Рис.2. Сечение бруса

Определены величины максимальных напряжений и углов закручивания в случаях открытого и замкнутого профилей.

Сопоставляя вычисленные значения напряжений и углов закручивания для двух различных профилей тонкостенного стержня, составим отношения выражений напряжений и углов закручивания, т.е.:

$$\frac{\tau_{\max(1)}}{\tau_{\max(2)}} = \frac{3D}{2\delta}; \quad \frac{\varphi_{(1)}}{\varphi_{(2)}} = \frac{3D^2}{2\delta^2}$$

Откуда следует, что отношение напряжений имеет величину порядка  $D/\delta$ , а отношение углов закручивания  $\square$  порядка  $(D/\delta)^2$ .

Так как для тонкостенных стержней  $D \gg \delta$ , следовательно, стержень с замкнутым профилем является существенно более прочным и жестким, нежели стержень с открытым профилем при идентичных исходных данных. Этот вывод является общим для тонкостенных стержней независимо от формы сечений. Там, где от элемента конструкции, работающего на кручение, требуется прочность и жесткость, применение открытых профилей нецелесообразно. При кручении на изгиб открытые профили работают не хуже замкнутых профилей. В работе приводятся числовые расчеты.

#### Библиографический список

1. В.И. Феодосьев. Сопrotивление материалов. М.; Наука, 1974.
2. <http://www.prikladmeh.ru/Sopromatkruch.pdf>
3. <http://www.soprotmat.ru/tonkost.htm>

*А.Д. Малышева, студ.; М.Э. Софьина, студ.;*  
*М.А. Ноздрин к.т.н, доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ТОЧКЕ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПЛАСТИНЫ

Целью работы является создание методического обеспечения лабораторной работы при изучении курсов «Сопrotивление материалов», «Прикладная механика», «Механика сплошной среды» [1]. Основная задача лабораторной работы – экспериментальная иллюстрация ана-

литических соотношений теории напряженно – деформированного состояния в механике деформируемого твердого тела. Работа выполнена в учебно–иссле-довательской лаборатории кафедры Теоретической и прикладной механики ИГЭУ (рис. 1). Рассмотрим пластину с параметрами:  $b=35,3$  мм,  $h=2,3$  мм. Площадь сечения пластины:  $S=b \cdot h=35,3 \cdot 2,3=81,19$  мм<sup>2</sup>. Датчики расположены на пластине под следующими углами: 1-0°, 2-30°, 3-45°, 4-60°, 5-90°, 6-120°, 7-135°, 8-150°, 9-180°.

Рассчитываются характеристики на основе экспериментальных данных [2]:

1) коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона)

$$\mu = \frac{\varepsilon_{\text{попер}}}{\varepsilon_{\text{прод}}}; \quad \mu = \left| -\frac{3,33}{13,33} \right| = 0,25;$$

2) нормальное напряжение

$$\sigma = \frac{\Delta P}{S}; \quad \sigma = \frac{2000}{81,19} = 24,63 \left( \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right),$$

где S–площадь поперечного сечения,  $\Delta P = 2000$  Н;

3) модуль Юнга –  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ .



Рис.1. Испытательная машина IP5057-50

Из выполненных расчетов следует, что наиболее точное значение E – модуля Юнга для стали показывают датчики 1 и 9, так как располагаются под углами 0° и 180°. Датчик 5, расположенный под углом 90°, показывает нулевое значение, так как модуль Юнга определяется только для продольной силы.

Для полного суждения о прочности материала необходимо определять напряжения, действующие по любому наклонному сечению растянутого (сжатого) элемента:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 \cdot S \cdot \cos^2 \alpha}{S} = \sigma \cos^2 \alpha$$

$$\alpha = 0^\circ \rightarrow \sigma_\alpha = 24,63 \cdot \cos^2 0^\circ = \mathbf{24,63} \text{ МПа,}$$

$$\alpha = 30^\circ \rightarrow \sigma_\alpha = 24,63 \cdot \cos^2 30^\circ = \mathbf{18,47} \text{ МПа, ... ,}$$

$$\alpha = 150^\circ \rightarrow \sigma_\alpha = 24,63 \cdot \cos^2 150^\circ = \mathbf{18,47} \text{ МПа,}$$

$$\alpha = 180^\circ \rightarrow \sigma_\alpha = 24,63 \cdot \cos^2 180^\circ = \mathbf{24,63} \text{ МПа}$$

Как видим, для одной и той же точки напряженного тела величина возникающих в сечениях напряжений оказывается различной в зависимости от ориентации секущей площадки.

Проводится расчет напряжений [2]:

$$\sigma_{0^\circ} = \frac{1,8 \cdot 10^5}{1 - 0,0625} \cdot (13,33 \cdot 10^{-5} - 0,25 \cdot 3,33 \cdot 10^{-5}) = 23,9 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{30^\circ} = \frac{2,2 \cdot 10^5}{0,9375} \cdot (8,3 \cdot 10^{-5} + 0,25 \cdot 0,3 \cdot 10^{-5}) = 19,6 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{150^\circ} = \frac{2,3 \cdot 10^5}{0,9375} \cdot (8 \cdot 10^{-5} + 0,25 \cdot 10^{-5}) = 20,2 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{180^\circ} = \frac{1,8 \cdot 10^5}{0,9375} \cdot (13,33 \cdot 10^{-5} + 0,25 \cdot 3,33 \cdot 10^{-5}) = 27,2 \text{ МПа.}$$

В результате расчета напряжений на датчиках, расположенных под разными углами, можно сделать вывод: значения напряжений уменьшаются при изменении угла поворота датчика от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . При изменении угла поворота в пределах от  $90^\circ$  до  $180^\circ$  значение напряжения  $\sigma$  увеличивается.

Главные напряжения определяются характером напряженного состояния и не зависят от того, какая система осей была принята в качестве исходной. Теоретические значения выполняются по формуле:

$$\sigma_\alpha + \sigma_{\alpha+90^\circ} = \sigma,$$

$$\text{где } \Sigma \sigma_0 + \sigma_{90^\circ} = 23,9 + 0 = \mathbf{23,9} \text{ МПа;}$$

$$\Sigma \sigma_{30^\circ} + \sigma_{120^\circ} = 19,6 + 5,07 = \mathbf{24,67} \text{ МПа}$$

$$\Sigma \sigma_{45^\circ} + \sigma_{135^\circ} = 16,8 + 15,9 = \mathbf{32,7} \text{ МПа}$$

$$\Sigma \sigma_{60^\circ} + \sigma_{150^\circ} = 19,7 + 20,2 = \mathbf{39,9} \text{ МПа}$$

$$\Sigma \sigma_{90^\circ} + \sigma_{180^\circ} = 0 + 27,2 = \mathbf{27,2} \text{ МПа}$$

Из теоретической части следует, что инварианты напряжений должны быть равны. В ходе эксперимента были получены инварианты с приблизительно равными значениями.

В результате проведения лабораторной работы студенты знакомятся с теоретическими расчетами нормальных напряжений на площадках любой ориентации в деформируемом теле, определением инвариантов напряжений, а также с механическими характеристиками материалов. После выполнения экспериментальной части работы осуществляется сравнение опытных данных с теоретическими расчетами.

#### Библиографический список

1. **Ноздрин, М.А.** Механика сплошной среды; метод. указания для выполнения лаб. работ / М.А.Ноздрин, З.В. Зарубин; Иван. гос. энерг. ун-т. Каф. ТиПМ . – Иваново, 2007. -28с.
2. **Степин, П.А.** Сопротивление материалов: учебник для вузов/П.А.Степин.- М.:Высш.школа,1972.-312с.:ил.

*Е.Н. Фирсов, студ.; С.В. Вихрев, вед. инж.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

### ДЕФОРМАЦИИ БРУСА ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

В машиностроении, авиастроении и других отраслях широко применяются тонкостенные стержни с открытыми профилями поперечных сечений. Поэтому расчёты на кручение и изгиб таких тонкостенных стержней имеют большое практическое значение.

Целью работы является нахождение нормальных и касательных напряжений в брусе открытого профиля при кручении с изгибом.

Для того, чтобы найти значения нормальных и касательных напряжений рассматривается расчётная схема (рис.1) с сечением бруса открытого профиля (рис.2)

Получены выражения максимальных напряжений и углов закручивания в случаях стержней с открытым и замкнутым профилями.

Сопоставляя вычисленные значения напряжений и углов закручивания для двух различных профилей тонкостенного стержня, составим отношения выражений напряжений и углов закручивания:

$$\frac{\tau_{\max(1)}}{\tau_{\max(2)}} = \frac{3D}{2\delta} ; \quad \frac{\varphi_{(1)}}{\varphi_{(2)}} = \frac{3D^2}{2\delta^2}$$

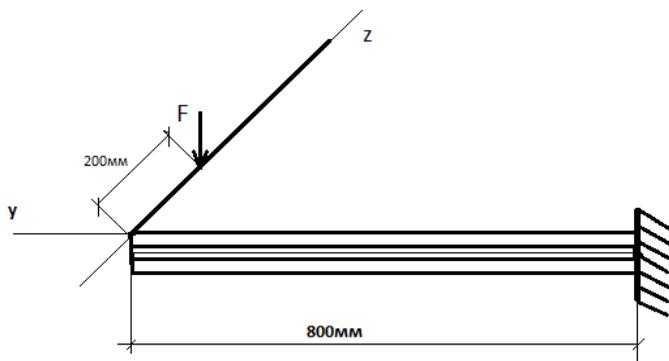


Рис.1. Расчётная схема

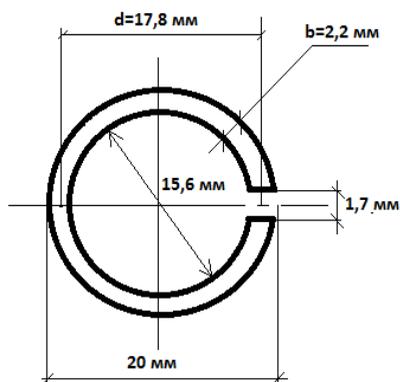


Рис.2. Сечение бруса

Откуда следует, что отношение напряжений имеет величину порядка  $D/\delta$ , а отношение углов закручивания  $\square$  порядка  $(D/\delta)^2$ . Так как для тонкостенных стержней  $D \gg \delta$ , то стержень с замкнутым профилем является существенно более прочным и жестким, нежели стержень с открытым профилем при идентичных исходных данных. Этот вывод является общим для тонкостенных стержней независимо от формы сечений. Там, где от элемента конструкции, работающего на кручение, требуется прочность и жесткость, применение открытых профилей нецелесообразно. В отличие от кручения на изгиб открытые

профили работают не хуже замкнутых профилей. В работе приводятся числовые расчеты.

#### Библиографический список

1. В.И. Феодосьев, Сопротивление материалов, М.: Наука, 1974.
2. <http://www.prikladmeh.ru/Sopromatkruch.pdf>.
3. <http://www.soprotmat.ru/tonkost.htm>.

*С.С. Попов, студ.; В.И. Шапин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДВУХПРОЛЁТНОЙ КОНСТРУКЦИИ БАЛКИ

Задачей работы являлось проведение сравнительного анализа двух моделей стальной балки: экспериментального стенда и теоретического в программе Веат.

Программа Веат предназначена для расчёта многопролетных статически неопределимых балок, построения эпюр прогибов, углов поворота, изгибающих моментов, напряжений и поперечных сил, возникающих в балке от приложенных внешних нагрузок. Программа производит проверку и подбор сечения стальных балок, описанных в сортаменте металлопроката, прилагаемом с данной программой. Результаты расчёта можно экспортировать в формат HTML, а также в MS Word. Программа написана на Delphi 7 для платформы Windows. На рис.1 представлена схема стенда.

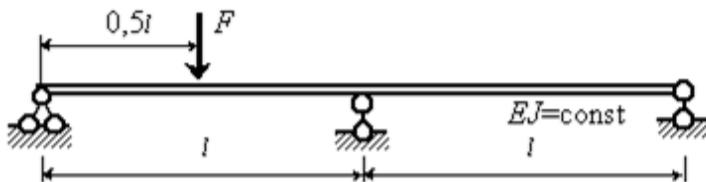


Рис.1. Схема стенда

Ниже представлены эпюры прогибов двух опорной (рис. 2) и трёх опорной (рис.3.) балок, построенные с применением программы Veam.

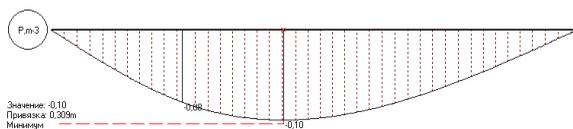


Рис.2. Эпюра прогиба 2-х опорной балки

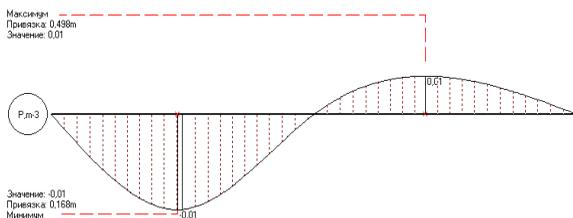


Рис.3. Эпюра прогиба 3-х опорной балки

На основании полученных данных можно говорить о целесообразности использования трех опорных конструкций, т.к. напряжения в сечениях значительно меньше, чем в случае с двух опорной.

*П.О. Норовков, студ.; В.И. Шапин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЕ

Важным вопросом при проектировании машин, механизмов и других механических систем и конструкций является определение их основных геометрических размеров в зависимости от условий эксплуатации, выбранных материалов и ряда других факторов. От того, как проведена эта работа, в конечном итоге зависит, насколько совершенным окажется конечный продукт.

Целью данной работы является расчет конструкции. Для решения поставленной задачи был использован программный комплекс АРМ WinMachine, разработанный в НТЦ «АПМ». Моделирование кон-

струкции, задание свойств элементов, а также внешних нагрузок производится в специализированном редакторе APM Structure 3D. Расчеты ведутся с использованием метода конечных элементов. Применение этого метода позволило провести статический расчет конструкции и получить величины напряжений и перемещений в каждой точке стержневой модели.

В качестве расчетной схемы выбрана конструкция, показанная на рис. 1.

С помощью проведения эксперимента и параллельного расчета удастся сравнить полученные результаты и выделить недостатки и преимущества программы WinMachine.

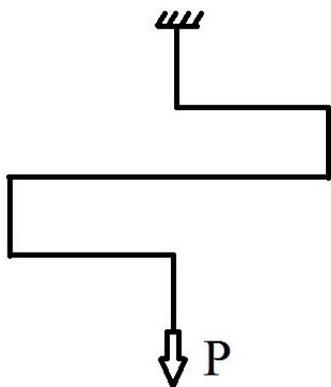


Рис. 1. Расчетная схема

Расчет проводится в системе CAD/CAE/CAM/PDM APM WinMachine. Такой подход к проблеме позволяет выполнить процедуру подготовки исходных данных и проводить анализ полученных с помощью APM WinMachine результатов.

Общий порядок расчета в программе WM представляется в следующем виде:

1. Создание конструкции
2. Умножение с целью создания трехмерной модели
3. Присвоение элементам модели конструкции поперечного сечения и за-

- дание параметров материала
4. Закрепление модели конструкции
5. Задание силовых факторов, действующих на элементы модели
6. После выполнения расчета проводится просмотр результатов и сравнение с экспериментом.

#### Библиографический список

1. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин: Примеры решения задач./ В.В. Шелофаст. – М.: АПМ. – 240 с.
2. Замрий А.А. Практический учебный курс. CAD/CAE система APM WinMachine. Учебно-методическое пособие. / А.А. Замрий. – М.: АПМ, 2007. – 144 с.
3. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure 3D. / А.А. Замрий. – М.: АПМ, 2004. – 250 с.

*А.Ю. Киселёв, студ.; В.И. Шапин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ РАМНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Цель работы: определение перемещений статически неопределимой рамной конструкции и сравнение их с теоретическими данными.

Приборы и средства измерения: экспериментальная установка, набор грузов, стрелочный индикатор, линейка, штангенциркуль.

Экспериментальная установка представляет собой двухопорную статически неопределимую рамную конструкцию, жёстко закреплённую на краях (рис. 1). Сечение конструкции – прямоугольник. На расстоянии 230 мм от левой опоры находится блок, посредством которого производится нагружение. За кольцо, прикреплённое к нити и протянутое через блок, подвешивается груз на специальную подставку. Масса каждого груза – 1 кг. На определённом расстоянии расположен горизонтально стрелочный индикатор, с помощью которого производится измерение перемещения одной из точек рамной конструкции. При этом вешается один груз и производится измерение, затем второй и третий грузы.

Расчёт перемещений проводился известным методом сил по раскрытию статически неопределимой системы.

Для силы  $P = 30 \text{ Н}$  по результатам проведённого эксперимента перемещение составляет  $\delta = 0,48 \text{ мм}$ , а по результатам расчёта  $0,38 \text{ мм}$ .

Погрешность результатов измерения составляет 20%. Это обусловлено погрешностями нагружения, неплотным прилеганием щупа стрелочного индикатора к конструкции и некоторыми округлениями выполненными при расчётах.

В результате проведённых эксперимента и расчёта было определено перемещение одной из точек статически неопределимой рамной конструкции, сравнение расчётных данных с теоретическими данными, найдена погрешность.

Дальнейшее развитие работы предполагает экспериментальное определение напряжений в опасном сечении конструкции и уменьшение погрешности при сравнении результатов расчёта и эксперимента.

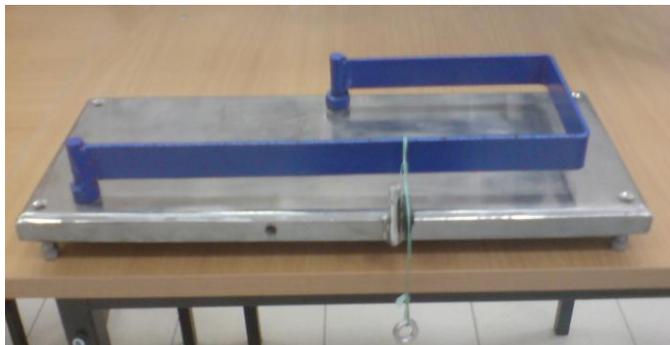


Рис.1. Экспериментальный стенд по исследованию линейных перемещений

*С.И. Скрипов, студ.; Н. А. Сабанеев, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ДЕФОРМАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕРОНОВ САМОЛЕТА**

Управление самолетом делится на основное и вспомогательное, а также на продольное и поперечное. Основное управление состоит из штурвала и педалей, механически соединенных с рулем высоты, рулем направления и элеронами [1].

Элероны – одни из самых важных аэродинамических органов управления самолета, симметрично расположенные на задней кромке консолей крыла (рис.1). В первую очередь они предназначены для управления углом крена самолета.

Элероны, позволяющие самолёту быть более маневренным при посадке, взлете, во время полета, представляют собой отклоняющиеся участки крыла у задней кромки. Элероны могут отклоняться дифференциально, то есть в противоположные стороны: для крена самолёта вправо правый элерон поворачивается вверх, а левый — вниз; и наоборот.

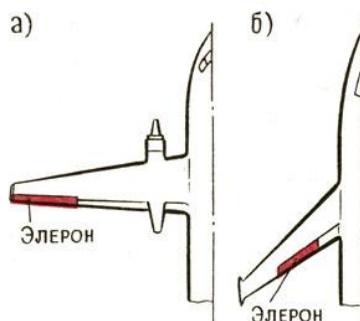


Рис. 1. Схема расположения элерона на крыле самолета

Принцип действия элеронов состоит в том, что у части крыла, расположенной перед элероном, поднятым вверх, подъемная сила уменьшается, а у части крыла перед опущенным элероном [подъемная сила](#) увеличивается; создается момент силы, изменяющий скорость вращения самолета вокруг оси, близкой к [продольной оси самолета](#) [2].

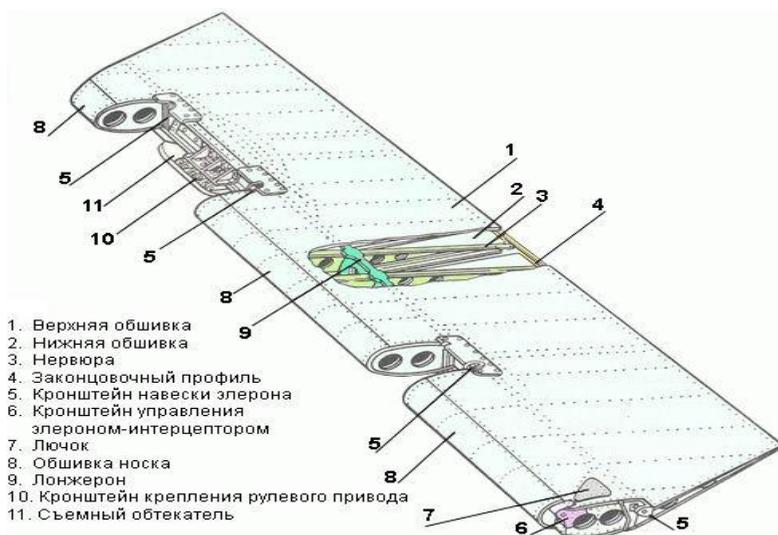


Рис. 2. Конструкция элерона

Основными элементами конструкции элерона являются (рис.2):

1) лонжерон- основной силовой элемент конструкции многих инженерных сооружений. В самолете лонжерон образует продольный набор крыла, фюзеляжа, элеронов и т.д.

2) стрингер- продольное ребро жесткости элерона.

3) нервюра- элемент поперечного силового набора каркаса, предназначенный для придания ему формы профиля.. Они закрепляются на продольном силовом наборе( на лонжероне), являются основой для закрепления обшивки[3].

В работе исследуется влияние формы поперечного сечения лонжерона на его прочностные характеристики. Основным силовым фактором, воспринимаемым лонжероном, является изгибающий момент. Наиболее рациональным сечением для изгибающего момента является двутавровое сечение, но также применяются швеллер и z-образное сечение. В работе рассматриваются следующие поперечные сечения лонжеронов: двутавр, швеллер, прямоугольник и квадрат. Проводится сравнительный анализ воздействия различных видов нагрузок и формы поперечного сечения на прочность лонжерона.

#### Библиографический список

1. **Стригунов В. М.** Расчет самолета на прочность, М., Труды МАИ, 1973.
2. **Шульшенко М. Н.** Конструкция самолета, М., Машиностроение, 1971.
3. <http://ru.wikipedia.org/wiki>

*О.А. Созонова., студ.; М.А. Ноздрин, к.т.н.,доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАСТИ ХВОСТОВОГО ВИНТА ВЕРТОЛЁТА**

В численных методах решения задач механики деформируемого твердого тела развиваются два основных подхода к решению указанной задачи.

Первый подход – моделирование развития дефектов (поры, трещины и т.п.) с учетом изменения граничных условий в рассматриваемом элементе конструкции и перестроение сетки при изменении размеров дефекта.

Второй подход – оценка степени поврежденности материала в элементах конструкции при условии, что дефекты и их рост в явном виде не рассматриваются [1].

При решении задачи оценки усталостной долговечности традиционно выделяют ряд основных этапов:

- определение опасной точки (сечения) в конструкции, в которой локализован процесс разрушения при многоциклового усталости;
- определение истории нагружения в выбранной опасной точке;
- задание свойств материала;
- задание характеристик конструкции или ее элемента, влияющих на изучаемый процесс;
- расчет усталостной долговечности.

При описании процесса многоциклового усталости основной характеристикой материала, используемой для описания его способности сопротивления процессу многоциклового усталости, является кривая Велера (Wöhler) (кривая усталости).

Объектом исследования является лопасть хвостового винта вертолёта. Вертолёт – винтокрылый летательный аппарат, у которого подъёмная и толкающая (пропульсивная) силы на всех этапах полёта создаются одним или несколькими несущими винтами с приводом от одного или нескольких двигателей. Двухвинтовой вертолёт – вертолёт имеющий два несущих винта.

Несущие винты устанавливаются на концах крыла или фермы. Реактивные моменты несущих винтов в этой схеме противоположны по знаку и уравновешивают друг друга на крыле (ферме).

Основное назначение хвостового винта состоит в том, что он гасит реактивный момент, который стремится развернуть вертолёт в полете в сторону, противоположную вращению несущего винта.

Геометрические размеры лопастей определяются специальным аэродинамическим расчетом. Однако методика расчета довольно сложна и выходит за рамки настоящей статьи. Для практики целесообразно пользоваться данными, полученными, например, при измерениях фирменных лопастей. Как правило, для моделей 30 класса применяют лопасти длиной 450-500 мм, шириной 49-50мм. Для 40 класса: длина – 520-550 мм, ширина – 49-50 мм. Для 60 класса: длина – 620-680 мм, ширина – 55-61 мм. Например, для модели вертолета Хеликс, упоминавшегося в ранних статьях, при весе модели около 4,3 кг с двигателем 10 см<sup>3</sup>, при диаметре несущего винта, равном 1400 мм, лопасти имеют длину 625 мм и ширину 55 мм [2].

В работе проводится расчёт на усталостную долговечность лопасти хвостового винта вертолѐта.

#### Библиографический список

1. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. - 312с.
2. Морозов Е.М., Г.П. Никишков. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. - 256с.

*А.В. Харькова, студ.; Л.Б. Маслов, д.ф.-м.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАСЧЕТ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛОПАСТИ ГЛАВНОГО ВИНТА ВЕРТОЛѐТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ANSYS

При решении задачи оценки усталостной долговечности традиционно выделяют ряд основных этапов [1]:

- определение опасной точки (сечения) в конструкции, в которой локализован процесс разрушения при многоцикловой усталости;
- определение истории нагружения в выбранной опасной точке;
- задание свойств материала;
- задание характеристик конструкции или ее элемента, влияющих на изучаемый процесс;
- расчет усталостной долговечности.

При описании процесса многоцикловой усталости основной характеристикой материала, используемой для описания его способности сопротивления процессу многоцикловой усталости, является кривая Велера (Wöhler) (кривая усталости)

Для различных типов материалов указанная кривая в области многоцикловой усталости имеет различный вид:

- для мало- и среднеуглеродистых сталей, мало- и среднелегированных сталей данная кривая имеет горизонтальную асимптоту (рис. 1, кривая 1) и как следствие физический предел усталости  $\sigma_R$  (ордината асимптоты);
- для высокопрочных легированных сталей данная кривая состоит из одного участка и не имеет горизонтальной асимптоты (рис. 1, кривая 2);

- для цветных металлов, их сплавов и нержавеющей сталей данная кривая состоит из двух участков и также не имеет горизонтальной асимптоты (рис. 1, кривая 3). В этом случае, так же как и в предыдущем, материал не имеет физического предела усталости. Вместо предела усталости рассматривается условный по базе предел усталости – уровень максимального напряжения  $\sigma_R^6$ , при котором разрушение произойдет через заданное число циклов (базу)  $N_6$

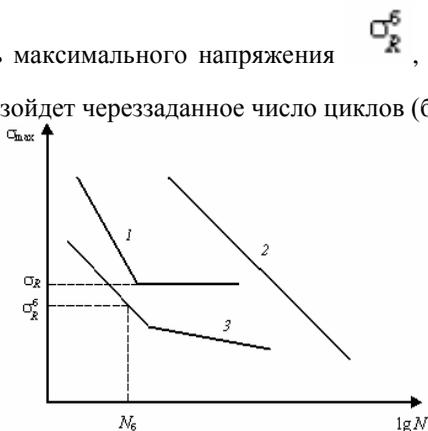


Рис.1. Диаграмма Велера

При определении последовательности выполнения действий для получения

схематизированной истории нагружения, применимой при оценке усталостной долговечности выделяют два основных пути:

- схематизация истории нагружения;
- переход от многоосного к одноосному напряженному состоянию;
- переход от асимметричного цикла нагружения к симметричному циклу нагружения;
- схематизация истории нагружения;
- переход от асимметричного цикла нагружения к симметричному циклу нагружения;
- переход от многоосного к одноосному напряженному состоянию.

Объектом исследования является лопасть несущего винта вертолета. Несущий винт (НВ) является важнейшей частью вертолета. Основным назначением НВ является создание подъемной силы на всех режимах полета и сил, обеспечивающих поступательное перемещение вертолета в заданных направлениях. Помимо этого, несущий винт создаст устойчивость вертолету и используется для управления им.

Несущий винт состоит из лопастей и втулки. Лопасти создают требуемую подъемную силу. Втулка представляет собой кинематический механизм, обеспечивающий движение и угловые перемещения лопасти в вертикальной и горизонтальной плоскости под воздействием аэродинамических и инерционных сил, а также поворот лопасти для управления её подъемной силой.

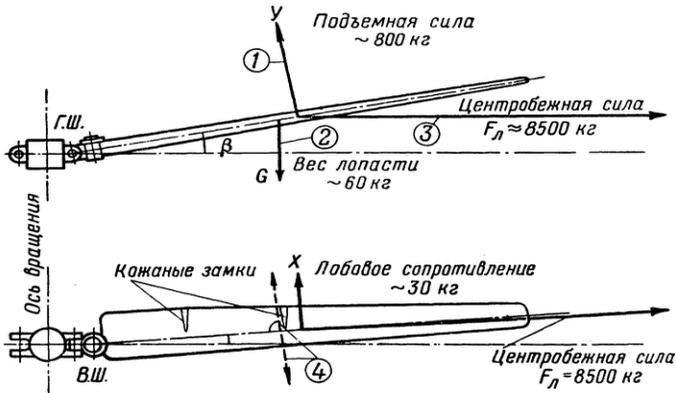


Рис. 2. Схема сил, действующих на лопасть несущего винта вертолета:  
1 — подъемная сила; 2 — сила веса лопасти; 3 — центробежная сила;  
4 — кориолисовы силы

Лопасти при поступательном полете вертолета вращаются вокруг оси НВ, перемещаются вместе с вертолетом в пространстве, изменяют свое угловое положение, поворачиваясь в шарнирах при каждом обороте винта.

В работе проводится расчет на усталостную долговечность лопасти главного винта вертолета.

#### Библиографический список

1. **Тиняков, Г.А.** Пилотирование вертолета. – М.: ДОСААФ, 1957. – 191с.
2. **Берендеев, Н.Н.** Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности. – Нижний Новгород: 2006. – 84с.
3. **Морозов Е.М., Г.П. Никишков.** Метод конечных элементов в механике разрушения. - М.:Наука,1980. - 256с.

Д. С. Рекутин, студ.; М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАСЧЁТ ПАДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ

Всё время существования планеты Земля, на её поверхность падает большое количество внеземных объектов, будь то метеориты, метеорные тела или даже крупные астероиды. Но в наше время стоит вопрос о том, долетит ли объект до поверхности земли или попросту сгорит в атмосфере. Чтобы понять это, рассмотрим поближе строение атмосферы Земли [1].

Атмосфера – [газовая](#) оболочка ([геосфера](#)), окружающая планету [Земля](#). Внутренняя её поверхность покрывает [гидросферу](#) и частично земную кору, внешняя граничит с околоземной частью космического пространства.

Толщина атмосферы — примерно 120 км от поверхности Земли. Суммарная масса [воздуха](#) в атмосфере –  $(5,1-5,3) \cdot 10^{18}$  кг. Из них масса сухого воздуха составляет  $(5,1352 \pm 0,0003) \cdot 10^{18}$  кг, общая масса водяных паров в среднем равна  $1,27 \cdot 10^{16}$  кг. Атмосферы земли состоит из: Тропосферы, стратосферы, мезосферы, термосферы и экзосферы.

Тропосфера – это первый слой атмосферы. Её верхняя граница находится на [высоте](#) 8–10 км в полярных, 10–12 км в умеренных и 16–18 км в тропических широтах; зимой ниже, чем летом. Нижний, основной слой атмосферы содержит более 80 % всей массы атмосферного воздуха и около 90 % всего имеющегося в атмосфере водяного пара. В тропосфере сильно развиты [турбулентность](#) и [конвекция](#), возникают [облака](#), развиваются [циклоны](#) и [антициклоны](#). Температура убывает с ростом высоты со средним вертикальным [градиентом](#)  $0,65^\circ/100$  м

Стратосфера – это слой атмосферы, располагающийся на высоте от 11 до 50 км. Характерно незначительное изменение температуры в слое 11–25 км (нижний слой стратосферы) и повышение её в слое 25–40 км от  $-56,5$  до  $0,8$   $^\circ\text{C}$  (верхний слой



стратосферы или область [инверсии](#)). Достигнув на высоте около 40 км значения около 273 К (почти 0 °С), температура остаётся постоянной до высоты около 55 км. Эта область постоянной температуры называется [стратопазузой](#) и является границей между стратосферой и [мезосферой](#).

Мезосфера – это третий слой атмосферы Земли. [Мезосфера](#) начинается на высоте 50 км и простирается до 80—90 км. Температура с высотой понижается со средним вертикальным градиентом  $(0,25–0,3)^\circ/100$  м. Основным энергетическим процессом является лучистый теплообмен. Сложные фотохимические процессы с участием [свободных радикалов](#), колебательно возбуждённых молекул и т. д. обуславливают свечение атмосферы.

Термосфера – пятый слой атмосферы. Верхний предел – около 800 км. Температура растёт до высот 200–300 км, где достигает значений порядка 1500 К, после чего остаётся почти постоянной до больших высот. Под действием ультрафиолетовой и рентгеновской солнечной радиации и космического излучения происходит ионизация воздуха («[полярные сияния](#)») – основные области [ионосферы](#) лежат внутри термосферы. На высотах свыше 300 км преобладает атомарный кислород. Верхний предел термосферы в значительной степени определяется текущей [активностью Солнца](#). В периоды низкой активности – например, в 2008–2009 гг – происходит заметное уменьшение размеров этого слоя.

[Экзосфера](#) – зона рассеяния, внешняя часть термосферы, расположенная выше 700 км. Газ в экзосфере сильно разрежён, и отсюда идёт утечка его частиц в межпланетное пространство ([диссипация](#)).

До высоты 100 км атмосфера представляет собой однородную хорошо перемешанную смесь газов. В более высоких слоях распределение газов по высоте зависит от их молекулярных масс, концентрация более тяжёлых газов убывает быстрее по мере удаления от поверхности Земли. Вследствие уменьшения плотности газов температура понижается от 0 °С в стратосфере до –110 °С в мезосфере. Однако кинетическая энергия отдельных частиц на высотах 200–250 км соответствует температуре ~150 °С.

Все объекты, вошедшие в поле притяжения земли, подразделяются на: метеориты, метеоры, болиды, астероиды и кометы [2].

Метеорит – твёрдое тело космического происхождения, упавшее на поверхность земли. Метеорное тело входит в атмосферу Земли на скорости около 11-25 км/сек. На такой скорости начинается его разогрев и свечение. За счет абляции (обгорания и сдувания

набегающим потоком частиц вещества метеорного тела) масса тела, долетевшего до земли, может быть значительно меньше его массы на входе в атмосферу. Например, тело, вошедшее в атмосферу Земли на скорости 25 км/с и более, сгорает почти без остатка. При такой скорости вхождения в атмосферу из десятков и сотен тонн начальной массы до земли долетает всего несколько килограммов или даже граммов вещества. Следы сгорания метеорного тела в атмосфере можно найти на протяжении почти всей траектории его падения.

Метеор - явление, возникающее при сгорании в атмосфере Земли мелких метеорных тел (например, осколков комет или астероидов). Аналогичное явление большей интенсивности (ярче звёздной величины  $-4$ ) называется болидом. Классифицируются как встречные и догоняющие. Часто метеоры группируются в метеорные потоки - постоянные массы метеоров, появляющиеся в определённое время года, в определённой стороне неба.

Метеороид – небесное тело, промежуточное по размеру между межпланетной пылью и астероидом. Согласно официальному определению, метеороид – это твёрдый объект, движущийся в межпланетном пространстве, размером значительно меньше астероида, но значительно больше атома. Британское королевское астрономическое общество выдвинуло другую формулировку, согласно которой метеороид – это тело диаметром от 100 мкм до 10 м. Другие источники ограничивают размер метеороида в 50 м. Видимый след метеороида, вошедшего в атмосферу Земли, называется метеором, а метеороид, упавший на поверхность Земли - метеоритом.

Болид – метеор яркостью не менее  $-4^m$  (ярче, чем планета Венера), либо имеющий заметные угловые размеры. Международный астрономический союз не имеет официального определения понятия «болид». Траектория полёта болида обычно гиперболическая. При входе в атмосферу Земли оставляет след (хвост) из пыли и ионизованных газов. От болида могут отделиться и упасть на Землю метеориты. Полёт может сопровождаться звуком или нарушением радиосвязи. Особо яркие болиды иногда называют суперболидами. Крупные болиды можно наблюдать днём.

Астероид – небольшое планетоподобное небесное тело Солнечной системы, движущееся по орбите вокруг Солнца. Астероиды, известные также как малые планеты, значительно уступают по размерам планетам. Одним из способов классификации астероидов является определение размера. Действующая классификация определяет астероиды, как объекты с диаметром более 50 м, отделяя их от

метеорных тел, которые выглядят как крупные камни, или могут быть ещё меньше. Классификация опирается на утверждение, что астероиды могут уцелеть при входе в атмосферу Земли и достигнуть её поверхности, в то время, как метеоры, как правило, полностью сгорают в атмосфере.

Комета – небольшое небесное тело, имеющее туманный вид, обращающееся вокруг Солнца обычно по вытянутой орбите. При приближении к Солнцу кометы образуют кому и иногда хвост из газа и пыли. Предположительно, долгопериодические кометы залетают к нам из Облака Оорта, в котором находятся миллионы кометных ядер. Тела, находящиеся на окраинах Солнечной системы, как правило, состоят из летучих веществ (водяных, метановых и других льдов), испаряющихся при подлёте к Солнцу.

Цель расчёта: определить какое количество массы выбранного объекта сгорит в плотных слоях атмосферы, и какова будет его сила удара о поверхность Земли.

Характеристики выбранного объекта: железный астероид массой 20000 тонн, объёмом  $2540000 \cdot 10^3 \text{ м}^3$  и имеющий скорость входа в атмосферу 30 км/с.

Благодаря силе вязкого трения о плотные слои атмосферы Земли, объект будет стремительно терять массу.

В расчётах определяется сила трения в каждом слое атмосферы. Затем находится масса тела, достигшего поверхности Земли, в зависимости от параметров орбиты движения объекта.

#### **Библиографический список**

1. <http://ru.wikipedia.org>
2. <http://www.mymeteorite.ru/science/71.html>

*А.Е. Привезенцев, студ.; М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТА ШИНЫ И ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ**

Для оценки качества автомобильной дороги используют группы переменных во времени показателей, характеризующих транспортную работу дороги, технико-эксплуатационные качества дорожной одежды и земляного полотна, общее состояние дороги и условия движения по ней, эффективность работы дороги.

К первой группе показателей относятся интенсивность, объем, состав движения; пропускная и провозная способность дороги; коэффициент загрузки дороги движением; время сообщения и скорость движения.

Вторую группу показателей составляют прочность дорожной одежды и земляного полотна; ровность и шероховатость дорожного покрытия; сцепление шины с дорожным покрытием; износостойкость дорожного покрытия; работоспособность дорожной одежды.

В третью группу показателей входят надежность; срок службы дороги; относительная аварийность; коэффициент аварийности и коэффициент безопасности; обеспечение видимости.



**Рис.1. Автомобильная шина**

Целью работы является анализ второй группы показателей, т.е. сцепления автомобильных шин с дорожным покрытием (рис. 1) и определение сопротивления качению, при разных типах дорог и погодных условий.

Исследование этого вопроса дает возможность оценить влияние погодных условий и на трение между шинами и разными типами дорожного покрытия. Отметим, что во время летних сильных ливней на покрытиях может образоваться тонкий слой стекающей или застаивающейся в понижен-

ных местах воды, приводящий к снижению коэффициента сцепления колес, приводящего к потере управляемости автомобиля, что может привести к возникновению ДТП.

В работе проводятся два опыта на определение коэффициентов:

1. коэффициента сопротивления качению при разных типах дорожного покрытия;
2. коэффициент сцепления колес с дорожным покрытием при разных погодных условиях.

На рис. 2 показаны силы, действующие на дорожное покрытие при торможении.

Сила торможения составляет:

$$P_{к.т.} = \varphi G_{к.т.},$$

где  $G_{к.т.}$  – вес автомобиля, приходящийся на тормозящие колеса;  $M_T$  – тормозящий момент;  $P_{к.т.}$  – сила торможения;  $v$  – скорость движения автомобиля.

Экспериментальным путем определяется сила торможения  $P_{к.т.}$ , вес автомобиля  $G_{к.т.}$  и коэффициент сцепления колес с дорогой  $\varphi$ . Прodelав аналогичную работу находится коэффициент сопротивления качению  $f$ .

Полученные результаты сравниваются с расчётными значениями коэффициента сцепления и коэффициента сопротивления качению при хорошей сходимости.

Результаты работы могут быть использованы для определения коэффициентов трения автомобильных шин о дорожную поверхность. Так же они могут быть использованы для поддержания оптимального коэффициента сцепления при разных погодных условиях для обеспечения безопасности дорожного движения.

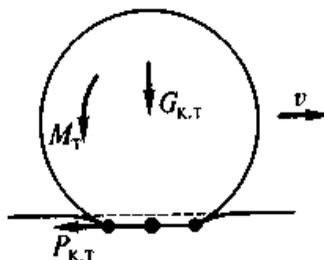


Рис. 2. Силы, действующие на дорожное покрытие при торможении

#### Библиографический список

1. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.В. Сильянов, Э.Р. Домке. - 2-е изд., стер. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. - 352 стр.
2. Бабков В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения: Учеб. для вузов.—

М.: Транспорт, 1993.—271 с.

*Е.О. Чернова, студ.; А.В. Круглов, асс.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЁТ ОПОРЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Опора воздушной линии электропередачи (опора ЛЭП) – сооружение для удержания проводов, грозозащитных тросов воздушной линии электропередачи и оптоволоконных линий связи на заданном расстоянии от поверхности земли и друг от друга.

Опоры ЛЭП предназначены для сооружений линий электропередач при расчётной температуре наружного воздуха до  $-65^{\circ}\text{C}$  и являются одним из главных конструктивных элементов ЛЭП, отвечающим за крепление и подвеску электрических проводов на определённом уровне.

В зависимости от способа подвески проводов опоры делятся на две основные группы:

- *опоры промежуточные*, на которых провода закрепляются в поддерживающих зажимах;
- *опоры анкерного типа*, служащие для натяжения проводов; на этих опорах провода закрепляются в натяжных зажимах.

Виды опор делятся на типы, имеющие специальное назначение.

Промежуточные прямые опоры устанавливаются на прямых участках линии. На промежуточных опорах с подвесными изоляторами провода закрепляются в поддерживающих гирляндах, висящих вертикально; на опорах со штыревыми изоляторами крепление проводов производится проволочной вязкой. В обоих случаях промежуточные опоры воспринимают горизонтальные нагрузки от давления ветра на провода и на опору и вертикальные – от веса проводов, изоляторов и собственного веса опоры.

Промежуточные угловые опоры устанавливаются на углах поворота линии с подвеской проводов в поддерживающих гирляндах. Помимо нагрузок, действующих на промежуточные прямые опоры, промежуточные и анкерно-угловые опоры воспринимают также нагрузки от поперечных составляющих натяжения проводов и тросов. При углах поворота линии электропередачи более  $20^{\circ}$  вес промежуточных угловых опор значительно возрастает. При больших углах поворота устанавливаются анкерно-угловые опоры.

Опоры подразделяются на опоры для линий 0,4, 6, 10, 35, 110, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ. Отличаются эти группы опор размерами и весом. Чем больше напряжение, тем выше опоры, длиннее её траверсы и больше её вес. Увеличение размеров опоры вызвано необходимостью получения нужных расстояний от провода до тела опоры и до земли, соответствующих ПУЭ для различных напряжений линий.

На фундаменты и элементы закрепления опор действуют значительные нагрузки, которые определяются:

- массой опоры проводов, гирлянд изоляторов, грозозащитных тросов, а также льда, который при определенных погодных условиях может образовываться на проводах и тросах;
- давлением ветра на опору, на проводе и грозозащитные тросы;
- горизонтальной составляющей натяжения по проводам и грозозащитным тросам только у угловых опор;
- натяжением по проводам и грозозащитным тросам, действующим на опору при обрыве проводов или грозозащитных тросов в одном из пролетов;
- усилиями, возникающими при монтаже опоры и при натяжении проводов (монтажные нагрузки).

При определении нагрузок, действующих на фундаменты или закрепления опор, в расчет принимается несколько сочетаний нагрузок, действующих на опору, например действие ветра наибольшей для данного района.

В данном проекте ведётся расчет опоры ЛЭП в нормальном нагружении, в случае обрыва провода одного пролета, обрыва проводов двух пролетов. Определены наиболее опасные аварийные случаи.

*Д.С. Сидоров, студ.; М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОСКОГО ЛОМАНОГО БРУСА**

Поставим задачу определения расчетными и экспериментальными методами напряжений и деформаций различных участков ломаного бруса. Расчетная схема исследуемого образца изображена на рис.1.

Проводятся экспериментальные измерения. Брус помещается в тиски и сжимается. Приложенная нагрузка равна  $P=0.5$  кг. В опыте померены относительные перемещения 2,4,6 участков, а также напряжения в т. В.

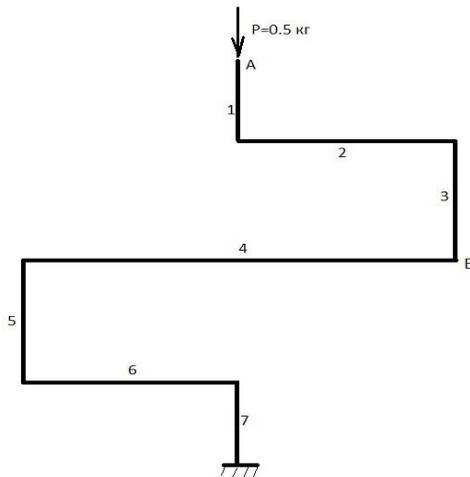


Рис.1 Расчётная схема

Производится теоретический расчет. Так как брус состоит из прямых участков с постоянной в пределах каждого участка жесткостью, определять перемещения будем методом Верещагина [1].

Значения, полученные теоретическим путем и экспериментально, сравниваются и анализируются.

#### Библиографический список

1. Феодосьев В. И., Сопротивление материалов. —М: Наука, 1979.
2. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

*О.И. Волкова, магистрант; В.А. Лукин, аспирант,  
рук. Р.Г. Ризванов, д.т.н., проф.  
(УГНТУ, г. Уфа)*

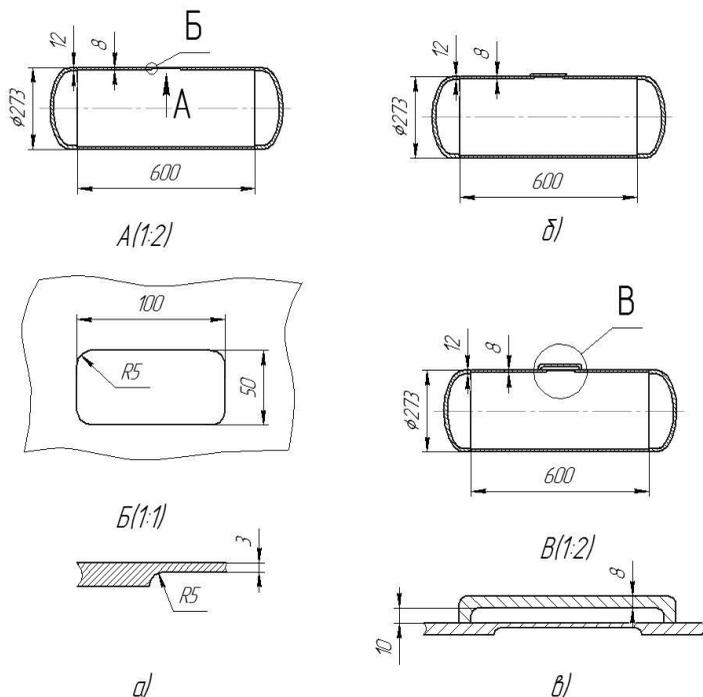
## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОСУДА ДАВЛЕНИЯ С ЛОКАЛЬНЫМ УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ ПРИМЕНЕНИЕМ НАКЛАДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

В процессе эксплуатации сосудов давления, применяемых в нефтегазовой, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности, в их корпусах возможно возникновение локального утонения стенки из-за коррозионно-эрозионного воздействия рабочей среды, что приводит к местному возрастанию механических напряжений в металле. Дальнейшая эксплуатация сосуда давления, имеющего локальное утонение стенки с остаточной толщиной, меньшей допускаемой величины, возможна после выполнения наплавки металла в зоне утонения, замены дефектного участка установкой ремонтной латки. Другим альтернативным способом ремонта является приварка накладки снаружи к корпусу в месте уменьшения толщины стенки. Но данный вид ремонта не допускается по существующей нормативно-технической документации. Для обоснования возможности применения данного способа ремонта в настоящей работе выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния сосудов давления без накладного элемента и при его наличии с применением конечно-элементного программного комплекса ANSYS.

Были рассмотрены три одинаковых сосуда, имеющих утонение стенки в виде прямоугольной выборки размерами 100×50 мм на внутренней поверхности цилиндрического корпуса с остаточной толщиной 3 мм (рис. 1). Первый сосуд не имел укрепляющего элемента в зоне утонения (сосуд №1 – рисунок 1, а), два других сосуда были усилены снаружи накладными элементами: сосуд № 2 – плоским приварным накладным элементом (рис. 1, б); сосуд № 3 – колпачковым приварным накладным элементом (рисунок 1, в).

Параметры исследуемых сосудов указаны на рис. 1. Физико-механические свойства для материала корпуса и накладного элемента приняты такие же, как для стали 09Г2С.

Первоначально в препроцессоре программы ANSYS были получены конечно-элементные модели исследуемых сосудов (на рис. 2 показаны фрагменты моделей сосудов с накладными элементами).



**Рис. 1.** Схемы исследуемых сосудов: а – сосуд № 1 без укрепления в зоне утонения; б – сосуд № 2 с плоским накладным элементом; в – сосуд № 3 с колпачковым накладным элементом

Далее данные модели нагружались пошагово внутренним давлением от 0 до 16 МПа. При этом учитывалось упруго-пластическое поведение материала сосудов.

На рис.3 а, б, в представлено распределение возникающих под действием внутреннего давления величиной 1 МПа эквивалентных напряжений (по теории прочности Мизеса [1]) на внутренней поверхности цилиндрического корпуса сосудов №1, №2 и №3 соответственно. Максимальные эквивалентные напряжения в сосуде №1 достигают величины 62,7 МПа в зоне утонения, в сосуде №2 – 54,7 МПа, в сосуде №3 – 54,6 МПа.

Из сравнения рис. 3 а, б и в видно, что усиление зоны утонения плоским и колпачковым накладными элементами позволяет снизить

максимальные эквивалентные напряжения в упругой области деформирования в 1,15 раза.

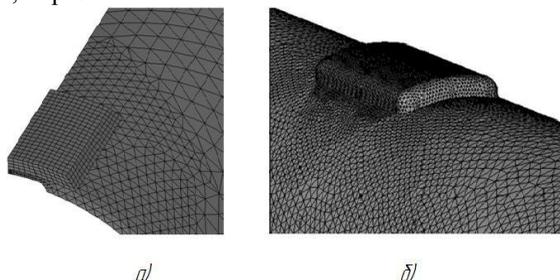


Рис. 2. Фрагменты конечно-элементных моделей сосудов: а – сосуд № 2; б – сосуд № 3

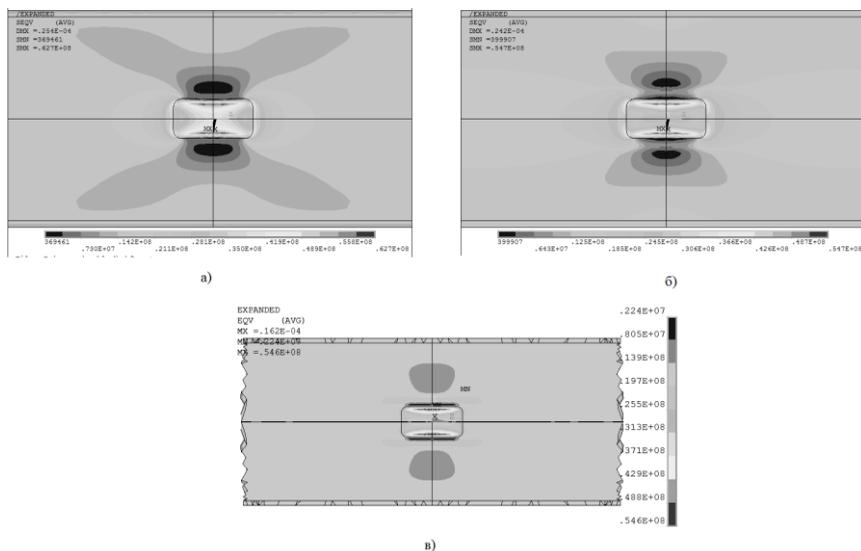


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений на внутренних поверхностях цилиндрических корпусов сосудов под действием внутреннего давления 1 Мпа: а – сосуд № 1; б – сосуд № 2; в – сосуд № 3

На рис. 4 показано изменение максимальных эквивалентных напряжений в трех исследуемых сосудах при увеличении внутреннего давления от 1 до 16 МПа. В диапазоне от 1 до 6 МПа максимальные

напряжения в сосуде №1 незначительно превышают напряжения в сосудах №2 и №3. При внутреннем давлении в диапазоне от 6 до 10 МПа максимальные напряжения практически одинаковы в трех сосудах и приблизительно равны 240 МПа. При дальнейшем увеличении давления максимальные эквивалентные напряжения в зоне утонения сосуда №1 начинают резко возрастать, ввиду появления в металле значительных пластических деформаций, и достигают величины 440 МПа при давлении 14 МПа, в то время как в сосудах с накладными элементами указанные напряжения увеличиваются незначительно, и при давлении 14 МПа они не превышают 270 МПа.

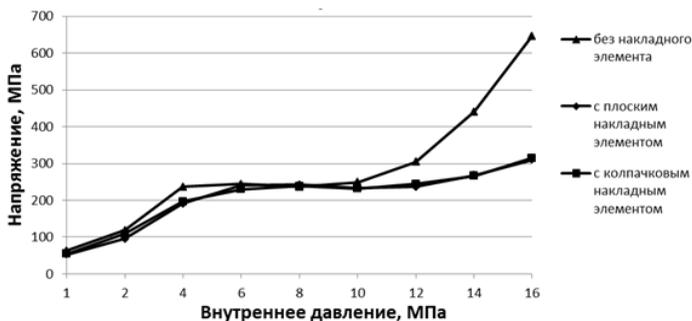


Рис. 4. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от величины внутреннего давления для трех сосудов

Результаты численного моделирования показали, что установка приварного накладного элемента в зоне локального утонения стенки позволяет значительно повысить прочность сосуда давления, особенно в области действия значительного внутреннего давления. Но колпачковые накладные элементы более предпочтительны по сравнению с плоскими накладками. Это связано с тем, что если произойдет сквозное разрушение металла в зоне утонения и рабочая среда попадет в пространство между накладным элементом и корпусом сосуда, то колпачковый элемент способен выдержать большее внутреннее давление, чем плоский элемент.

Таким образом, применение наружных колпачковых накладных элементов для ремонта корпусов сосудов давления, а также технологических трубопроводов, имеющих локальное утонение стенки, позволит выполнять ремонтные операции без вывода оборудования из эксплуатации, без его опорожнения от продукта, промывки и пропарки. При дальнейшей остановке всей технологической установки на капитал

ный ремонт можно будет выполнить ремонт сосудов давления и трубопроводов с применением традиционных способов – наплавки или замены дефектного участка.

**Библиографический список**

1. **Гольденблат И.И.**, Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 191 с.

**Секция 25. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

Председатель – д.т.н., профессор **Мизонов В.Е.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Митрофанов А.В.**

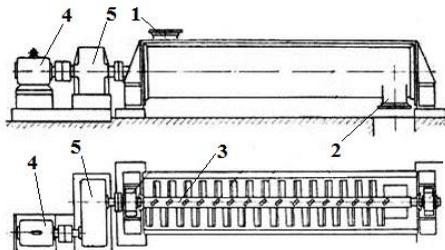
*И.А. Балагуров, студ.;  
рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ МЕХАНИКИ  
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Процессы смешивания сыпучих материалов, приводящие к получению товарных смесей и полуфабрикатов, широко распространены в химической, фармацевтической, строительной, пищевой и других отраслях промышленности. Во многих непрерывных технологических процессах преимущество отдается смесителям непрерывного действия, напрямую включенным в технологический процесс. Среди разнообразных смесителей непрерывного действия значительными преимуществами обладают лопастные смесители, где вращающиеся аксиальные лопасти осуществляют одновременно достаточно эффективное перемешивание компонентов в поперечном направлении и транспорт смеси в продольном направлении.

В классическом варианте рис. 1, лопастной смеситель сыпучих материалов [1] представляют собой патрубки для загрузки (1) и выгрузки

(2) смеси, корпус, внутри которого вращаются лопасти (3), расположенные на длинном валу. Вал приводится во вращение электродвигателем (4) через редуктор (5). Скорость вращения постоянная.



**Рис.1.** Лопастной смеситель сыпучих материалов. 1 – патрубок для загрузки смеси, 2 – патрубок для выгрузки смеси, 3 – вал с лопатками, 4 – электродвигатель, 5 - редуктор

К достоинствам этой конструкции стоит отнести простоту исполнения и надежность.

Однако недостатком такого типа смесителя является:

- присутствие вала в зоне смешивания (уменьшение полезного объема);
- относительно низкая равномерность перемешивания вследствие отсутствия обратной связи;
- наличие механической передачи – редуктора;
- практически полное отсутствие регулирования скорости перемешивания.

Желание устранить недостатки традиционного смесителя привели к разработке лопастного смесителя с независимым приводом [2]. Основной частью этой конструкции рис. 2 является лопаточный узел, содержащий ось (1), жестко связанную с корпусом, на которой установлены с возможностью свободного вращения лопаточные колеса (2), разделенные фиксаторами, каждое из которых выполнено в виде втулки с лопатками, снабженными на кромках ферромагнитными наконечниками; вокруг каждого лопаточного колеса на внешней поверхности корпуса установлен индуктор (3), выполненный в виде статора с обмоткой возбуждения, подключенной через преобразователь частоты (4) к источнику трехфазного тока (5) с возможностью переключения фаз.

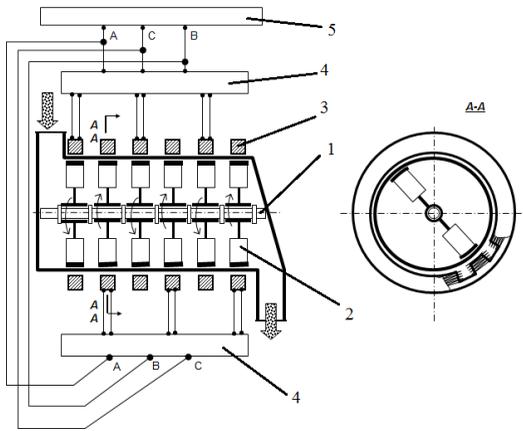


Рис. 2. Лопастной смеситель с независимым приводом. 1 – ось, 2 – лопаточное колесо, 3 – индуктор, 4 – преобразователь частоты, 5 – источник 3х фазного напряжения

Использование этой конструкции позволяет, достигнут увеличение производительности, и однородности готовой смеси.

Однако, использование в качестве движущей силы лопаток электрических машин радиального исполнения существенно увеличивает габариты установки. Поэтому следующим шагом совершенствования конструкции лопаточного смесителя является переход от радиальной электрической машины к аксиальной рис.3.

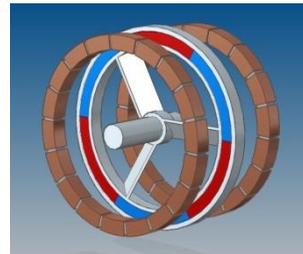


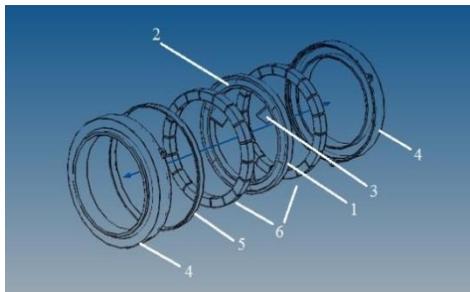
Рис.3.Секция лопаточного смесителя с независимым приводом от аксиальной электрической машины

Как видно из рис. 3, даже такой конструкции присущи недостатки классического лопаточного смесителя (присутствие вала в зоне перемешивания). Их возможно устранить, путем объединения функций вала и ротора. Если внешнюю часть ротора соединить с корпусом при помощи подшипника, то отпадает необходимость во внутреннем вале. Окончательная конструкция выглядит следующим образом. Секция смесителя представляет собой рис. 4 электрическую машину с аксиальным магнитным потоком, ротор (1) которой представляет собой

кольцо из постоянных магнитов аксиальной намагниченности (2), во внутренней части которого расположены лопатки (3), а внешняя часть связана с корпусом (4) через подшипники скольжения (5). С торцевых сторон ротор соединен с корпусом при помощи уплотнений. Вокруг ротора, с торцевых сторон установлены статоры (6).

Приведенные конструкционные изменения позволяют устранить ряд недостатков классических лопаточных смесителей, а так же легко собирать смесители с произвольным числом секций под конкретные технологические задачи.

**Рис.4.** Секция (в разборе) лопаточного смесителя с независимым приводом от аксиальной электрической машины с полым ротором. 1 – ротор, 2 – постоянные магниты, 3 – лопатки, 4 – корпус, 5 – подшипник скольжения, 6 – статор с обмотками.



#### Библиографический список

1. Сайт <http://www.gericke.net>.
2. Мизонов В.Е. и др.. Патент RU №119642 от 07.03.2012 МПК B01F 13/08

*В.В. Костарев, асп.,  
рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ СТЕФАНА В МОДЕЛИРОВАНИИ ВЛАГОПЕРЕНОСА

Прикладным объектом, для которого разрабатывается предлагаемая ниже математическая модель, является процесс укладки слоев влажной ткани на горизонтальную поверхность. Каждый новый слой приносит влагу, которая распространяется по закону конвективной диффузии в среде уже имеющихся слоев (конвективная составляющая переноса, обусловленная силой тяжести направлена в этом случае вниз). В терминах уравнения конвективной диффузии эта задача соответствует задаче Стефана для подвижной верхней границы с перемещающимся

вверх источником влаги. Ее аналитическое решение не представляется возможным. Поэтому рассматривается ячеечная модель, применение которой для подобных задач оказалось весьма эффективным [1].

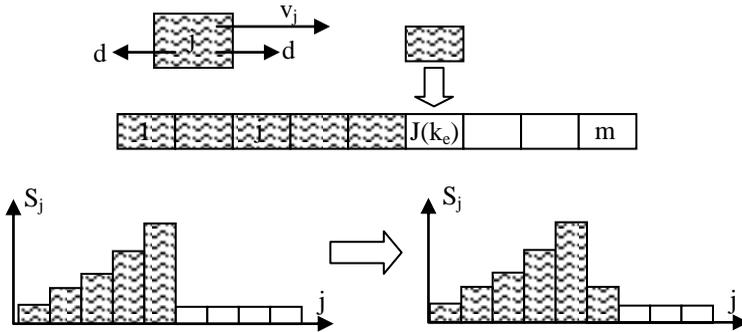


Рис.1. К построению ячеечной модели процесса

На рис.1 показана расчетная схема исследуемого процесса. Распределение содержания влаги по ячейкам представлено вектором-столбцом размером, равным числу выделенных ячеек  $m$ . Процесс наблюдается через малые конечные промежутки времени с текущим номером временного перехода  $k$ . Для каждого временного перехода построена матрица конвективной влагопроводности  $\mathbf{P}$ , включающая в себя симметричные переходы влаги между ячейками  $d$ , обусловленные чистой влагопроводностью, и направленные к периферии конвективные переходы  $v_j$ , обусловленные массовой силой. Процесс описывается рекуррентным матричным равенством

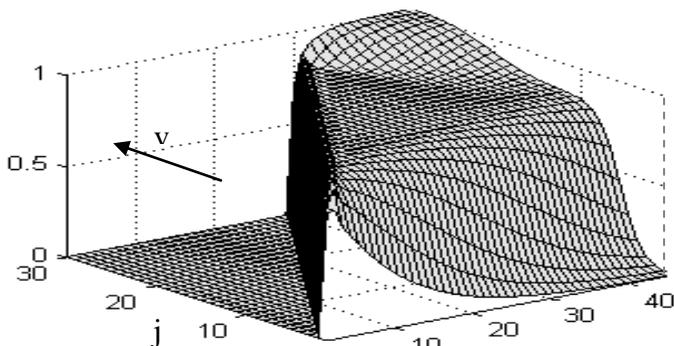
$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P}(\mathbf{S}^k + \mathbf{S}_e(\mathbf{k}_e(\mathbf{k}))), \quad (1)$$

где  $\mathbf{S}^k$  – текущий вектор содержания влаги,  $\mathbf{S}_e(\mathbf{k}_e(\mathbf{k}))$  – вектор источника влаги, подаваемой я ячейку  $J$  в моменты времени  $k_e$ . Очевидно, что число рабочих, то есть включенных во влагоперенос ячеек цепи возрастает с течением времени.

Матрица конвективной влагопроводности составлена для всех  $m$  сформированных ячеек цепи, но специальный оператор включает только те ее  $n$  элементов, которые соответствуют текущему числу слоев. Так же регулируется вектор источников влаги, вносимой с каждым новым слоем.

На основе разработанной модели выполнены численные эксперименты, демонстрирующие влияние конструктивных и режимных фак-

торов процесса на эволюцию распределения влаги по толщине слоя. Пример эволюции распределения содержания влаги показан на рис. 3.



**Рис.2. Эволюция распределения содержания влаги: новый слой появляется через  $K$  временных переходов**

Предложенная модель позволяет на основе универсального вычислительного алгоритма рассчитывать эволюцию распределения содержания влаги в многослойном материале при меняющемся числе слоев.

#### Библиографический список

1. **Mizonov, V., Zaitsev, V., Volynskii, V., Leznov, V.** (2011), Modeling the Moisture Content Distribution over a Rotating Porous Cylinder using Markov Chains. *Chemical Engineering & Technology*, 34: 1185–1190

Котов А.Б., Легков А.А. Груздева А.А., студ.;  
рук. Мизонов В.Е., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ВЛИЯНИЕ ЛИНЕЙНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ФОРМУ КРИВОЙ НАИСКОРЕЙШЕГО СПУСКА

Задача о кривой наискорейшего спуска (брахистохроне) является одной из задач, с которых началось вариационное исчисление. В ней отыскивается форма кривой, по которой материальная точка *без начальной скорости и сопротивления* соскользнет с более высокого уровня на более низкий за минимальное время. Она сводится к минимизации функционала

$$t = \int_0^1 \frac{\sqrt{1 + y'^2}}{\sqrt{2g(h - y)}} dx, \quad (1)$$

где  $(0, h)$  и  $(1, 0)$  – зафиксированные начальная и конечная точки кривой. Она имеет аналитическое решение [1], которое, однако, невозможно, если учитывать сопротивление движению точки.

Ниже предлагается численное решение этой задачи методом Рунца на классе парабол  $y(x) = ax^2 + bx + c$ , где постоянные  $b$  и  $c$  определяются из координат крайних точек, а параметр  $a$  является свободным параметром оптимизации.

Численная процедура состоит из следующих рекуррентных равенств:

- длина отрезка кривой

$$\Delta l_i = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y_i^2}; \quad (2)$$

- скорость после его прохождения

$$v_{i+1} = \sqrt{v_i^2 + 2g(y_i^2 - y_{i+1}^2) - 2kv_i \Delta l_i}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент линейного сопротивления;

- время прохождения отрезка

$$\Delta t_i = \frac{2\Delta l_i}{v_{i+1} + v_i}; \quad (4)$$

- полное время прохождения параболы

$$t = \sum_1^n \Delta t_i. \quad (5)$$

По этой схеме для каждого  $a$  находится  $t(a)$ , а затем выбирается  $a_0$ , при котором достигается минимальное время  $t_{\min}$ .

На рис.1 показана иллюстрация описанной выше процедуры на примере поиска брахистохроны на классе парабол.

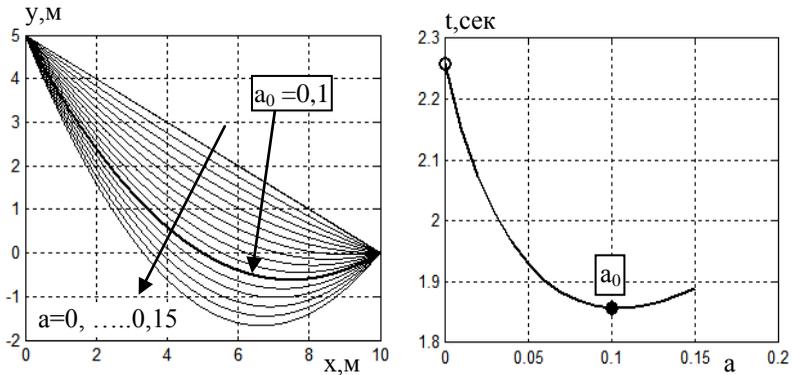


Рис.1. Иллюстрация реализации численной процедуры (2)-(5)

Рис.2 показывает результаты расчета при наличии линейного сопротивления движению точки.

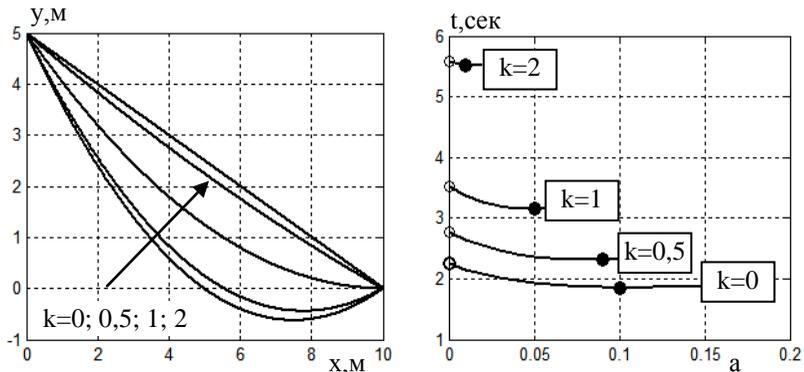


Рис.2. Иллюстрация результатов расчета

По мере роста сопротивления параболическая брахистохрона все более выпрямляется, асимптотически приближаясь к прямой линии. Заметим, что такое же ее поведение наблюдается с ростом начальной скорости точки.

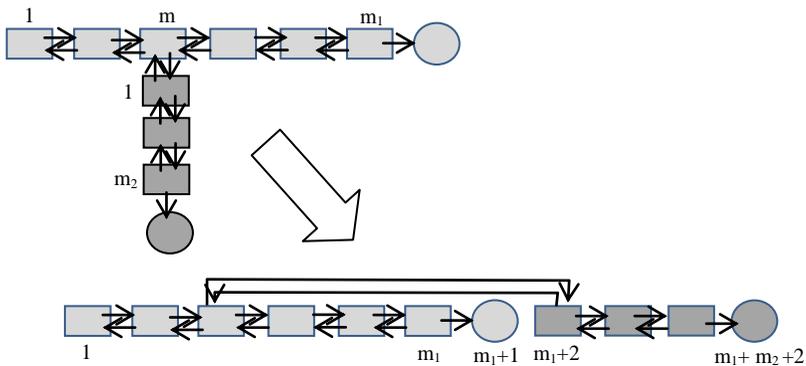
**Библиографический список**

1. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы математической физики// М: Наука, 1967. 648 с.

*Рассолов С.Е., Волков М.Н., Троицкая Т.И., студ;  
рук. Мизонов В.Е., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ВЕТВЯЩЕЙСЯ ЦЕПИ МАРКОВА**

Построение алгоритма для ветвящейся цепи Маркова рассмотрим на примере, показанном на рис.1, содержащей разветвление в ячейке  $m$  и два поглощающих состояния. Переходы в цепи характеризуются симметричными диффузионными вероятностями  $d$  и конвективной вероятностью  $v$ . В ячейке разветвления вероятность остаться в горизонтальной цепи равна  $a$ , а перейти в вертикальную цепь –  $(1-a)$ .



**Рис.1. Преобразование ветвящейся цепи в одномерную**

На рис.1 показана трансформация ветвящейся цепи в одномерную цепь, а ниже приведена матрица переходных вероятностей для такой цепи в которой выделенные элементы достаточно ясно отображают алгоритм ее построения.

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix}
 ps & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 v+d & ps & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & v+d & ps & d & 0 & 0 & 0 & d & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & (v+d)a & ps & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & v+d & ps & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & v+d & ps & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v+d & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & (v+d)(1-a) & 0 & 0 & 0 & 0 & ps & d & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v+d & ps & d & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v+d & ps & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v+d & 1
 \end{pmatrix} \quad (1)$$

На рис.2 показаны гистограммы отклика на единичный импульс в ячейке 1 для разных значений  $a$ .

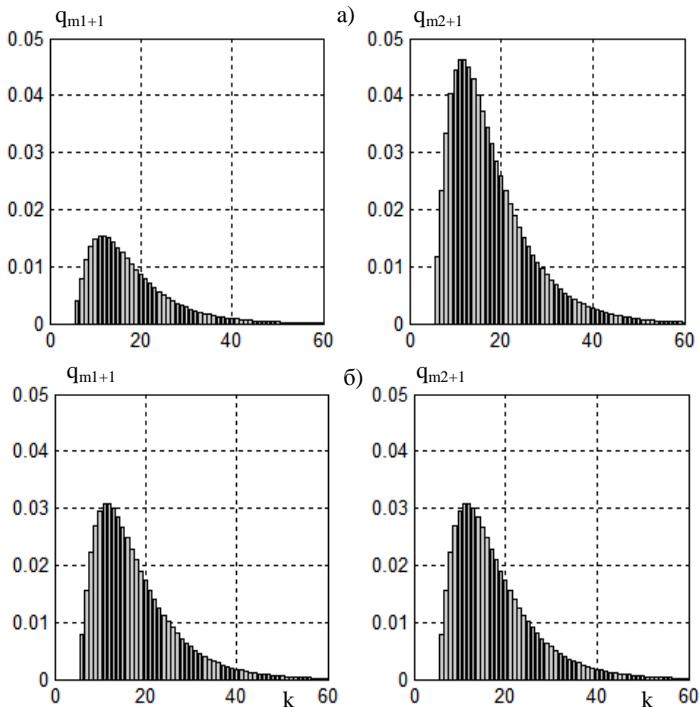


Рис.2. гистограммы отклика на единичный импульс в ячейке 1 для разных значений  $a$ : а)  $a=0,25$ ; б)  $a=0,5$

Примеры расчета показывают работоспособность алгоритма и его возможность моделировать эволюцию состояния цепи при ее любой ветвящейся конфигурации.

#### Библиографический список

1. **Баранцева Е.А.**, Мизонов В.Е. Введение в теорию цепей Маркова и ее инженерные приложения: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2010. – 80 с.

*Киселёв Г.Е., студ.; рук. доц. Митрофанов А.В.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

### **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ МАРКОВА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В АППАРАТЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Высокая стохастичность движения частиц при псевдоожигении не позволяет использовать в инженерной практике детальные модели процесса. При этом одним из распространенных путей упрощения модели является рассмотрение заранее фиксированного ансамбля частиц одинаковой крупности. В то же время большинство промышленных аппаратов функционируют в непрерывном режиме работы, а псевдоожигению подвергается полидисперсная смесь частиц.

Целью настоящей работы является распространение предложенной ранее модели на основе теории цепей Маркова [1] на случай непрерывного псевдоожигения с подачей и выгрузкой частиц. Расчетная схема и ячеечная модель процесса показана на рис. 1, а.

Пространство аппарата разделяется на  $n$  виртуальных ячеек, которые составляют цепь. Локальные параметры протекания псевдоожигения в ячейках: скорость обтекания частиц, скорость осаждения частиц – рассчитываются с учетом распределения частиц по ячейкам. В свою очередь распределение частиц по высоте аппарата, зависит от локальных скоростей обтекания и скоростей осаждения частиц. Указанная взаимообусловленность параметров псевдоожигения делает предложенную модель нелинейной, так как матрица переходных вероятностей определяется текущим состоянием процесса. Механизм формирования переходной матрицы подробно рассмотрен в работе [1].

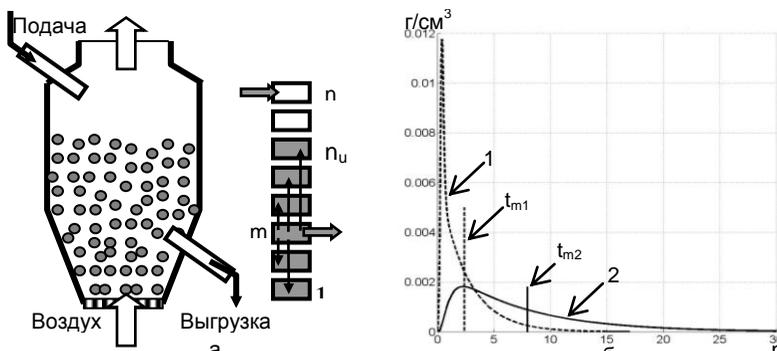


Рис.1. а - расчетная схема и ячеечная модель процесса; б – распределение времени пребывания частиц ( $m=3$ ;  $G_{R(1)}=G_{R(2)}=2,74$  г/с ,  $t_{m1}= 2,407$  с;  $t_{m2}=8,012$  с), 1- распределение времени пребывания частиц  $d_1=2$  мм, 2 - распределение времени пребывания частиц  $d_1=3$  мм.

Для описания непрерывного процесса используется цепь с порождением и гибелью частиц, где порождение соответствует их подаче в верхнюю ячейку, а гибель происходит в  $m$ -ой ячейке, где осуществляется выгрузка. Основное кинетическое уравнение изменения распределения частиц по высоте слоя для  $j$ -ой фракции материала имеет вид

$$S_j^{k+1} = P(S_j^k) S_j^k + S_{f(j)} - S_{d(j)}^k, \quad (1)$$

где  $S_j^k$  и  $S_j^{k+1}$  – вектор распределения содержания частиц  $j$ -ой фракции в слое в  $k$ -ый и  $(k+1)$ -ый моменты времени, разделенные интервалом  $\Delta t$ ;  $P(S_j^k)$  – матрица переходных вероятностей, содержащая вероятности переходов частиц  $j$ -ой фракции между ячейками;  $S_{f(j)}$  и  $S_{d(j)}^k$  – вектор источников и вектор стоков частиц  $j$ -ой фракции.

Вектор источников  $S_{f(j)}$  определяется позицией и производительностью подачи. Для схемы, показанной на рис. 1, а,  $S_{f(j)}(n) = G_{f(j)} \Delta t$ ,  $S_{f(j)}(1:n-1) = 0$ , где  $G_{f(j)}$  – производительность подачи частиц  $j$ -ой фракции.

Вектор стоков  $S_{d(j)}^k$  также определяется позицией и производительностью разгрузки  $S_{d(j)}^k(m) = G_{d(j)}^k \Delta t$ , но производительность разгрузки  $G_{d(j)}^k$  определяется параметрами слоя и не известна заранее. Эта зависимость может быть достаточно сложной, но, допуская, что псевдоожиженная среда подчиняется уравнению Бернулли, ее можно рассчитать по известной формуле истечения несжимаемой жидкости из отверстия

$$G_{d(j)}^k = a S_{j(m)}^k [2g(n_u^k - m)\Delta x]^{0.5} A, \quad (2)$$

где  $A$  – площадь сечения выходного патрубка,  $a$  – опытный коэффициент;  $(n_u^k - m)\Delta x$  – высота слоя над уровнем разгрузочного патрубка.

В процессе рекуррентного расчета по формуле (2) вычисляется выход трассера на каждом переходе

$$q_j(k) = a S_j^k(m) [2g(n_u^\infty - m)\Delta y]^{0.5} A, \quad (3)$$

что и дает распределение времени пребывания, выраженного через число временных переходов.

На рис. 1,б показаны некоторые результаты расчетов, выполненных по разработанной модели. Расчеты выполнены для цилиндрического аппарата, ожижаемый материал – бинарная смесь частиц одного материала с размерами  $d_1=2$  мм,  $d_2=3$  мм. Видно, что даже при ожижении относительно близких по размеру фракций среднее время пребывания частиц разной крупности может сильно различаться.

Предложенная модель позволяет описывать псевдоожижение полидисперсного материала, что является исходной информацией для моделирования массообменных процессов.

#### Библиографический список

1. Огурцов А.В. и др. // Изв. вузов «Химия и химич. технология», 2007, т.50, вып.3, –с.100-103.

**Кравале И.А., Метлов А.С., студ.;**  
**рук. доц. Митрофанов А.В.**  
**(ИГЭУ, г. Иваново)**

### **РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН В ОПТИЧЕСКИ ОДНОРОДНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ»**

Многие физические явления неудобны для проведения студентом натуральных экспериментов в рамках лабораторного курса. Развитие информационных технологий позволяет изменить такое положение дел, заменив натуральный эксперимент виртуальным. Во многих случаях виртуальный эксперимент оказывается наглядней, позволяет учащимся в более широком диапазоне изменять исходные данные, в реальном времени наблюдая за изменением решения задачи.

При этом при проведении численных экспериментов учащийся должен быть избавлен от необходимости вникать в детали программирования, но иметь возможность самостоятельно вводить исходные данные для исследования влияния различных факторов на протекание изучаемого процесса. Таким образом, необходимо наличие графического интерфейса пользователя. Применение для этого такого современного математического обеспечения как MATLAB, является наилучшим, на наш взгляд, выбором.

Целью данной работы является разработка виртуального лабораторного стенда для проведения студентами изучения закономерностей распространения световых волн в оптически неоднородной среде. В общем случае для описания распространения волн надо решать волновое уравнение, которое является уравнением в частных производных, с заданными начальными и граничными условиями. Однако, если длина волны много меньше любого размера системы, то можно считать, что волна распространяется аналогично движению пучка частиц.

При этом лучи подчиняются принципу Ферма: луч выбирает при движении между двумя точками такой путь, который потребует меньшего времени. Из принципа Ферма следует и закон преломления на границе двух сред. Теперь, посмотрим, что будет, если коэффициент преломления среды меняется. Для численного решения такой задачи среду, показанную на рис. 1а справа рассмотрим как совокупность слоев с разными коэффициентами преломления

$$n_0 \sin \alpha = n(y) \sin \beta(y), \quad (1)$$

$$\sin \beta(y) = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta(y)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (dy/dx)^2}}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) (с учетом того, что угол  $\alpha$  близок к  $\pi/2$ ) следует

$$n_0 = \frac{n(y)}{\sqrt{1 + (dy/dx)^2}}, \quad (3)$$

откуда

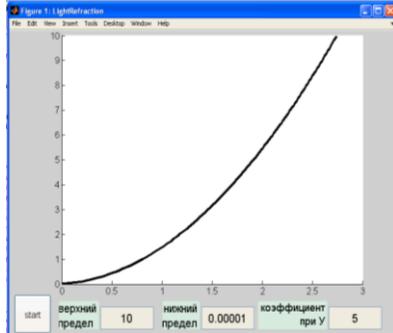
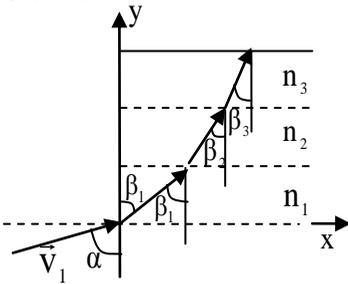
$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\left(\frac{n(y)}{n_0}\right)^2 - 1}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (4) первого порядка, имеющее решение:

$$x = \int_{y_0}^y \frac{dy}{\sqrt{\left(\frac{n(y)}{n_0}\right)^2 - 1}}. \quad (5)$$

При произвольной зависимости  $n(y)$  интеграл (5) может и не выражаться в элементарных функциях, но пригоден для численного решения [1].

Один из вариантов разработанного интерфейса для решения поставленной задачи показан на рис. 1б. В программе предусмотрена линейная зависимость  $n(y)=k \cdot y+b$ ; при этом значение  $b$  установлено «по умолчанию» ( $b=1$ ), а значение  $k$  – изменяет учащийся через окно ввода. Таким же образом пользователь может изменять пределы интегрирования.



а  
б  
**Рис.1. а - схема численного решения задачи;  
б - интерфейс виртуального лабораторного стенда**

### Библиографический список

1. **Поршнев С.В.** Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 592 с.

Комов К.П., Малхасян А.В., Профьев М.В., студ.;  
рук. Мизонов В.Е., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ВЛИЯНИЕ ЛИНЕЙНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Целью исследования было построить компьютерную модель, позволяющую выявить влияние линейного сопротивления на колебания системы с двумя степенями свободы. Расчетная схема процесса показана на рис.1.

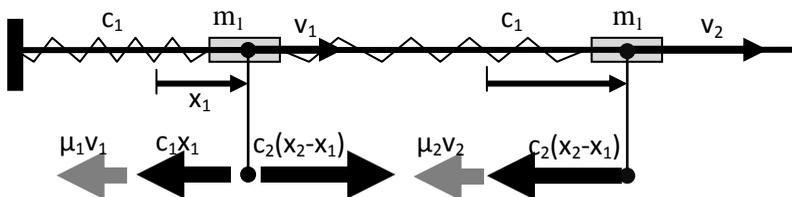


Рис.1. Расчетная схема колебательной системы

Дифференциальные уравнения движения имеют вид

$$m_1 \ddot{x}_1 = -c_1 x_1 + c_2 (x_2 - x_1) - \mu_1 v_1, \quad (1) \quad m_2 \ddot{x}_2 = -c_2 (x_2 - x_1) - \mu_2 v_2, \quad (2)$$

$$\dot{x}_1 = v_1 \quad (3) \quad \dot{x}_2 = v_2, \quad (4)$$

где  $m$ ,  $c$ ,  $\mu$  - масса, жесткость и коэффициент сопротивления, соответственно. Для их численного решения была разработана компьютерная программа с дружественным интерфейсом, использующая метод Рунге-Кутты. Появление в системе (1)-(4) двух новых параметров  $\mu_1$  и  $\mu_2$  приводит к разнообразным вариантам поведения колебательной системы. Пример ее моделирования показан на рис.2. Верхняя пара графиков описывает колебания без сопротивления. Это решение получено аналитически и одновременно служит для тестирования численного решения. Ниже приведены графики колебаний при одинаковых значениях коэффициента сопротивления. Эти колебания являются затухающими, и асимптотически массы оказываются в положении равновесия. Интересные результаты получаются, если только один из двух коэф-

коэффициентов сопротивления равен нулю (нижние графики). В этом случае колебания оказываются незатухающими, но их закон существенно отличается от закона колебаний без сопротивления. Фазовые траектории, соответствующие нижней паре графиков на рис.3, показаны на рис.3.

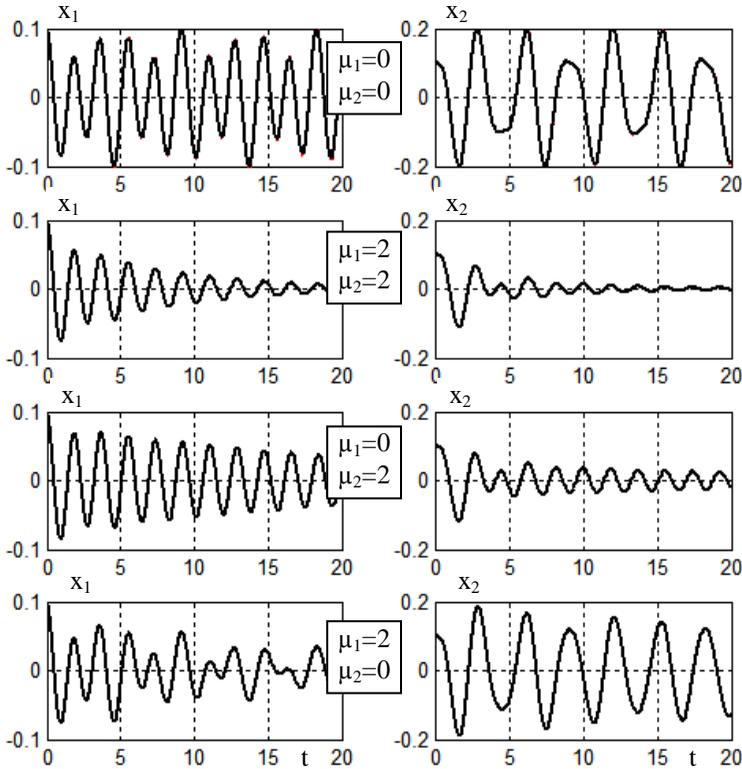
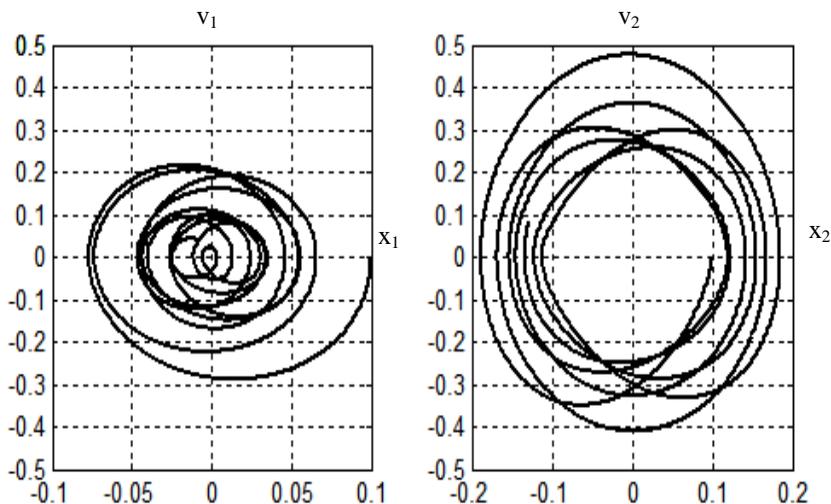


Рис.2. Законы движения масс при различных комбинациях величин коэффициентов сопротивления ( $m_1=10, m_2=2$  кг)

Рис.3. Фазовые траектории колебаний при  $\mu_1=2, \mu_2=0$ 

За расчетный период времени колебания по второй координате практически стабилизируются, хотя по первой координате продолжается переходный процесс.

Численная процедура, в принципе, допускает не только линейный, но и любой другой закон сопротивления, в том числе, скачкообразный закон, описывающий сухое трение, однако анализ влияния вида закона сопротивления выходит за рамки настоящей работы.

*Розанов Д.Ю., Макаров Д.Ю., Гембо Р.С., студ.;  
рук. Мизонов В.Е., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ГРАФИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ НЕКОТОРЫХ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

При освоении раздела математики «Теория функций комплексной переменной» приходится сталкиваться с конформными отображениями. Если линейные преобразования (растяжение-сжатие, поворот и параллельный перенос) наглядны и не вызывают затруднений, то дроб-

но-линейные преобразования и их частный случай  $w=1/z$ , формально также несложные, уже воспринимаются с трудом. Для снятия этих трудностей была разработана компьютерная программа с дружественным интерфейсом, позволяющая наглядно графически отображать это преобразование на экране монитора. Само преобразование описывается простыми формулами  $u=x/(x^2+y^2)$ ,  $v=-y/(x^2+y^2)$ , где  $y=y(x)$  – уравнение линии в плоскости  $z$   $v=v(u)$  – уравнение линии-отображения в плоскости  $w$ .

Ниже приведены несколько примеров построенных отображений, которые редко (практически никогда) не приводятся в качестве иллюстраций в учебниках математики.

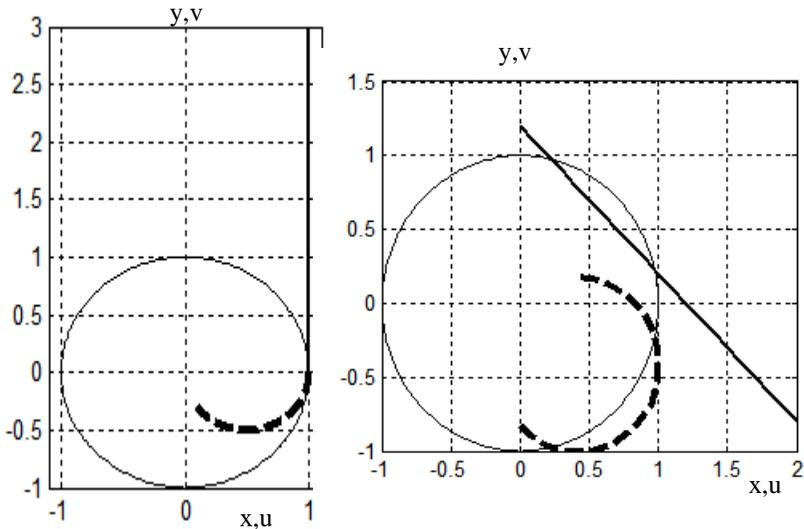


Рис.1. Отображения прямых линий (тонкая линия – окружность единичного радиуса; жирная – линия в плоскости  $z$ ; штриховая – в  $w$ )

Использование компьютерных иллюстраций с возможностью варьирования отображаемых линий позволяет лучше понять структуру этого отображения, что играет важную роль в освоении курса.

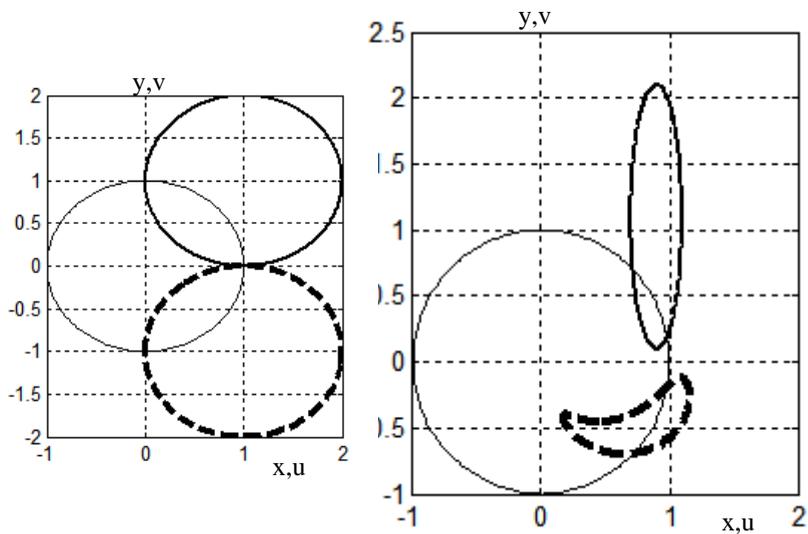


Рис.2. отображения окружности и эллипса

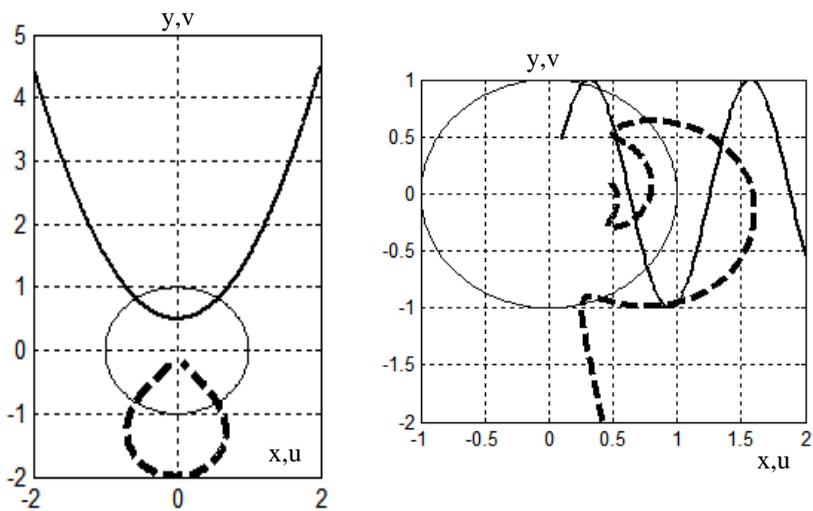


Рис.3. отображения параболы и синусоиды

*Балакирев И.А., студ., Неназдинов А.Ю., асп.;*  
*рук. В.П. Жуков, проф.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЭВОЛЮЦИЯ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В БАРБОТИРУЕМОМ СЛОЕ**

В процессе барботирования слоя жидкости пузырьками газа одновременно могут протекать процессы теплообмена, массообмена и смешивания. Интенсивность большинства процессов в слое барботируемой жидкости определяется площадью поверхности раздела фаз: чем больше эта площадь, тем интенсивней протекают процессы. Межфазная поверхность в слое может варьироваться за счет изменения размеров пузырьков, их гибели или рождения. Модели, описывающие эволюцию межфазной поверхности, позволяют ставить и решать задачи расчета и оптимального управления технологическими процессами в барботажных аппаратах, что является весьма актуальным для энергетики и смежных отраслей промышленности.

На первом этапе исследования рассматривается задача формирования межфазной поверхности в слое жидкости для одиночного пузырька газа, на втором этапе предлагается обобщение задачи на случай барботирования через слой жидкости ансамбля пузырьков с заданными начальными свойствами.

Постановка и решение задачи теплообмена при движении пузырька в жидкости. Задача движения и теплообмена для одиночного пузырька в слое жидкости рассматривается в одномерной постановке. На глубине  $h_0$  от поверхности жидкости образуется пузырек радиусом  $r_0$  с температурой газа  $T_0$ . Считается, что на пузырек при его всплытии кроме силы Архимеда и силы тяжести действует также сила гидродинамического сопротивления. Уравнение движения пузырька вдоль оси  $x$  под действием перечисленных сил записывается в виде

$$m\ddot{x} = -mg - F_c + F_A .$$

После деления уравнения на массу пузырька получаем

$$\ddot{x} = -g - \frac{F_c}{m} + \frac{F_A}{m} , \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m$  – масса газа в пузырьке,  $mg$  – сила тяжести,  $F_c$  – сила сопротивления,  $F_A$  – сила Архимеда. Сила сопротивления, отнесенная к массе пузырька, (второе слагаемое в правой части уравнения (1)) для сферического пузырька находится из выра-

жения:

$$\frac{F_c}{m} = -\frac{3}{8} \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{c_f}{r} |v|v, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость пузырька газа радиусом  $r$ ;  $\rho_g$  и  $\rho_l$  – плотности газа и жидкости соответственно;  $c_f = f(Re)$  – коэффициент сопротивления в функции от числа Рейнольдса.

Выражение для силы Архимеда (третье слагаемое в правой части уравнения (1)) записывается в виде

$$\frac{F_A}{m} = \frac{V_g \rho_l g}{V_g \rho_g} = \frac{\rho_l}{\rho_g} g, \quad (3)$$

где  $V_g$  – объем пузырька газа. Следует отметить, что радиус пузырька и плотность газа внутри пузырька меняется за счет изменения давления и температуры газа. Связь параметров пара в пузырьке на первом этапе моделирования описывается уравнением состояния идеального газа

$$\frac{V_g P}{T} = \frac{m}{\mu} R_{\mu}, \quad (4)$$

где  $T$  – температура газа,  $\mu$  – масса моля газа,  $R_{\mu}$  – универсальная газовая постоянная,  $P$  – давление газа в пузырьке, определяемое суммой давлений над поверхностью жидкости  $P_0$  и давлением столба жидкости

$$P = P_0 + \rho_l g (h_0 - x). \quad (5)$$

Разность температур жидкости и газа обуславливает теплообмен между ними, который описывается законом Ньютона:

$$dQ = \alpha(T_l - T)Sdt = m_g c dT,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $c$  – теплоемкость газа,  $dQ$  – количество переданной тепловой энергии за время  $dt$  через поверхность площадью  $S$ . Для пузырька сферической формы уравнение Ньютона представляется в виде

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3\alpha}{r\rho_g c} (T_1 - T). \quad (6)$$

Плотность газа согласно (4) выражается как функция температуры и координаты

$$\rho_g(x, T) = \frac{m}{V_g} = \frac{P(x)\mu}{TR_\mu}. \quad (7)$$

Размер сферического пузырька находится через его объем согласно выражению

$$r(x, T) = \sqrt[3]{\frac{3V_g(P(x), T)}{4\pi}}. \quad (8)$$

Система дифференциальных уравнений (1), (6) относительно трех неизвестных функций  $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $T(t)$  для ее численного решения представляется в машинном виде: каждое уравнение разрешается относительно первых производных неизвестных функций, а правые части не содержат производных этих функций:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = -g - \frac{3}{8} \frac{\rho_l}{\rho_g(x, T)} \frac{c_f}{r(x, T)} |v|v + \frac{\rho_l}{\rho_g(x, T)} g \\ \frac{dT}{dt} = \frac{3\alpha}{c_g r(x, T) \rho_g(x, T)} (T_1 - T) \end{array} \right. \quad (9)$$

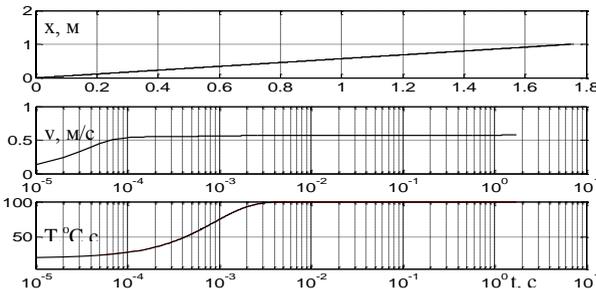


Рис. 1 Зависимость координаты пузырька, скорости его движения и температуры газа от времени с учетом теплообмена

Формализованная запись системы (9) позволяет получить ее численное решение стандартными методами. В нашем случае для решения системы (9) используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Результаты решения получены в виде зависимостей

искомых функций от времени процесса:  $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $T(t)$ . Анализ полу-

ченных данных показывает, что для условий, характерных для атмосферных деаэраторов, температура газа и скорость пузырька практически мгновенно за время  $10^{-3}$  и  $10^{-4}$  с соответственно достигают установившихся значений.

*Кадилов В.Н., Перминова А.С., студ.;  
рук. В.П. Жуков, проф  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СТРУКТУРНО-РЕЖИМНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

Задачи оптимизации и системного анализа технологических процессов и их аппаратурного оформления предполагают разработку новых или использование старых математических моделей и методов расчета. Основное внимание в работе уделяется разработке моделей расчета систем тепломассообменных аппаратов, необходимых постановки и решения задач оптимизации.

В основу математического описания положены также уравнения материального и энергетического баланса. Особенностью подхода является использование при выводе основных уравнений модели аддитивных параметров теплоносителей. Следует отметить, что в ряде случаев при выполнении математических преобразований аддитивные параметры удается заменить другими технологическими параметрами. Например, теплоту, используемую при составлении энергетических балансов, после преобразований удастся записать в матричном уравнении через температуру теплоносителей.

Рассматривается вывод матричных уравнений для наиболее общего случая системы из  $n$  элементов (ячеек), произвольно соединенных между собой. Ступень (ячейка) тепломассообмена представляется четырехполосником с входными и выходными потоками для холодного и горячего теплоносителей. Матрица-столбец (вектор признаков)  $X$  составляется из аддитивных параметров теплоносителей, значения которых можно складывать при смешении потоков. Такими параметрами являются, например, энергия, энтальпия или масса.

Наиболее общий случай соединения ступеней предполагает возможность подачи на вход в  $i$ -й элемент потоков из всех остальных элементов. На рис. 1 схематично показано формирование потока на

входе в  $i$ -й элемент установки. На вход в первый элемент подаются потоки холодного и горячего теплоносителя, которые характеризуются набором признаков  $[X_0]_1$ , индекс «0» внутри квадратных скобок указывает на входные параметры, индекс «1» за квадратными скобками относится к номеру ступени.

Процесс теплообмена, массообмена или их совместное протекание описывается матрицей процесса  $\mathbf{B}$ , которая при линейной постановке задачи позволяет определить выходные параметры ступени  $[X]_i = \mathbf{B}_i [X_0]_i$ . Для указания направления движения потока после ступени формируется матрица коммутации  $\mathbf{K}_{i1}$ , элементы которой показывают доли потока из первой ступени в  $i$ -ю. Матричное произведение  $\mathbf{K}_{i1} \mathbf{B}_1 [X_0]_1$  определяет параметры потока, подаваемого из первого элемента в  $i$ -й. Очевидно, что на вход в  $i$ -ю ступень могут подаваться потоки из остальных элементов схемы и внешние для установки потоки.

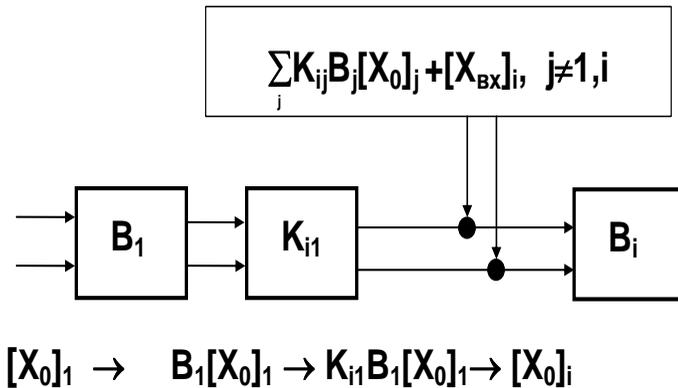


Рис1. Расчетная схема потоков

Входной вектор признаков для  $i$ -го элемента определится как сумма аддитивных характеристик смешиваемых на его входе потоков

$$[X_{0i}] = K_{i1} B_1 [X_{01}] + K_{i2} B_2 [X_{02}] + \dots + K_{in} B_n [X_{0n}] + [X_{\text{вх}i}]_i, \quad (1)$$

где индекс «вх» указывает на внешний поток, подаваемый на вход ступени.

Уравнения, аналогичные (1), записываются для каждой из  $n$  ступеней установки. Полученная система уравнений после преобразований

представляется в матричном виде

$$\begin{pmatrix} -\mathbf{I} & K_{12}B_2 & \dots & K_{1n}B_n \\ K_{21}B_1 & -\mathbf{I} & \dots & K_{2n}B_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1}B_1 & K_{n2}B_2 & \dots & -\mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [X_0]_1 \\ [X_0]_2 \\ \dots \\ [X_0]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[X_{a0}]_1 \\ -[X_{a0}]_2 \\ \dots \\ -[X_{a0}]_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

При известных матрицах  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{K}$  решение системы (2) позволяет определить значения параметров теплоносителей в любой точке установки. Матрицы процесса ступени  $\mathbf{B}$  определяется из балансового уравнения для выделенного элемента. В системе поверхностных теплообменных аппаратов в качестве подсистемы (ячейки) могут рассматриваться либо отдельные аппараты, либо их ступени.

Предложенная модель позволяет ставить и решать задачи оптимизации структуры и режима работы сложных систем теплообменных аппаратов.

*Романов С.Г., студ., М.А. Газимагомедова, асп.;  
рук. В.П. Жуков, проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ЭНТРОПИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

На основе информационно энтропийного подхода сформулирована и решена задача восстановления вида матрицы измельчения по экспериментальным данным.

В предлагаемой работе сделана попытка из анализа экспериментальных данных определить вид матрицы измельчения.

Процесс измельчения традиционно описывается матричным уравнением [1]:

$$f = P \cdot f_0, \quad (1)$$

где  $f_0$ ,  $f$  – матрица столбец размера  $n \times 1$  распределения частиц по крупности в исходном и измельченном продуктах соответственно;  $P$  – матрица измельчения размера  $n \times n$ , каждый элемент которой  $p_{ij}$  показыва-

ет вероятность перехода материала из  $j$ -й фракции в  $i$ -ю;  $n$  - число фракций;  $i, j = 1..n$  - номера фракций: 1 - соответствует самой крупной,  $n$  - самой мелкой фракции.

Определение гранулометрического состава измельченного продукта  $f$  по известным  $P$  и  $f_0$  будем называть прямой задачей измельчения. Под обратной задачей измельчения будем понимать восстановление матрицы измельчения по заданным гранулометрическим составам исходного и измельченного порошков.

Матричное выражение (1) может быть записано в виде системы  $n$  линейных уравнений, которая при решении обратной задачи содержит  $n \times n$  неизвестных  $p_{ij}$  и имеет множество решений. Для получения единственного решения сформулирован оптимизационный принцип (принцип максимума информационной энтропии) и естественные балансовые ограничения по массе и энергии :

$$\begin{aligned}
 H &= -\sum_{ij} t_{ij} \ln t_{ij} \Rightarrow \max, \\
 \sum_{ij} t_{ij} e_{ij} &= E, \\
 \sum_j t_{ij} &= f_{oi}, \\
 \sum_i t_{ij} &= f_j,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $H$  - энтропия;  $t_{ij}$  - массовый поток материала при измельчении из  $i$ -й фракции в  $j$ -ю;  $E$  - полная энергия измельчения;  $e_{ij}$  - удельная энергия перехода частиц из  $i$ -й фракции в  $j$ -ю, определяемая конкретным законом измельчения:

$$e_{ij} = \begin{cases} C_R \left( \frac{1}{\delta_j} - \frac{1}{\delta_i} \right), & \text{Rittinger} \\ C_B \left( \frac{1}{\sqrt{\delta_j}} - \frac{1}{\sqrt{\delta_i}} \right), & \text{Bond} \\ C_K \ln \frac{\delta_i}{\delta_j}, & \text{Kick} \end{cases} \tag{3}$$

где  $\delta$  - размер зерен фракции,  $C$  - коэффициент пропорциональности.

Решение оптимизационной задачи (2), полученное методом неопределенных множителей Лагранжа [2], имеет вид:

$$\begin{aligned}
 t_{ij} &= A_i B_j f_{0i} f_j \exp(-\beta e_{ij}), \\
 A_i &= \left[ \sum_j B_j f_j \exp(-\beta e_{ij}) \right]^{-1}, \\
 B_j &= \left[ \sum_i A_i f_{0i} \exp(-\beta e_{ij}) \right]^{-1},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где параметр  $\beta$  определяется из баланса энергий.

Определение энтропии через потоки материала между фракциями позволяет свести обратную задачу измельчения к транспортной задаче [2]. Искомая матрица измельчения  $P = \{p_{ij}\}$  однозначно восстанавливается из матрицы потоков  $T = \{t_{ij}\}$  делением  $i$ -й строки на содержание  $i$ -й фракции в исходном продукте  $f_{0i}$  и транспонированием полученной матрицы:

$$\{p_{ij}\} = \{t_{ij}/f_{0i}\}^T.
 \tag{5}$$

Представленное решение задачи позволяет по экспериментальным данным восстанавливать матрицу измельчения.

#### Библиографический список

1. **Mizonov V.**, Zhukov V., Bernotat S. Simulation of Grinding: New approaches. ISPEU Press. Ivanovo, 1997.108 p.
2. **Wilson A.G.** Entropy in Urban and Regional Modelling, Pion Limited, London, 1970.

*А.С. Гусева, асп.; рук. доц. А.В. Огурцов  
(ИГЭУ, ИГПУ, г. Иваново)*

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МОНОЛИТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Актуальной на сегодня задачей является строительство фундаментов зданий в зимнее время. Температурный режим застывания бетона влияет на его прочностные свойства при последующей эксплуатации. Поэтому нами была поставлена задача разработки математической модели, позволяющей рассчитывать температурные поля внутри железобетонных конструкций.

Решения поставленной задачи реализовано с помощью теории цепей Маркова. Монолитный бетонный слой был разбит по высоте на ячейки, каждой из которых поставлены в соответствие доли содержащейся в них теплоты. Эти доли зависят от свойств бетона: коэффициента теплопроводности, теплоёмкости и плотности материала. Считается, что тепловые свойства равномерно распределены по объёму материала. Интересующее нас распределение температур строится в поперечном направлении, поэтому модель базируется на одномерной цепи.

Текущее распределение теплоты по высоте слоёв представлено в виде конечного вектора состояния, организованного в вектор-столбец совокупности содержания теплоты в каждой ячейке. Параллельно рассчитывается вектор-столбец распределения температур по ячейкам. Каждый последующий вектор является произведением матрицы переходных вероятностей на предыдущий вектор. Выбирается промежуток времени, называемый временем перехода, за который некоторое количество теплоты может быть передано в соседние ячейки (но не далее), расположенные над и под текущей ячейкой. Матрица переходных вероятностей – трёхдиагональная, на главной диагонали расположены вероятности для теплоты остаться за один временной переход в наблюдаемой ячейке. Под и над главной диагональю расположены вероятности, определяющие доли теплоты переходящие в ячейку ниже и выше наблюдаемой соответственно.

Предложенная математическая модель позволяет при заданных свойствах материала, наружных температурах и коэффициентов теплопередачи для поверхностей, граничащих с окружающей средой получить распределение температуры по высоте бетонного слоя. Модель позволяет учесть наличие внутренних тепловых источников (греющей опалубки, тепловыделение за счёт явления гидратации бетона).

*А.А. Доброхотов, студ.;  
рук. А.В. Огурцов, доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ**

Технология псевдооживления имеет широкое применение в различных отраслях промышленности. Широкое внедрение псевдооживления обуславливается рядом факторов: выравниванием температур и концентраций в объеме слоя, связанным с интенсивным перемешиванием твердой фазы; высокие значения коэффициентов эффективной теплопроводности и теплоотдачи от слоя к газу и обратно; текучести; независимости гидравлического сопротивления слоя от фракционного состава и др. Поэтому экспериментальная работа с аппаратами кипящего слоя носит актуальный характер.

Лабораторная установка состоит из газодувки, переходника, и аппарата плоской формы, одна из стенок которого была выполнена из прозрачного стекла, а другая служила непрозрачным фоном. Таким образом, частицы (одинаковые сферические пластмассовые шарики диаметром 6 мм) имеют возможность перемещения вверх, вниз, вправо и влево. Процесс псевдооживления в такой установке с одной стороны отличается от процесса в реальном аппарате кипящего слоя, но, с другой стороны, позволяет легко наблюдать движение частиц и с помощью фото или видео аппаратуры дать количественную оценку параметрам псевдооживленного слоя. Расстояние между стенками аппарата составляло 6,2 мм. Скорость движения воздуха может быть рассчитана по показаниям трубки Пито-Прандталя.

Газодувка приводится во вращение асинхронным трёхфазным двигателем. Одной из задач изготовления установки была организация питания двигателя от двухпроводной сети. Для этого с помощью эмпирической зависимости был подобран конденсатор.

*Ст.С. Лавринович, асп.;*  
*рук. доц. А.В. Огурцов*  
*(ИГЭУ, ИГПУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ С ПОМОЩЬЮ ЦЕПЕЙ МАРКОВА**

Повышение качества производства строительных конструкций, имеющих слоевую структуру из разнородного материала, носит актуальный характер. Следует отметить, что многие материалы, используемые в качестве утеплителя, имеют низкие значения температуры разрушения, однако температуры сушки часто превышают эти значения. Поэтому необходимо знать распределение температуры внутри конструкции и его зависимость от времени. Решение подобной задачи методом составления дифференциальных уравнений приводят к громоздким выражениям, а принимаемые допущения часто приводят к частному характеру этих решений.

Целью исследования является моделирование и расчет температурного поля в многослойной среде с различными тепловыми свойствами материалов каждого слоя с помощью теории цепей Маркова. Многослойная среда представлена совокупностью малых, но конечных, ячеек, каждой из которых поставлены в соответствие доли содержащейся в них теплоты, переносимые в соседние ячейки, окружающие данную ячейку. Эти доли пропорциональны коэффициенту теплопроводности и обратно пропорциональны теплоёмкости, плотности материала и размеру ячейки.

Считается, что тепловые свойства равномерно распределены по объёму слоёв материала. Результирующее распределение температур строится в поперечном направлении, поэтому модель базируется на одномерной цепи.

Текущее распределение теплоты по высоте слоёв представлено в виде конечного вектора состояния, организованный в вектор-столбец совокупности содержания теплоты в каждой ячейке. Параллельно рассчитывается вектор-столбец распределения температур по ячейкам. Каждый последующий вектор является произведением матрицы переходных вероятностей на предыдущий вектор. Матрица переходных вероятностей построена в соответствии с физическими обоснованиями данного процесса, её элементы зависят от теплоёмкости, коэффициента теплопроводности, плотности материала, а также от квадрата разме-

ра ячейки и времени перехода. Рекуррентные матричные равенства позволяют проследить всю эволюцию распределения температуры и теплоты с начального до установившегося состояния, которое может быть стационарным и нестационарным.

*Д.Д. Бонокин., Л.Е. Малинин, студ.;  
рук. Е.А. Баранцева, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЦИОНАЛЬНАЯ ЗАГРУЗКА КОМПОНЕНТОВ В СМЕСИТЕЛЬ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

Решена задача об оптимальном управлении потоком сегрегирующего компонента в смеситель периодического действия. Рассмотрена распределенная во времени подача ключевого компонента – его непрерывная засыпка в смеситель в течение  $k$  первых переходов. Такой подаче соответствует вектор подачи, показанный на рис.1, где в течение  $k$  первых переходов в первую ячейку на каждом переходе добавляется доля  $1/k$  общей единичной загрузки ключевого компонента. На рис. 2 показана кинетика формирования качества смеси при различных значениях  $k$ , причем рассматривать изменение величины  $\sigma$  имеет смысл только при  $i > k$ , когда в смесителе находится уже весь ключевой компонент. Случай  $k=1$  соответствует традиционной загрузке всего ключевого компонента в начале процесса. При  $i=13$  достигается наилучшее качество смеси (минимум  $\sigma$ ), которое затем быстро ухудшается. «Размазывание» подачи на 8 первых переходов приводит к смещению минимума вправо, что соответствует снижению производительности, однако само минимальное значение  $\sigma$  несколько уменьшается. Более заметно увеличение предельного качества смеси при  $k=16$ , но для его достижения также необходимо продолжать процесс после окончания загрузки компонента. Однако при  $k=24$  процесс следует прервать сразу после окончания загрузки, так как качество сразу начинает ухудшаться.

На рис. 3 показано максимально достижимое качество смеси при такой подаче. При высоких скоростях сегрегации минимум  $\sigma$  при распределенной подаче значительно ниже, чем при одноразовой, то есть может быть заметно улучшено качество смеси. Существенно, что при оптимальной программе ключевого компонента максимально достижимое качество смеси весьма незначительно зависит от скорости сегрегации.

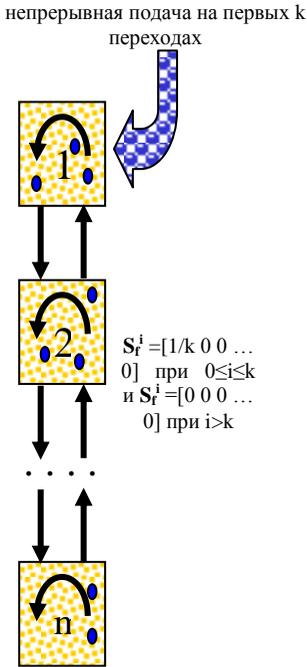


Рис.1. Непрерывная подача на первых k переходах

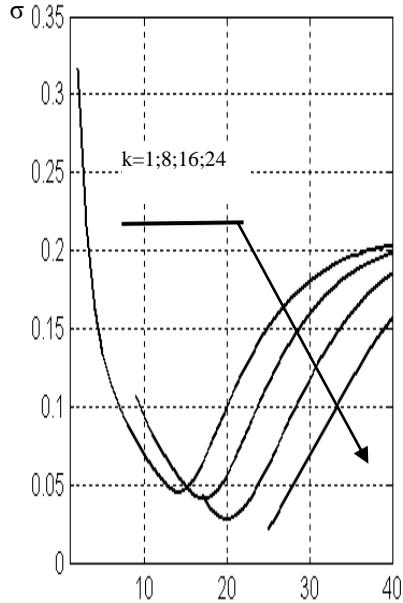


Рис.2. Влияние программы загрузки ключевого компонента на формирование качества смеси ( $m=10$ ;  $v=0,4$ ;  $d=0,2$ )

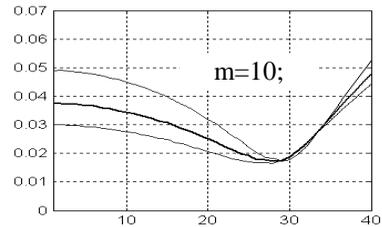
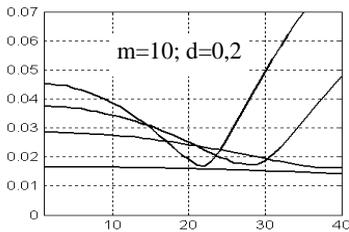


Рис.3. Максимально достижимое качество смеси

М.А. Беляков, Р.А. Серов, студ.;  
рук. Е.А. Баранцева, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПО ДЛИНЕ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПОДАЧИ СЕГРЕГИРУЮЩЕГО КОМПОНЕНТА В СМЕСИТЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Решена задача об оптимальной распределенной по длине смесителя подаче сегрегирующего компонента. На рис.1. показана схема этого процесса. Считается, что сегрегация ключевого компонента идет вниз. Цель распределенной подачи – не дать ему значительно опуститься вниз, чтобы не исказить поперечный профиль концентрации.

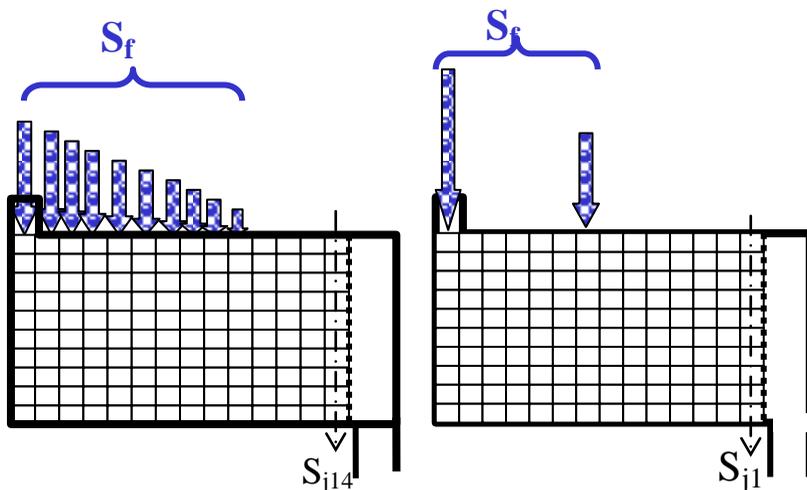


Рис.1. Схема распределенной подачи компонента в смеситель и ее двухточечное приближение

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 2, где показано влияние скорости циркуляции на предельно достижимое значение  $\sigma_k = \text{корт}$  для разных скоростей сегрегации  $v_0$ . Как и следовало ожидать, можно подобрать такую скорость циркуляции, при которой возможно достижение равномерной смеси, несмотря на наличие сегре-

гации (на оси ординат – предельно достижимые  $\sigma_k = \text{корт}$  при отсутствии циркуляции). Также было показано, что двухточечное (через два патрубка) приближение оптимальной программы подачи дает результат, лишь незначительно уступающий распределенной подаче.

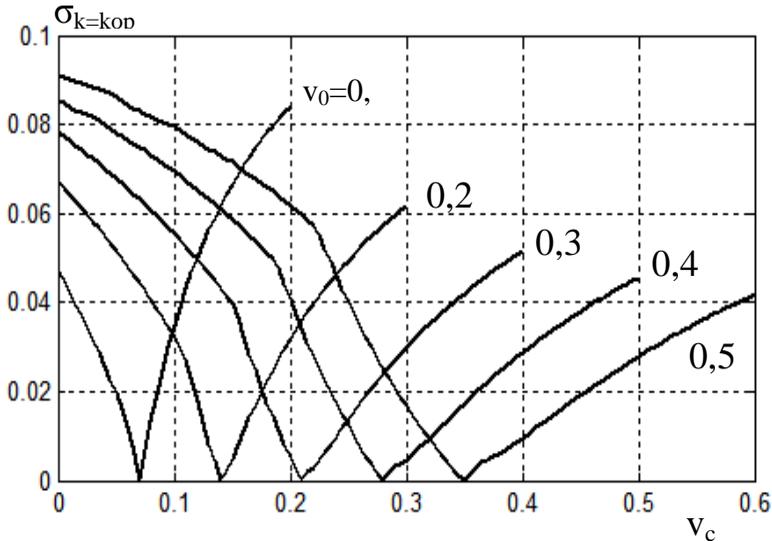


Рис.2. Влияние скорости циркуляции на предельное качество смеси при различных скоростях сегрегации ( $d=0,1$ )

Входящий поток деталей является одним из основных и наиболее важных определений в теории массового обслуживания. Поэтому изучение потока деталей представляет собой первую задачу, возникающую при практическом применении теории массового обслуживания к решению задач автоматического ориентирования деталей. Если поток деталей, поступающий в систему, является простейшим, то он должен обладать свойствами стационарности, отсутствия последствия и ординарностью.

Стационарными являются потоки, для которых вероятность поступления определенного количества деталей в течение определенного промежутка времени не зависит от начала отсчета времени, а зависит от продолжительности промежутка времени. Поток называется стационарным, если закон распределения группы случайных величин:

$$x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)$$

совпадает с законом распределения:

$$x(t_1 + a) - x(a), x(t_2 + a) - x(a), \dots, x(t_n + a) - x(a)$$

то есть распределение случайных величин зависит от  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . И не зависит от величины  $a$ , где  $a$  – любой произвольный отрезок времени. как частный случай из этих рассуждений вытекает, что для стационарных потоков:

$$p[x(t) = k] = p[x(t + a) - x(a) = k],$$

где  $a=1,2,3\dots$ , т.е. вероятность того, что ровно  $n$  деталей будет получено за промежуток времени  $(0,t)$ , равна вероятности получения  $n$  – деталей за промежуток времени  $(a, a+t)$  при любом значении  $a$ .

Свойства стационарности помогают изучать поток деталей. Если известен характер потока деталей, поступающих для автоматического ориентирования с некоторого начального момента  $t=0$ , то для получения характеристики потока с момента  $t=a$  нет необходимости изучать этот поток заново. Число деталей, поступающих в систему ориентирования после момента  $t=a$ , будет подчиняться тому же закону.

В нашем случае вероятность поступления деталей на ориентирование в течение определенного промежутка времени не зависит от начала отсчета времени, а зависит от продолжительности промежутка времени. Детали движутся по лотку одна за другой вплотную либо с небольшими интервалами (5-15 мм). Поэтому в указанном процессе налицо стабильность количества деталей, подаваемых для ориентирования в единицу времени в любой промежуток времени.

Отсутствие последствия заключается в том, что вероятность  $V_k(t)$  наступления  $k$  событий за промежуток времени  $(a, a+k)$  не зависит от чередования событий до момента  $a$ , другими словами, условная вероятность наступления  $k$  событий за промежуток времени  $(a,a+t)$ , вычисленная при любом предположении о чередовании событий до момента  $a$ , равна безусловной вероятности  $V_k(t)$  того же события. Отсутствие последствия выражает собой взаимную независимость протеканий потока в непересекающихся между собой промежутках времени. Это условие соблюдается при наличии достаточного запаса неориентированных деталей в чаше вибробункера. Но так как вибробункеры работают с достаточным запасом, то поток деталей удовлетворяет требованиям отсутствия последствия.

Пусть для данного стационарного потока  $\Psi(t)$  означает вероятность того, что за промежуток времени длины  $t$  наступит по меньшей мере два события. Очевидно:

$$\Psi(t) = 1 - V_0(t) - V_1(t) = \sum_{k=2}^{\infty} V_k(t).$$

Тогда мы имеем:

$$\Psi(t) = 0(t), (t \longrightarrow 0).$$

Или, что то же:

$$\frac{\Psi(t)}{t} \longrightarrow 0, (t \longrightarrow 0).$$

Ординарность потока выражает собой практическую невозможность совмещения двух или более событий в один и тот же момент времени.

В нашем случае в любой момент времени на позицию ориентирования может поступить только одна деталь. Это очевидно из конструктивных соображений, т.к. в выходной части лотка, где обыкновенно стоят ориентирующие устройства, детали идут упорядоченно.

Таким образом, поток деталей, поступающий на позицию ориентирования, обладает свойствами стационарности, отсутствием последействия, ординарностью, т.е. поток деталей – простейший.

Для простейшего потока число деталей, поступающих в промежутки времени  $t$ , распределено по закону Пуассона с параметром  $\lambda$  t:

$$V_k(t) = e^{-\lambda t} \cdot \frac{(\lambda t)^k}{k!} \quad (k=0,1,2,\dots,n)$$

Вероятность поступления за время  $t$  по крайней мере одной детали:

$$\omega(t) = 1 - V_0(t) = \sum_{k=1}^{\infty} V_k(t) = V_1(t) + \Psi(t).$$

При  $t \longrightarrow 0$ :

$$\omega(t) = 1 - e^{-\lambda t} = \lambda t + 0(t).$$

Или, что то же:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\omega(t)}{t} = \lambda.$$

Можно считать это соотношением определением параметра  $\lambda$ .

Физический смысл параметра  $\lambda$  в случае простейшего потока представляет собой математическое ожидание числа деталей, поступающих на позицию ориентирования в промежутке времени от 0-t.

$$M_t(k) = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot V_k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda t} = e^{-\lambda t} \cdot \lambda t \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!}.$$

Сумма  $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!}$  есть разложение в ряд по степеням  $\lambda t$  функции  $e^{\lambda t}$ , отсюда :

$$M_t(k) = \lambda t \cdot e^{-\lambda t} \cdot e^{\lambda t} = \lambda t.$$

Математическое ожидание числа деталей за единицу времени, которое получается из выражения  $M_t(k)$  при  $k=1$ , равно:

$$M_1(k) = \lambda.$$

Итак, свойство ординарности входящего потока деталей позволяет применять теорию массового обслуживания при расчетах производительности автоматических ориентирующих устройств.

#### Библиографический список

1. Глазков, В.А. Активно-принудительное устройство для вторичной ориентации плоских деталей / В.А. Глазков, А.С. Храбрев, Ю.Л. Стовбуненко // Механизация и автоматизация производства.-1970.-№12. – С. 28-30.
2. Глазков, В.А. Расчет производительности автоматических ориентирующих устройств сборочных автоматов.-Сб.: Научные основы автоматизации сборки машин / В.А. Глазков; под ред. М.П. Новикова. – М.: Машиностроение, 1976.-289 с.

*С.М. Грибкова, асп.; Н.П. Воронова, к.т.н., доц;  
рук. Н.И. Березовский, д.т.н, проф.  
(БНТУ, г. Минск)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ АСПЕКТОВ АЭРОДИНАМИКИ ПЕЧЕЙ

Нагревательные печи для термической обработки по источнику тепловой энергии разделяются на пламенные и электрические. Наиболее распространенными с точки зрения экономии затрат на источник энергии являются газовые печи. Осуществление в них высоких требований к качеству нагрева металла невозможно без применения скоростного и одновременно безоxygenного и необуглероживающе-

го нагрева, а следовательно, без организации рециркуляции. В связи с этим институтом НИАТ, Теплопроект, БНТУ и ВНИИПРОМГАЗом разработан ряд камерных рециркуляционных печей серии РКП, обеспечивающих точный и равномерный нагрев заготовок с минимальным окиснообразованием [1].

Однако для выбора оптимальных размеров рабочего пространства печей, учитывая их специфику, необходимо проанализировать аэродинамику газоздушных потоков, определить коэффициенты теплоотдачи, разработать режимы и технологию нагрева, а также оценить экологические характеристики этих печей. Для разработки оптимальной геометрии рабочего пространства и инжектора необходимо, прежде всего, исследовать распределение скоростных полей в рабочем пространстве печи и оценить конвективную составляющую теплообмена. Для этих целей были сконструированы и испытаны «холодные» модели РКП-1 и РКП-2. Расчет велся на основании теории подобия.

Рассмотрим подробнее расчет параметров моделирования. Для выбора масштабов моделирования и определяющих критериев подобия исследуем совместно уравнение энергии с позиций 1-го и 2-го закона термодинамики, уравнение движения Навье-Стокса и уравнение сплошности [2].

Уравнение энергии применительно к потоку вязкой жидкости, которая поглощает, испускает и рассеивает энергию, с учетом допущений, что среда сплошная и находится в состоянии локального термодинамического равновесия, можно написать:

$$\rho c_v = \text{div}(q \Sigma) - \rho \text{div}W + \mu \Phi, \quad (1)$$

$$\text{div}(q \Sigma) = \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right),$$

где  $\rho$  – плотность,  $c_v$  – коэффициент удельной теплоемкости,  $\mu \Phi$  – диссипативная Рэлея;  $W$  – скорость;  $q$  – плотность теплового потока.

Определим  $q_x, q_y, q_z$ . В наших условиях теплота переносится теплопроводностью, конвекцией и излучением, тогда выражение для теплового потока, применяя принцип аддитивности, можно записать следующим образом:

$$Q_x(y, z) = q_x(y, z)_{\text{тепл}} + q_x(y, z)_{\text{конв}} + q_x(y, z)_{\text{изл}}.$$

В соответствии с законом Фурье

$$q_x(y, z)_{\text{тепл}} = -\lambda \text{grad}T - \tau_r \frac{\partial q_r(y, z)}{\partial \tau},$$

где  $\tau_r$  - время релаксации теплового потока.

Применительно к обычным скоростям движения дымовых газов и скоростям передач тепловых потоков  $\frac{\partial q}{\partial \tau}$  можно применять

$\tau_r \frac{\partial q_r}{\partial \tau} = 0$ . Конвективная составляющая  $q_x(y, z)$  находится следующим образом:

$$q_x(y, z)_{\text{конв}} = \rho W_x i.$$

Радиационная составляющая  $q_{x\text{изл}}$  (индексы  $y, z$  – опускаем, так как аналогичные выражения можно получить и для осей  $y, x$ ) в общем виде как приближение Росселанда равна

$$q_{x\text{изл}} = -\frac{4}{3K_\lambda} \text{grad}E_x(1, \lambda), \quad (2)$$

где  $E_x(1, \lambda)$  – плотность потока излучения, определяемая по закону Планка;  $K_\lambda$  – коэффициент поглощения.

На основании (1) и (2) суммарный тепловой поток равен

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = \rho \left( W_x c_p \frac{\partial T}{\partial x} + c_v \Delta T \frac{\partial W_x}{\partial x} \right) - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{4}{3K_\lambda} \text{grad}E_x(1, \lambda).$$

Учитывая ряд допущений, и принимая  $K_\lambda = \text{const}$  в первом приближении, уравнение сохранения энергии при совместном переносе тепла теплопроводностью, излучением и конвекцией можно записать для оси  $x$

$$\begin{aligned} \rho c_v \frac{dT}{d\tau} = \rho \left( W_x c_p \frac{\partial T}{\partial x} + c_v \Delta T \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \\ - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{4}{3} \text{grad}E_x(1, \lambda) - \rho \text{div}W_x + \mu \Phi. \end{aligned} \quad (3)$$

Для оценки движения потока жидкости (газа) с учетом максимальных скоростей газов в печи используем уравнение Навье-Стокса для ламинарного движения, устанавливающего связь (равенство) между силами инерции и суммой сил тяжести, внешних сил и сил внутреннего трения в элементарном объеме жидкости для оси  $x$ . Примем

$$\begin{aligned} \frac{dW}{d\tau} &= \frac{\partial W_x}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_y}{\partial y} + W_z \frac{\partial W_z}{\partial z} = \\ &= g - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 W + \frac{1}{3} \text{grad } \text{div} W. \end{aligned} \quad (4)$$

При допущении, что физические параметры жидкости (газа) не зависят от температуры, последний член уравнения (4) будет равен нулю.

Для жидкостей (газов) уравнение сплошности можно написать следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{\partial (\rho W_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho W_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho W_z)}{\partial z} = 0.$$

Распределение изотерм внутри нагреваемого тела (металла) при коэффициенте температуропроводности  $a \neq \text{const}$  ищется по формуле

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda^2 T + \frac{d\lambda}{dT} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Для решения приведенной системы нужно добавить условия однозначности, выбор и величина которых зависят от условий протекания процесса и возможностей моделирования.

Таким образом, разграничивая критериальные зависимости внешнего и внутреннего подобия, с учетом (5) и специфики печей РКП, можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \Theta_{\Pi} = f_1(c, St, Bo, kl), \\ \Theta_{\Pi} = f_2(x, Fo, Sk, Bi, \Pi). \end{cases}$$

В общем виде

$$\Theta = \frac{T_{\Gamma} - T(x, y)}{T_{\Gamma} - T^0(x, y)} = f(c, St, Bo, kl, x, Fo, Sk, Bi, \Pi), \quad (6)$$

где  $T_r$  – температура газа в рабочем пространстве печи;  $T^0(x, y)$  – начальная температура газа;  $c$  – параметр, зависящий от условий сгорания (в частности, от коэффициента расхода воздуха);  $\Pi$  – критерий, учитывающий изменение теплофизических характеристик нагреваемого тела.

$$Bo = \frac{Wc_p \rho}{\delta T_*^3} = \frac{BQ_n}{F_p} \frac{1}{\delta T_*^3} \frac{Q_{\Pi} - \sum Vc_{yx} T_{yx}}{Q_{\Pi}},$$

где  $T_*$  – определяющая температура;  $Q_{\Pi}$  – полезное тепловыделение на единицу топлива;  $F_p$  – эффективная тепловоспринимающая поверхность заготовок на поду печи;  $c_{yx}, T_{yx}$  – теплоемкость и температура уходящих газов.

#### Библиографический список

1. **Воронова, Н.П.** Учет окалинообразования при расчете температурных полей в нагреваемых телах / Н.П. Воронова, С.А. Дрозд, А.Н. Козлов // Науч. и прикладные проблемы энергетики. – 1987. – Вып.14. – С. 86-87.
2. **Исаченко, В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.

*А.А. Карелин, студ.; И.А. Кирпиченков, студ.;  
рук. В.В. Сарока, к.т.н  
(БГТУ, г.Минск)*

## ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ С УЧЕТОМ НАЧАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ

При планировании осуществления диагностических работ, для некоторых технических систем распределение времени безотказной работы при износе, разрегулировании и ряде других случаев описывается плотностью вероятности  $g(t)$ , для которой характерно наличие начального периода с нулевым значением (рис. 1) [1,2].

Время, начиная с которого практически наблюдается появление отказов, назовем временем начала отказов (т<sub>но</sub>). Вне зависимости от того, какому закону подчиняется распределение отказов после т<sub>но</sub>, учет этого времени имеет существенное значение при проведении профилактических работ [3].

Оптимальное время проведения профилактических работ будем определять из условия оптимального значения коэффициента использования  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\partial_{\delta}}{\partial_{\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $T_r$  – среднее время безотказной работы;  $T_k$  – общее (календарное) время работы системы.

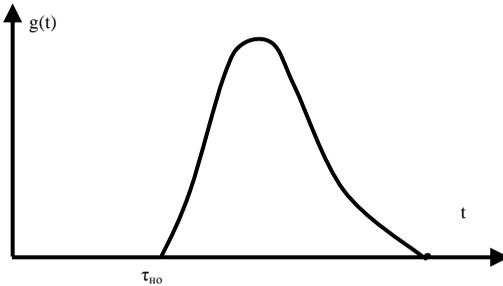


Рис. 1. Плотность вероятности  $g(t)$

В свою очередь,  $T_r$  определяется зависимостью

$$T_{\delta} = \int_0^{T_k - n\tau_{\phi}} P(\tau) d\tau \quad (2)$$

где  $n\tau_{\phi}$  – продолжительность профилактики;  $P(\tau)$  – вероятность безотказной работы в течение времени наработки системы  $\tau$ ;  $n$  – число циклов профилактики.

Вероятность безотказной работы с учетом времени отказов можно представить в области  $\tau \geq t_{но}$  разложением в ряд Тейлора относительно точки т<sub>но</sub>:



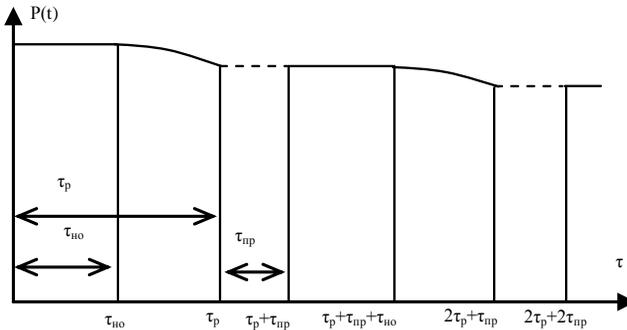


Рис. 2. график изменения вероятности безотказной работы

$$Q_n = \tau_{\text{н}} + \int_{\tau_{\text{н}}}^{\tau_{\text{д}}} [1 - a_1(\tau - \tau_{\text{н}}) - a_2(\tau - \tau_{\text{н}})^2 - \dots] d\tau \quad (7)$$

Многочлен (6) представляет собой сумму геометрической прогрессии и ее можно записать в виде

$$S_n = \frac{1 - P_1^n}{1 - P_1} = \frac{1 - (1 - z)^n}{z} \approx \frac{1 - e^{-nz}}{z}; \quad (8)$$

где 
$$z = 1 - P_1; \quad n = \frac{T_k}{\tau_{\text{д}} + \tau_{\text{ид}}}$$

В формуле (8) неизвестной является только величина z, которую можно выразить через разложение P1. Для большего увеличения точности членами разложения [3]

$$z = a_1(\tau - \tau_{\text{но}}) + a_2(\tau - \tau_{\text{но}})^2 + a_3(\tau - \tau_{\text{но}})^3 \quad (9)$$

Сделав подстановку формулы (9) в (8), получим выражение многочлена Sn в виде

$$S_n = \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_k [a_1(\tau_p - \tau_{\text{но}}) + a_2(\tau_p - \tau_{\text{но}})^2 + a_3(\tau_p - \tau_{\text{но}})^3]}{\tau_p + \tau_{\text{нр}}}\right)}{a_1(\tau_p - \tau_{\text{но}}) + a_2(\tau_p - \tau_{\text{но}})^2 + a_3(\tau_p - \tau_{\text{но}})^3} \quad (10)$$

Величина Qn с точностью до малых величин первого порядка может быть представлена соотношением

$$Q_n \approx \tau_{\delta} \quad (11)$$

Подставляя равенства (10) и (11) в (5), получим выражение среднего времени безотказной работы

$$T_{\delta} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_{\delta} [a_1(\tau_{\delta} - \tau_{ii}) + a_2(\tau_{\delta} - \tau_{ii})^2 + a_3(\tau_{\delta} - \tau_{ii})^3]}{\tau_{\delta} + \tau_{i\delta}}\right)}{a_1(\tau_{\delta} - \tau_{ii}) + a_2(\tau_{\delta} - \tau_{ii})^2 + a_3(\tau_{\delta} - \tau_{ii})^3} \tau_{\delta}, \quad (12)$$

а затем, введя значение  $T_{\delta}$  в формулу (1), установим равенство для коэффициента использования:

$$\eta = \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_{\delta} [a_1(\tau_{\delta} - \tau_{ii}) + a_2(\tau_{\delta} - \tau_{ii})^2 + a_3(\tau_{\delta} - \tau_{ii})^3]}{\tau_{\delta} + \tau_{i\delta}}\right)}{\partial_{\delta} [a_1(\tau_{\delta} - \tau_{ii}) + a_2(\tau_{\delta} - \tau_{ii})^2 + a_3(\tau_{\delta} - \tau_{ii})^3]} \tau_{\delta}, \quad (13)$$

Использование полученного коэффициента позволит решать задачи на определение оптимальной продолжительности профилактики при различных условиях работы системы.

#### Библиографический список

1. **Половко, А.М.** Основы теории надежности / А.М. Половко. М.: Наука, 1964.
2. **Демидов, Н.С.** Учет начального времени возникновения отказов при планировании профилактических работ / Н.С. Демидов – Надежность и эффективность дискретных систем. – Рига: Зинатне, 1968.
3. **Сарока, В. В.** Планирование профилактических работ с учетом начального времени возникновения отказов / В. В. Сарока, А. А. Карелин // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 17–18 мая 2012 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2012. – С. 150–152.

А.А. Каткова, студ.;

рук. С.А. Амелин, к.т.н., доц.

(Филиал ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)

## МОДЕЛЬ ДЖИЛСА-АТЕРТОНА МАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА В ПРОГРАММЕ MICRO-CAP 7

Современные интегрированные пакеты программ схемотехнического анализа ORCAD, DESIGN LAB, MICRO-CAP и др. позволяют моделировать гистерезисные свойства ферромагнитных сердечников при перемагничивании в переменном магнитном поле. Однако, информация о том, какая конкретно модель магнитного сердечника используется в программах серии MICRO-CAP в настоящее время отсутствует. Это затрудняет моделирование нелинейных катушек индуктивности с помощью указанного пакета программ.

Ссылки в [1] на модель SPICE Level 2 [2, 3] неправомерны хотя бы потому, что не совпадают списки параметров моделей. Так в модель MICRO-CAP входит параметр *ALPHA* (параметр эффективности поля — Mean Field Parameter), тогда как в модель PSPICE входит *PACK* — коэффициент заполнения сердечника обмоткой. Остальные параметры обеих моделей совпадают.

Моделирование поведения сердечников в MICRO-CAP и ORCAD с одинаковыми общими параметрами без учета отличающихся (*ALPHA=0*, *PACK=1*) приводило к настолько сильно отличающимся результатам, что не оставляло сомнений в том, что используемые модели различны.

Поиск сведений на эту тему показал, что существуют две разновидности классической модели Джилса-Атертона. Одна из них используется в программе SPICE и подробно описана в [2, 3].

Вторая, которая собственно и используется в программах семейства MICRO-CAP, вычисляется с использованием безгистерезисной кривой намагничивания  $M_A(H)$ , построенной на основе гиперболического котангенса:

$$M_A(H) = M_S \left[ \operatorname{cth} \left( \frac{H_E}{A} \right) - \frac{A}{H_E} \right], \quad H_E = H + ALPHA \cdot M_A, \quad (1)$$

где  $M_S$  — намагниченность насыщения, А/м;  $H$  — напряженность магнитного поля в сердечнике, А/м;  $A$  — параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания;  $H_E$  — эффективная напряженность магнитного поля в сердечнике, А/м; *ALPHA* — параметр эффективности

поля,  $K$  — постоянная необратимой деформации доменных границ,  $C$  — постоянная упругой деформации доменных границ,  $\delta$  — знак изменения напряженности магнитного поля  $H$ .

Указанная модель сложнее, чем модель [2, 3], поскольку на каждом шаге интегрирования дифференциального уравнения перемагничивания

$$\frac{d}{dH}[M(H)] = \frac{M_A(H) - M(H)}{K \cdot (1 + C)} \cdot \delta + \frac{C}{1 + C} \cdot \frac{d}{dH}[M_A(H)], \quad (2)$$

приходится решать нелинейное алгебраическое уравнение (1).

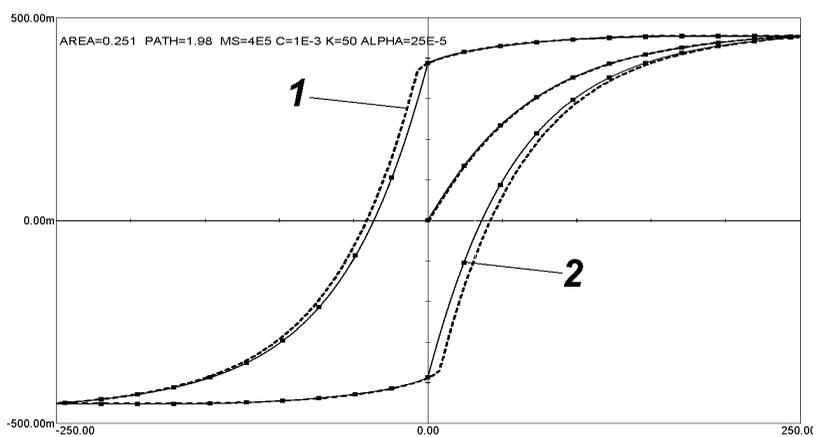
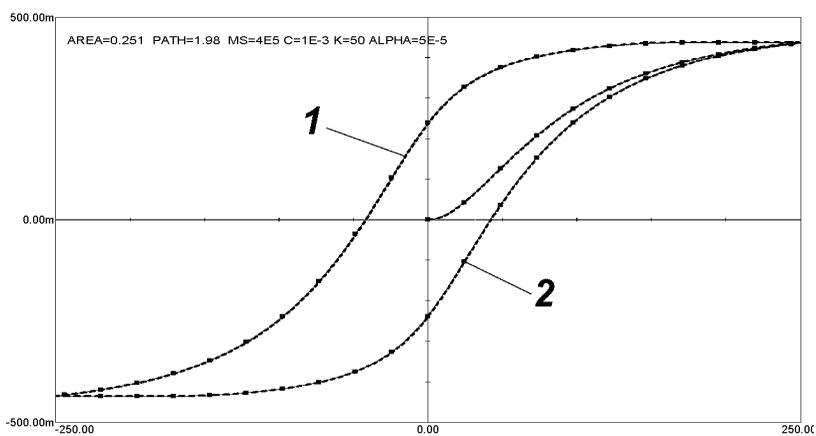
Автором проведена серия расчетов петель гистерезиса для сердечников с различными модельными параметрами с помощью уравнений (1) и (2) с использованием программы MATCHCAD и программы схемотехнического анализа MICRO-CAP 7. Результаты сравнительных расчетов представлены на рис. 1.

Результаты расчетов в большинстве случаев полностью совпадают. Небольшое расхождение петель при увеличении  $ALPHA$  (рис. 1), объясняется погрешностью выбранного численного метода решения алгебраического уравнения (1) на каждом шаге интегрирования дифференциального уравнения (2).

Таким образом, серия сравнительных расчетов подтвердила предположение о том, что в пакете программ схемотехнического анализа MICRO-CAP 7 используется разновидность модели Джилса-Атертона, в которой безгистерезисная кривая намагничивания строится согласно уравнению (1).

#### Библиографический список

1. [Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-CAP 7.](#) — М.: Горячая линия–Телеком, 2003.
2. [Новиков А.А., Амелин С.А.](#) Экспериментальное исследование параметров модели перемагничивания ферромагнетиков Джилса-Атертона // *Электричество*. 1995. №9. С. 46–51.
3. [Разевиг В.Д.](#) Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. — М.: «Солон», 2000.



**Рис.1 — Моделирование петли гистерезиса магнитного сердечника:  
1 — в среде MATHCAD по уравнениям (1) и (2); 2 — в среде программы  
MICROCAP-7**

*К.Г. Пульнова, студ.;  
рук. С.А. Амелин, к.т.н., доц.  
(Филиал ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

## **МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ ПРОГРАММЫ MICRO-CAP**

В настоящее время все чаще натурные испытания и макетирование разработанных устройств и объектов заменяются моделированием. Оценочным критерием при проведении схемотехнического моделирования устройств преобразовательной техники, в состав которых входят датчики тока, является соответствие результатов моделирования характеристикам и зависимостям реальных преобразователей.

Датчики тока на основе эффекта Холла находят широкое применения при измерения тока в определенной полосе частот. Как и от любых других измерительных устройств, от этих датчиков, требуется высокая точность результатов, что должно быть учтено при создании их моделей.

В настоящее время в библиотеках программы схемотехнического моделирования Micro-Cap [1] отсутствуют модели датчиков тока на основе эффекта Холла, что весьма ограничивает возможности моделирования некоторых устройств преобразовательной техники. Поэтому создание их макромоделей является актуальной задачей.

В данной работе рассмотрены результаты создания макромоделей датчика тока на основе эффекта Холла для программы схемотехнического моделирования Micro-Cap.

В интегральном исполнении серийно выпускаются датчики тока для измерения постоянных и переменных токов до 50А в диапазоне частот до 100 кГц.

Микросхема интегрального датчика тока ACS712 состоит из прецизионного линейного датчика Холла с малым напряжением смещения и медного проводника, проходящего у поверхности чипа и выполняющего роль сигнального пути для тока. Ток, протекающий через этот проводник, создает магнитное поле, воспринимаемое встроенным в кристалл элементом Холла.

Практически полезные свойства упрощенной структуры указанного датчика определяются тремя основными характеристиками: передаточной характеристикой; временной характеристикой;

частотной характеристикой (зависимостью коэффициента передачи от частоты).

В результате исследования работы микросхемы ACS712 была создана математическая модель, содержащая блоки для формирования линейной передаточной характеристики с заданным уровнем ограничения, блок формирования задержки распространения сигнала и инерционное звено, моделирующее выходной фильтр. В качестве исходных данных для построения модели и определения параметров блоков была использована техническая документация на микросхему.

Результаты расчетов с использованием построенной модели достаточно точно совпали с экспериментальными результатами, указанными производителем. При моделировании работы датчика суммарное время отклика составило 6 мкс (рис. 1), что соответствует паспортным данным на микросхему.

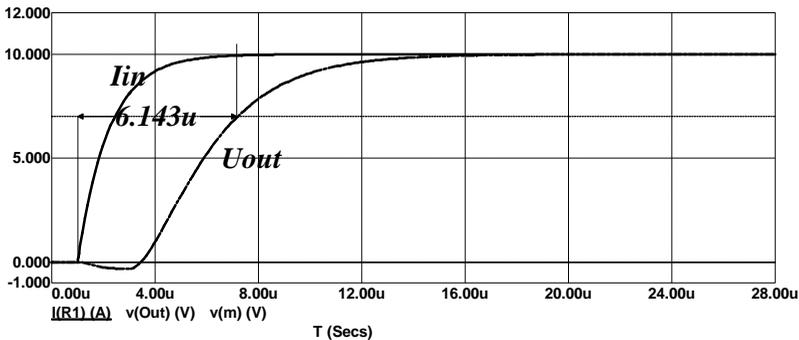


Рис. 1. Переходная характеристика модели датчика тока ACS712

При исследовании работы созданной модели полоса пропускания составила 80 кГц (рис. 2), что полностью соответствует техническим характеристикам, заявленным производителем.

Совпадение основных характеристик, полученных для рассмотренной модели, с экспериментальными данными, указанными производителем в технической документации, свидетельствует о том, что созданная модель адекватно отражает поведение датчика тока и пригодна для моделирования использующих такие датчики электронных устройств. Модель оформлена в виде макроса Micro-Cap и подсхемы Spice, что позволит применять её во всех программах схемотехнического анализа, использующих язык PSpice.

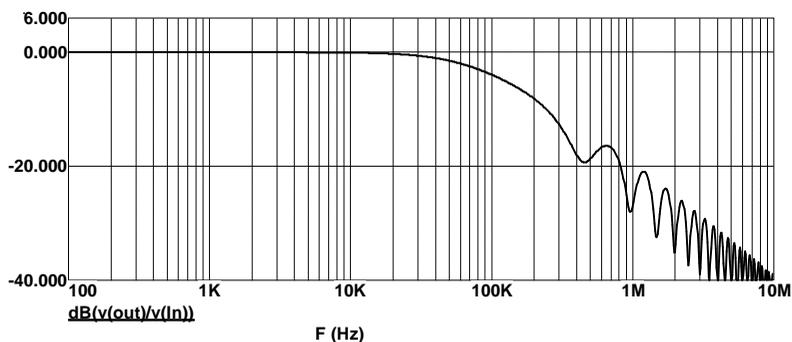


Рис. 2. Частотная характеристика модели датчика тока ACS712

#### Библиографический список

1. Амелина, М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М.А. Амелина, С.А. Амелин. — М. : Горячая линия-Телеком, 2007. — 464 с. : ил.

*А.В. Рыбин, студ.;*  
*рук. Г.Х. Мурзаханов, к.т.н., доц.*  
*(НИУ МЭИ, г. Москва)*

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЁТА ПЛОХООБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ НА ГРУБОЙ СЕТКЕ

Если целью гидро- аэродинамического расчёта обтекаемого тела является получение нагрузок для последующего прочностного расчёта, то многими факторами часто можно пренебречь в силу их малого влияния на суммарные нагрузки (например, переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный, шероховатость поверхности). Кроме того, как показывают расчёты, в большинстве случаев конечно-элементную (КЭ) сетку можно сильно разрядить, при этом приведённые ниже расчёты демонстрируют, что величины нагрузок в этом случае получаются завышенными, т.е. идущими в запас прочности.

Для плохообтекаемых тел заметное влияние на распределение давления играет положение точки отрыва. Несмотря на то, что зачастую отрывные процессы носят нестационарный характер, для прочностного расчёта важны средние во времени характеристики течения и задачу

можно решать в стационарной постановке. Для более точного предсказания точки возникновения обратного течения в пограничном слое и его отрыва, необходимо увеличивать толщину и число элементов пограничного слоя, использовать более точные модели турбулентности (например, SST вместо k-ε). На рис. 1 показано распределение скоростей в пограничном слое на обтекаемом цилиндре и чёрной стрелкой точка отрыва ( $M < 0.3$ ,  $Re_D \approx 10^6$ ).

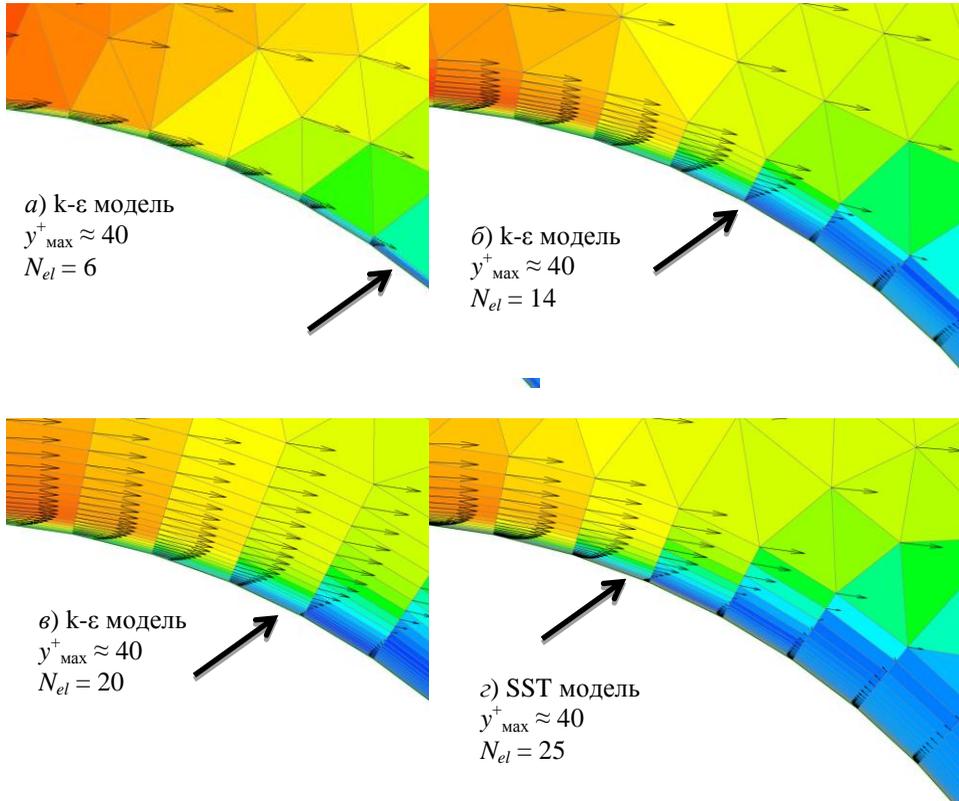


Рис. 1. Распределение скоростей в зоне отрыва на цилиндре при КЭ сетках пограничного слоя различной толщины

Более грубая сетка даёт заниженную точку отрыва, сильнее искривлённые линии тока и большее максимальное разрежение (см. рис. 3). Подобная закономерность так же установлена при расчёте шара и нескольких тел каплевидной формы (обтекателей). Из этого следует, что грубая КЭ сетка даёт завышенную величину разрежения, что идёт в запас прочности конструкции при проектировании.

Так же исследовалось влияние на положение точки отрыва и распределение давления густота окружающей обтекаемое тело КЭ сетки. На рис.4 показаны три расчётные модели, значительно отличающиеся друг от друга по количеству элементов. Сгущение КЭ сетки приводит к удлинению вихрей за телом, а так же к незначительному сдвигу вверх по потоку точки отрыва. Это в свою очередь ведёт к уменьшению искривлённости линий тока и, как следствие, к уменьшению разрежения. Таким образом, заглубленная КЭ сетки вокруг обтекаемого тела, даёт завышенные нагрузки (разряжение).

Результаты расчёта нагрузок, проведённого на грубой сетке, могут быть взяты, например, в качестве первого приближения для дальнейшего прочностного расчёта. Такой расчёт даёт для развивающихся на поверхности разряжений оценку сверху.

#### Библиографический список

1. **Pietro Catalano Meng Wang**, Gianluca Iaccario, Parviz Moin Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers [Статья] // International Journal of Heat and Fluid Flow. - 2003 г.. - 24. - стр. 463-469.

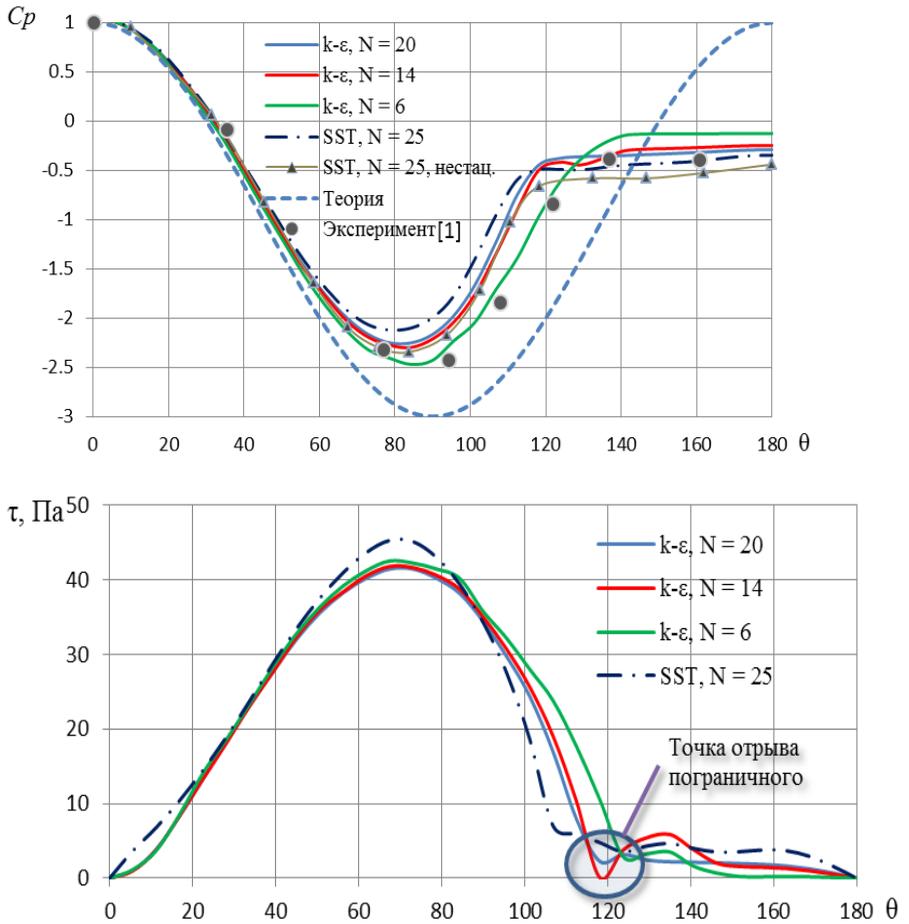


Рис. 2. Распределение коэффициента давления  $C_p$  и касательных напряжений  $\tau$  контуру цилиндра

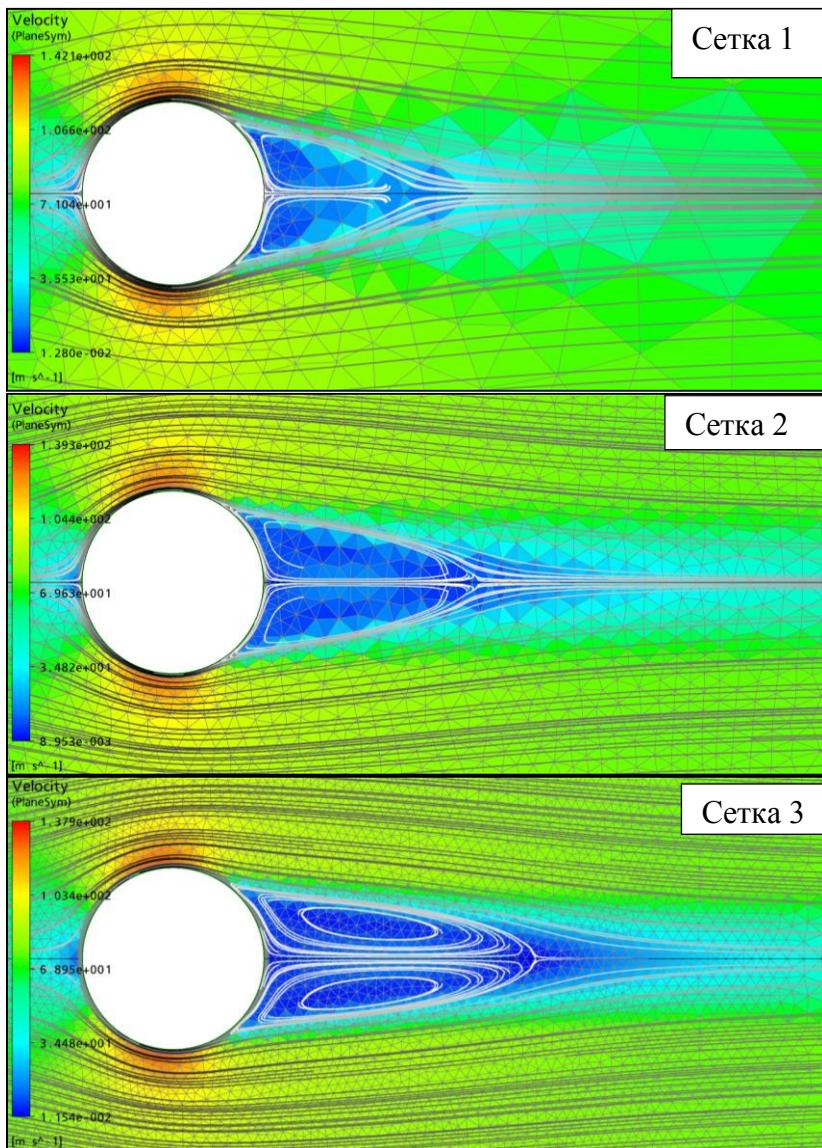


Рис. 3. Картина обтекания цилиндра при различной густоте КЭ сетки

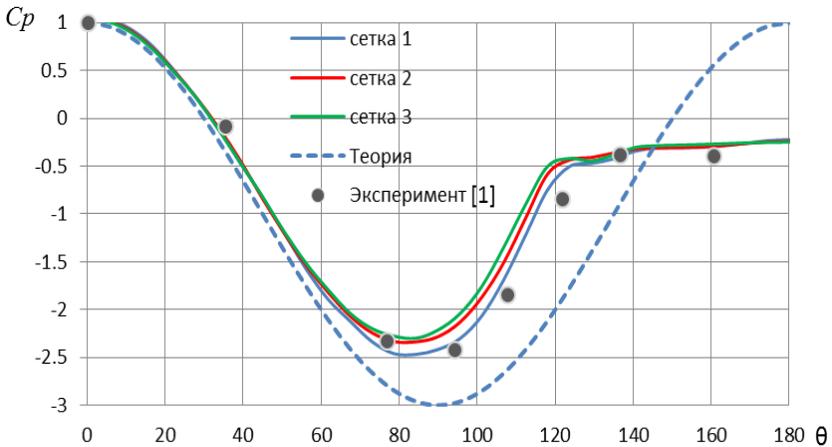


Рис. 4. Эпюры  $C_p$  по контуру цилиндра, полученные на КЭ сетках различной густоты

*А. П. Ягшыев, студ;*  
*Н. Н. Пустовалова, рук., к.т.н., доц.*  
*(БГТУ, г. Минск)*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Различное оборудование, выпускаемое многочисленными предприятиями, имеет значительный разброс технических параметров. Эффективность оборудования оценивается различными показателями. В работе предлагается способ определения показателя качества для комплексной оценки оборудования. Данный метод позволяет оценить преимущества и недостатки сравниваемого оборудования, дает возможность сделать обоснованный выбор нужных устройств.

Рассмотрим задачу выбора светильников с двумя люминесцентными лампами т. ЛБ-2х40Вт с пускорегулировочной аппаратурой.

В основу расчета кладется экспертная оценка качества оборудования. Эксперт выбирает оборудование наилучшего качества, значение которого принимается за 1,0. Оборудование среднего качества оценивается в 0,5; оборудование самого низкого качества – 0. Значения показателей качества для остальных образцов оцениваются в пределах между 1 и 0.

В технических данных характеристики оборудования приводятся в цифровых и буквенных обозначениях. Например, данные на осветительную аппаратуру имеют такие показатели, как класс по светораспределению (аппаратура прямого света – П, преимущественно прямого – Н, рассеянного – Р, преимущественно рассеянного – В, отраженного – О), кривые силы света, которая определяет ее форму (глубокая – Г, косинусная – Д, равномерная – М и т.д.)

Класс по светораспределению, показывающий характер распределения светового потока, определяет долю потока нижней полусферы от всего светового потока светильника –  $\Phi_0/\Phi$ , а основным признаком, определяющим тип кривой силы света – коэффициент формы кривой  $K_f$ , который равен отношению максимальной силы света светильника к средней арифметической для данной плоскости. В технических данных светильников эти параметры вводятся буквенными обозначениями, хотя им соответствуют и цифровые значения. При определении показателей качества эти данные должны вводиться в цифровом обозначении, а так как отношение  $\Phi_0/\Phi$  и  $K_f$  имеют максимальные и минимальные параметры, то это обстоятельство также должно учитываться.

Значения параметров шести образцов осветительной аппаратуры приведены в табл. 1.

Требуется определить функциональные зависимости, связывающие экспертные оценки и параметры светильников. Исследования показали, что наилучшую точность дает построение функций в виде полиномов второй степени вида  $y=ax^2+bx+c$ . С помощью опций среды Excel и разработанных программ на языке Visual Basic for Application определены коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Полученные функции:

$$y = 0,0003x^2 - 0,0215x + 0,8433$$

$$y = 0,0001x^2 - 0,0032x + 0,4002$$

$$y = 0,0523x^2 - 0,0549x + 0,4606$$

$$y = -0,005x^2 + 0,3110x + 0,1638$$

$$y = 6E-05x^2 + 0,0030x + 0,2430$$

*Секция 24. Динамика, прочность, вибродиагностика*

$$y = -7E-09x^2 + 0,0002x - 0,0659$$

$$y = 6,8035x^2 - 8,4645x + 2,9356$$

$$y = 0,0009x^2 - 0,0769x + 2,0218$$

$$y = 0,0010x^2 - 0,0059x + 0,3674$$

**Таблица 1. Значения параметров осветительной аппаратуры**

Параметры	Образцы аппаратуры					
	1	2	3	4	5	6
Класс по светораспределению – максимальное значение	40,0	40,0	60,0	80,0	88,0	90,0
Класс по светораспределению – минимальное значение	15,0	20,0	40,0	60,0	80,0	80,0
Показатель кривой света, Кф – максимальное значение	1,2	3,0	2,0	1,2	3,0	3,0
Показатель кривой света, Кф – минимальное значение	1,0	2,0	1,3	1,0	2,0	2,0
Защитный угол, град.	30,0	30,0	45,0	60,0	90,0	90,0
Габаритная яркость, кд	2000	2000	3000	3000	5000	5500
Коэффициент мощности с ПРА	0,5	0,6	0,83	0,83	0,93	0,93
Коэффициент полезного дей- ствия, %	45	57	60	63	60	70
Экономия электроэнергии, %	0	0	18	20	25	30
Экспертная оценка светильника	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9

Далее вычисляются значения функций для конкретных параметров и по формуле среднего геометрического рассчитываются показатели качества светильников (табл. 2).

**Таблица 2. Значения параметров и показатели качества**

Параметры	Значения параметров, вычисленные по найденным функциональным зависимостям					
	Образцы аппаратуры					
	1	2	3	4	5	6
Класс по светораспределению – макс. значение	0,461	0,467	0,633	1,045	1,273	1,338
Класс по светораспределению – миним. значение	0,374	0,376	0,432	0,568	0,784	0,784
Показатель кривой света, Кф – макс. значение	0,470	0,766	0,560	0,470	0,766	0,766
Показатель кривой света, Кф – миним. значение	0,470	0,766	0,559	0,470	0,766	0,766
Защитный угол, град.	0,387	0,387	0,499	0,639	0,999	0,999
Габаритная яркость, кд	0,306	0,306	0,471	0,471	0,759	0,822
Коэф. мощности с ПРА	0,404	0,306	0,596	0,596	0,947	0,947
Коэффициент полезного действия, %	0,383	0,562	0,647	0,749	0,647	1,048
Экономия электроэнергии, %	0,367	0,367	0,585	0,649	0,844	1,090
Показатель качества	0,399	0,450	0,549	0,608	0,849	0,935

Пусть нужно оценить выбранную осветительную аппаратуру, имеющую следующие показатели:

- класс по светораспределению, максимальное значение – 85, минимальное – 80;
- показатель кривой света, максимальное значение – 2,0, минимальное – 1,5;
- защитный угол, ° – 65;
- габаритная яркость – 3500;
- коэффициент мощности – 0,85;
- коэффициент полезного действия, % – 69;
- экономия электроэнергии, % – 20.

Подставив значения параметров в найденные функциональные зависимости, находим значения функций и показатель качества. Он равен 0,72. Выбранная аппаратура имеет достаточно высокое качество.

Таким образом, предложенный метод дает количественную оценку различным образцам осветительного оборудования по техническим параметрам. Использование при расчете компьютеров позволяет легко сопоставлять варианты замены одних устройств другими, т. е. профессионально решать вопросы о замене низкоэффективных образцов осветительного оборудования высокоэффективными, что поможет добиться максимальной экономии электрической энергии.

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Секция 20. Анализ и синтез систем электроприводов*

<i>Ушков А.С. Ограничение пускового тока в корректоре коэффициента мощности; Рук. Колганов А.Р.</i>	3
<i>Шишков К.С. Управление процессом формирования сновальных валов; рук. Глазунов В.Ф.</i>	5
<i>Щавелев А.В., Бурылин А.А.. Исследование применения расширений среды программирования matlab для управления мехатронными системами на основе процессора XTN; рук. Куленко М.С.</i>	7
<i>Фролов Д.А. разработка лабораторного практикума по дисциплине «Компьютерные технологии в математике и технических расчетах» рук. Лебедев К.С.</i>	9
<i>Дережков Р.А. Электропривод сегментных и донных затворов водосливной плотины; рук. Пруднов А.В.</i>	10
<i>Исаков А.А. программная оболочка управления испытательным стендом тяговых асинхронных электроприводов; рук. Чистосердов В.Л.</i>	14
<i>Пономарев Н.Ю., Романов Е.В. исследование характеристик стандартного распределения по биному ньютона; рук. Лебедев С.К.</i>	15
<i>Добротин С.А. к построению системы управления осевым накатом; рук. Глазунов В.Ф.</i>	17
<i>Малафеев Н.В., Суханов Н.В. электропривод регулирующей арматуры фирмы «АУМА»; рук. Ширяев А.Н.</i>	21
<i>Лебедев О.В. Частотно-регулируемый электропривод разрывной машины; рук. Ширяев А.Н.</i>	23
<i>Васильев С.М., Захаров М.А. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода; рук. Захаров А.М.</i>	25
<i>Сольхуа М.А. Автоматическое управление воздушной заслонкой; рук. Захаров А.М.</i>	28

<i>Балакирев И.А.</i> Разработка фильтров электромагнитной совместимости; <i>рук. Курнышев Б.С.</i> .....	30
<i>Дошлыгин А.В.</i> Исследование электромагнитной совместимости электроприводов; <i>рук. Курнышев Е.Д.</i> .....	31
<i>Дудов А.В.</i> Электропривод механизма поперечной подачи обрабатывающего центра преобразователем частоты серии ЭПВ; <i>рук. Соломаничев М.А.</i> .....	33
<i>Медведев К.С.</i> Регулируемый электропривод в схеме автоматизации влажности воздуха ткацкого цеха; <i>рук. Пруднов А.В.</i> .....	37
<i>Чернов А.А.</i> Электропривод вентилятора удаления стружки деревообрабатывающего цеха; <i>рук. Пруднов А.В.</i> .....	41
<i>Кочетков А.М.</i> Электропривод и автоматизация насосной станции; <i>рук. Пруднов А.В.</i> .....	46
<i>Пискунов С.М.</i> Автоматизация системы электроприводов сегментных и донных затворов; <i>рук. Пруднов А.В.</i> .....	50
<i>Каблуков А.В.</i> Пути совершенствования работы поточного оборудования Текстильной промышленности; <i>рук. Спичков Ю.П.</i> .....	54
<i>А.А. Копач</i> Асинхронный частотно-регулируемый электропривод механизма подачи металлорежущего станка; <i>рук. Спичков Ю.П.</i> .....	56
<i>Горчаков Д.В.</i> Бездатчиковое управление вентильным двигателем с использо- ванием интеграла сигнала противо-ЭДС; <i>рук. В.В. Льготчиков</i> .....	57
<i>Гуляев В.В.</i> Возможности оптимизации динамики систем электропривода с упругими связями; <i>рук. Саватеева И.С.</i> .....	62
<i>Карпенков С.Г., Макеева Д.С.</i> Разработка многофункциональной схемы активного выпрямителя для энергосберегающего электропривода; <i>рук. Рожков В.В.</i> .....	65

*Митрофаненков Ю.Н., Исаев Д.С.* Микропроцессорная система управления бездатчиковым вентильно-индукторным электроприводом; рук. *Малиновский А.Е.* .....70

*Страшинский М.П.* Многодвигательный электропривод по системе рабочего электрического вала; рук. *Барышников В.А.*.....74

### *Секция 21. Электромеханика и магнитожидкостные установки*

*Гук А.В.* Исследование и диагностика электрических машин на АЭС; рук. *Баловнев Д.И.* .....78

*Швецов Н.К.* Уточненный расчет дополнительных потерь в асинхронном двигателе при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения; рук. *Казаков Ю.Б.* .....80

*Балагуров И. А.* Торцевой вентильный электромеханический преобразователь с полым ротором; рук. *Казаков Ю.Б.*.....84

*Мартынов А.В.* Современные средства инженерных расчетов, используемые в трансформаторостроении; рук. *Тиханов А.И.*.....87

*Мартынов А.В.* Бесконтактный магнитоэлектрический генератор; рук. *Шишкин В.П.*.....91

*Сохин Д.Г.* Генераторы переменного тока для гибридного привода автобусов; рук. *Шишкин В.П.*.....95

*Перминова А.С.* исследование магнитного поля и удерживающей способности магнитожидкостного уплотнения немагнитного вала классического типа; рук. *Страдомский Ю.И.* .....96

*Малов В.Е.* Особенности проектирования асинхронных машин малой мощности; рук. *Громов А.К., Шишкин В.П.* .....100

*Балакирев И.А.* Моделирование конструкций индукционного датчика угла поворота; рук. *Морозов Н.А.* .....103

*Кондарёв К.М.* Проектирование асинхронного двигателя с водяным охлаждением; рук. *Караулов В.Н.* .....106

<i>Гусев П.М.</i> Моделирование процессов пуска однофазного асинхронного двигателя; <i>рук. Караулов В.Н.</i> .....	110
<i>Зиновьева И.А.</i> Моделирование двигателя постоянного тока в пространстве состояний; <i>рук. Шурыгин А.М.</i> .....	114
<i>Булатов Л.Н.</i> Создание подсистем САПР АД на базе доступных компонентов; <i>рук. Тихонов А.И.</i> .....	116
<i>Трофимович И.В.</i> Современные изоляционные материалы, используемые в трансформаторостроении; <i>рук. Тихонов А.И.</i> .....	120
<i>Мартынов Л.Д.</i> Энергоэффективный асинхронный двигатель для привода троллейбусов; <i>рук. Шишкин В.П.</i> .....	124
<i>Пайков И.А.</i> Разработка модели динамических режимов силовых трансформаторов; <i>рук. Тихонов А.И.</i> .....	130
<i>Романов С.Г.</i> Разработка подсистемы оптимизации силовых трансформаторов; <i>рук. Тихонов А.И.</i> .....	133
<i>Ерёмин И.В.</i> Методика оптимизации силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали; <i>рук. Тихонов А.И.</i> .....	138

*Секция 22. Микроэлектронные и микропроцессорные  
информационно-управляющие системы*

<i>Воробьев Н.М.</i> Автоматическая настройка термостата в стенде измерения фазового шума резонатора .....	142
<i>Ануфриев Д.Ю.</i> Многоосное управление перемещением на базе ПЛК OMRON; <i>рук. Терехов В.Г.</i> .....	145
<i>Губанов Е.С.</i> Управление микроклиматом в офисном помещении .....	146
<i>Муравьева А. А.</i> Дискретная система управления электроприводом подачи токарного станка .....	147
<i>Самаринский С.А.</i> Применение интерфейсов на основе LVDS в промышленных информационно-управляющих системах; <i>рук. Терехов А.И.</i> .....	149

<i>Семенов А.А.</i> Прямой цифровой синтез частоты и применение метода на практике; <i>рук. Капустин С.А.</i> .....	151
<i>Лобанова Е.</i> Синтез робастных систем управления электромеханическими объектами с наблюдателем состояния; <i>рук. Анисимов А.А.</i> .....	154
<i>Сибирцев М.А.</i> Микропроцессорная система управления силовым преобразователем на базе DSP (на примере системы возбуждения тягового генератора БелАЗ); <i>рук. Салахутдинов Н.В.</i> .....	156
<i>Тюрин А.Р.</i> Формирование заданных переходных процессов методом АКАР; <i>рук. Тютиков В.В.</i> .....	159
<i>Чёренькая А.С.</i> Исследование параметрических компенсационных импульсных преобразователей напряжения понижающего типа; <i>рук. Терехов А.И.</i> .....	163
<i>Швецов С.В.</i> Микропроцессорная система управления освещением .....	165
<i>Шмаров М.Ю.</i> Силовые преобразователи в энергоэффективном электроприводе карьерного экскаватора; <i>рук. Егоров В.Н.</i> .....	166
<i>Брунов А.Н.</i> Микропроцессорная система управления сбором информации о потреблении электроэнергии; <i>рук. Поздняков Л.С.</i> .....	170
<i>Абраменков А.Д.</i> Измерители технологических параметров на основе емкостных датчиков; <i>рук. Троицкий Ю.В.</i> .....	172
<i>Шумский А.Н., Русак А.Ю., Жарский А.В.</i> Оптимизация опорного сигнала синхронного детектирования; <i>рук. Оробей И.О.</i> .....	176

### Секция 23. Технология машиностроения

<i>Ильина Е.Э., Шильцев Е.С.</i> Сплавы с эффектом памяти формы; <i>рук. Третьякова Н.В.</i> .....	180
--	-----

<i>Зудова А.М.</i> Исследование влияния этапа создания пресс-форм на формообразование промышленного изделия; <i>рук. Волкова М.Ю.</i> .....	183
<i>Волкова Т.В.</i> Исследование влияния коэффициента усадки металлов при создании изделия; <i>рук. Волкова М.Ю.</i> .....	186
<i>Русакова А.В.</i> Исследование свойств гальванических покрытий при создании художественных изделий; <i>рук. Волкова М.Ю.</i> .....	190
<i>Журавлев Д.В., Хахалин А.С.</i> Анализ современных САД-систем с точки зрения пользователей; <i>рук. Копосов В.Н.</i> .....	193
<i>Курочкин А.Б.</i> Анализ способов изготовления изделий из металлических композиционных материалов; <i>рук. Третьякова Н.В.</i> .....	195
<i>Волкова Т.В.</i> Исследование технологии изготовления керамической формы на основе жидкого стекла для литья по выплавляемым моделям; <i>рук. Орлов А.С.</i> .....	198
<i>Соколов В.А., Садовников Ю.Н.</i> К вопросу устойчивости автоцистерн при перевозке опасных грузов; <i>рук. Смирнов В.В., Киселев В.В.</i> .....	201
<i>Смирнов Е.И.</i> Улучшение моторных масел, используемых в пожарной технике; <i>рук. Киселев В.В., А.В.Топоров, Пучков П.В.</i> .....	206
<i>Акулов А.Е.</i> Влияние низких температур на механические свойства конструкционных сталей; <i>рук. Пучков П.В., Топоров А.В., Киселёв В.В.</i> .....	209
<i>Смирнов М.В.</i> Исследование коррозионной стойкости деталей из стали 45; <i>рук. Полетаев В.А.</i> .....	212
<i>Хахалин А.С.</i> Дислокационные аспекты формирования качества поверхностного слоя; <i>рук. Полетаев В.А.</i> .....	214
<i>Власов В.А.</i> Особенности измерения температуры вращающихся частей электрических машин; <i>рук. Полетаев В.А.</i> .....	216

<i>Беляев А.Э.</i> Лазерное упрочнение алюминиевых сплавов; <i>рук. Ведерникова И.И.</i> .....	218
<i>Гулиев Т.Г.</i> Исследование структурно-механических свойств смазочного материала; <i>рук. Степанова Т.Ю.</i> .....	221
<i>Косоурова А.А.</i> Современные декоративные покрытия художественных изделий; <i>рук. Марков В.В.</i> .....	223
<i>Карпинский М.Н.</i> Влияние активированной СОТС на шероховатость обработанной поверхности; <i>рук. Киселева Е.В.</i> .....	225
<i>Булгачев Е.А.</i> Современные представления о формировании смазочного слоя; <i>рук. Киселева Е.В.</i> .....	228
<i>Булгачев Е.А.</i> Плазменное упрочнение металла; <i>рук И.И. Ведерникова</i> .....	233
<i>Карпинский М.Н.</i> Лазерное упрочнение режущего инструмента; <i>рук. Ведерникова И.И.</i> .....	236
<i>Спорягин А.С.</i> Исследование импульсно-фазового электропривода с бесколлекторным электродвигателем; <i>рук. Киселев А.А.</i> .....	238
<i>Хахалин А.С.</i> Технологические возможности современных станков; <i>рук. Птуха Л.И.</i> .....	242
<i>Носкова Т.А., Журавлев Д.В.</i> Способы описания рельефа; <i>рук Птуха Л.И.</i> .....	246

#### *Секция 24. Динамика, прочность, вибродиагностика*

<i>Круглов А.В.</i> Определение механических параметров нелинейно-упругого материала по результатам виброиспытаний консольного стержня .....	249
<i>Еремченко И.А.</i> Исследование физической модели мышечно-сухожильного комплекса голени человека; <i>рук. Ноздрин М.А.</i> .....	253
<i>Киселёв А.Ю.</i> Разработка лабораторного стенда по исследованию моделей трения; <i>рук. А.И. Муницын</i> .....	255

<i>Норовков П.О.</i> Расчёт собственных частот колебаний электродвигателей; <i>рук. Маслов Л.Б.</i> .....	256
<i>Попов С.С.</i> Статический анализ вибрации подшипников качения; <i>рук. Огурцов Ф.Б.</i> .....	258
<i>Рогозин А.А.</i> Вибромониторинг роторного электромеханического оборудования; <i>рук. Колобов А.Б.</i> .....	260
<i>Белов А.В.</i> Измерение механических характеристик кисти руки; <i>рук. Шапин В.И.</i> .....	263
<i>Дремченко А.В.</i> Экспериментальное исследование механических характеристик голени человека; <i>рук. Ноздрин М.А.</i> .....	266
<i>Горева К.С., Шаронова А.С.</i> Влияние вибрации на развитие растений; <i>рук. Шапин В.И.</i> .....	268
<i>Навдаев А.А.</i> Расчет деформации элемента автомобиля; <i>рук. Белов И.А.</i> .....	273
<i>Алешина А.П., Брик Е.Р.</i> Повышение качества фракционирования сыпучих материалов на виброгорхотах с пространственной траекторией движения СИТ; <i>рук. Огурцов В.А.</i> .....	275
<i>Фирсов Е.Н.</i> Деформации бруса открытого профиля; <i>рук. Ноздрин М.А.</i> .....	277
<i>Мальшиева А.Д., Софьина М.Э.</i> Исследование напряженного состояния в точке при растяжении пластины; <i>рук. Ноздрин М.А.</i> .....	278
<i>Фирсов Е.Н.</i> Деформации бруса открытого профиля; <i>рук. С.В. Вихрев</i> .....	281
<i>Попов С.С.</i> Исследование напряжений и перемещений двухпролётной конструкции балки; <i>рук Шапин В.И.</i> .....	283
<i>Норовков П.О.</i> Исследование перемещений в статически определимой раме; <i>рук. Шапин В.И.</i> .....	284
<i>Киселёв А.Ю.</i> Определение перемещений в статически неопределимой рамной конструкции; <i>рук. Шапин В.И.</i> .....	286

<i>Скрипов С.И.</i> Деформационный расчет элеронов самолета; <i>рук. Сабанеев Н. А.</i> .....	287
<i>Созонова О.А.</i> Исследование прочностных характеристик лопасти хвостового винта вертолёта; <i>рук. Ноздрин М.А.</i> .....	289
<i>Харькова А.В.</i> Расчет усталостной долговечности лопасти главного винта вертолета с применением системы ANSYS; <i>рук. Маслов Л.Б.</i> .....	291
<i>Рекутин Д. С.</i> Расчёт падения космического объекта на поверхность земли; <i>рук. Ноздрин М.А.</i> .....	294
<i>Привезенцев А.Е.</i> Исследования контакта шины и дорожного покрытия; <i>рук. Ноздрин М.А.</i> .....	298
<i>Чернова Е.О.</i> Прочностной расчёт опоры линии электропередач; <i>рук. Круглов А.В.</i> .....	300
<i>Сидоров Д.С.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния плоского ломаного бруса; <i>рук. Ноздрин М.А.</i> .....	301
<i>Волкова О.И., Лукин В.А.</i> Повышение прочности сосуда давления с локальным утонением стенки применением накладных элементов; <i>рук. Ризванов Р.Г.</i> .....	303

### *Секция 25. Математические методы в технике и технологиях*

<i>Балагуров И.А.</i> Новые подходы к организации механики перемешивания сыпучих материалов; <i>рук. Мизонов В.Е.</i> .....	307
<i>Костарев В.В.</i> Об одной задаче Стефана в моделировании влагопереноса; <i>рук. Мизонов В.Е.</i> .....	310
<i>Котов А.Б., Легков А.А. Груздева А.А.</i> Влияние линейного сопротивления на форму кривой наискорейшего спуска; <i>рук. Мизонов В.Е.</i> .....	313
<i>Рассолов С.Е., Волков М.Н., Троицкая Т.И.</i> Моделирование процессов в ветвящейся цепи Маркова; <i>рук. Мизонов В.Е.</i> .....	315

<i>Киселёв Г.Е.</i> Применение теории цепей Маркова к моделированию псевдооживления в аппарате непрерывного действия; <i>рук. Митрофанов А.В.</i> .....	317
<i>Кравале И.А., Метлов А.</i> Разработка виртуального лабораторного стенда «Исследование распространения световых волн в оптически однородных и неоднородных средах»; <i>рук. Митрофанов А.В.</i> .....	319
<i>Комов К.П., Малхасян А.В., Профьев М.В.</i> Влияние линейного сопротивления на свободные колебания системы с двумя степенями свободы; <i>рук. Мизонов В.Е.</i> .....	322
<i>Розанов Д.Ю., Макаров Д.Ю., Гембо Р.С.</i> Графическое построение некоторых конформных отображений; <i>рук. Мизонов В.Е.</i> .....	324
<i>Балакирев И.А., Ненаездников А.Ю.</i> Эволюция межфазной поверхности в барботируемом слое; <i>рук. Жуков В.П.</i> .....	327
<i>Кадилев В.Н., Перминова А.С.</i> Структурно-режимная оптимизация системы многоступенчатых теплообменных аппаратов; <i>рук. Жуков В.П.</i> .....	330
<i>Романов С.Г., Газимагомедова М.А.</i> Энтропийное моделирование кинетики измельчения; <i>рук. Жуков В.П.</i> .....	332
<i>Гусева А.С.</i> Расчет температурных полей в монолитной железобетонной конструкции; <i>рук. Огурцов А.В.</i> .....	334
<i>Доброхотов А.А.</i> Разработка и изготовление лабораторной установки с кипящим слоем; <i>рук. Огурцов А.В.</i> .....	336
<i>Лавринович Ст.С.</i> Расчет температурного поля в строительных конструкциях с помощью цепей Маркова; <i>рук. Огурцов А.В.</i> .....	337
<i>Бонокин Д.Д., Малинин Л.Е.</i> Рациональная загрузка компонентов в смеситель периодического действия; <i>рук. Баранцева Е.А.</i> .....	338

<i>Беляков М.А., Серов Р.А.</i> Оптимальное позиционирование по длине локализованной подачи сегрегирующего компонента в смеситель непрерывного действия; <i>рук. Баранцева Е.А</i> .....	340
<i>Грибкова С.М., Воронова Н.П.</i> Исследование некоторых аспектов аэродинамики печей; <i>рук. Березовский Н.И.</i> .....	344
<i>Карелин А.А., Кирпиченков И.А.</i> Особенности планирования профилактических работ с учетом начального времени возникновения отказов; <i>рук Сарока . В.В.</i> .....	348
<i>Каткова А.А.</i> Модель джилса-атертона магнитного сердечника в программе MICRO-CAP 7; <i>рук. Амелин С.А.</i> .....	353
<i>Пульнова К.Г.</i> Модель датчика тока для программы MICRO-CAP; <i>рук. С.А. Амелин</i> .....	356
<i>Рыбин А.В.</i> Возможности проведения численного расчёта плохообтекаемых тел на грубой сетке; <i>рук. Мурзаханов Г.Х.</i> .....	358
<i>Ягшыев А. П.</i> Использование математических методов для оценки электрооборудования; <i>рук. Коровкина Н.П., Пустовалова Н. Н.</i> .....	363

ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ  
РЕГИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И  
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ  
«ЭНЕРГИЯ – 2013»  
(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

*Печатается в авторской редакции*

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.  
Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л.  
Тираж 150 экз. Заказ №  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический  
университет им. В.И. Ленина»  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.