

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента по диссертационной работе Тихомировой Ирины Александровны «Разработка и исследование электромеханических систем со свойствами селективной инвариантности к колебаниям момента нагрузки», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы**

На отзыв представлены:

- диссертация общим объемом 122 страницы, включающая введение, 5 глав, заключение, список литературы из 90 наименований, 8 приложений; содержит 35 иллюстраций и 6 таблиц;
- автореферат диссертации на 22 страницах с характеристикой работы и кратким изложением содержания полученных результатов;
- список публикаций по теме диссертации, включающий 19 наименований, в том числе 5 – в рецензируемых журналах из списка ВАК и 4 патента на изобретения.

#### **1 Актуальность темы научных исследований**

Наиболее эффективные направления повышения производительности и качества выпускаемой продукции лежат на пути совершенствования электромеханических систем управления (ЭМСУ). Это требует разработки методологии синтеза оптимальных в некотором смысле замкнутых контуров регулирования выходных переменных – скорости и/или положения рабочих органов механизмов – с приданием системе свойств инвариантности по отношению к внешним воздействиям (задающим и возмущающим) и адаптации ЭМСУ к вариациям ее параметров.

В диссертационной работе рассматривается специфика функционирования ЭМСУ в условиях гармонических аддитивных воздействий на валу электропривода, обусловленных различными факторами, в частности, эксцентриситетом валов рабочей машины. При этом для поддержания требуемых показателей качества регулирования выходной переменной и, как следствие, повышения качества производимой продукции, требуется принятие специальных мер, подавляющих отрицательное воздействие периодических колебаний нагрузки на валу электропривода. Одним из наиболее эффективных методологических подходов к решению этой проблемы является придание замкнутым ЭМСУ свойств инвариантности. Автором представлено развитие такого подхода на класс селективно инвариантных ЭМСУ с несколькими вариантами структурных решений замкнутых контуров регулирования скорости электропривода – с регуляторами состояния электромеханического объекта, с наблюдающими устройствами при измерении только выходной переменной, с полиномиальными контурными регуляторами, а также с адаптацией рассматриваемых ЭМСУ к параметрам нагрузки на валу привода. Таким

образом, в диссертации Тихомировой И.А. рассматривается решение актуальной научной проблемы разработки (синтеза и анализа) селективно инвариантных ЭМСУ к вариациям момента нагрузки на валу.

## 2 Содержание диссертационной работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, показана связь с целевыми программами, дана общая характеристика работы.

**В первой главе** проводится анализ общих и частных требований к показателям качества ЭМСУ в зависимости от режима их работы (стабилизации, программного, следящего), специфики технологических процессов и конструктивных решений в передаче механического движения от вала электродвигателя к валу рабочего органа. Отмечается, что дефекты изготовления, погрешности сборки и монтажа рабочих валов и кинематических передач приводят, в частности, к эксцентриситету, что становится причиной появления гармонических возмущений момента нагрузки на валу привода. Показано, что повышение качества производимой продукции может и должно решаться увеличением точности формирования заданных скоростных режимов электроприводов механизмов технологических линий, что требует эффективного подавления средствами ЭМСУ возникающих периодических колебаний нагрузки. Определено, что наиболее перспективным подходом к достижению поставленной в работе цели повышения точности управления рабочими механизмами в условиях периодических колебаний нагрузки является селективно инвариантное управление. Рассмотрены основные пути развития селективно инвариантных ЭМСУ, базирующиеся на сочетании разных функционально-структурных принципов управления, на основе чего поставлены конкретные задачи исследований в последующих главах работы.

**Вторая глава** диссертации посвящена вопросам структурно-параметрического синтеза селективно инвариантных к нагрузке ЭМСУ на основе сочетания принципа внутренней модели гармонического возмущения (МВ), включаемой в устройство управления электропривода, с другими принципами теории управления, такими как структурно-параметрическая аппроксимация моделей, повышение робастных свойств, адаптация к изменению параметров и т.п. Предложено семь вариантов структур ЭМСУ с разными сочетаниями контурных полиномиальных регуляторов, предшествующих фильтров, регуляторов состояния и МВ, с применением принципов последовательной коррекции динамических свойств ЭМСУ и разделения управления на быструю и медленную компоненты. При этом в структуру МВ включены колебательное и интегрирующее звенья, что помимо селективной инвариантности за счет противофазной компенсации влияния нагрузки на скорость электропривода предполагает реализацию астатического регулирования по моменту нагрузки. Для повышения робастных свойств автором предложено в задачах синтеза ЭМСУ аппроксимировать модель электромеханического объекта линейным звеном второго порядка. Введена система оценки ка-

чества разработанных структурных решений ЭМСУ, представляющая собой несколько критериев качества управления и экспертные оценки результатов имитационного моделирования. Предложена методика сравнительного анализа и структурной оптимизации ЭМСУ по заданному комплексу основных и дополнительных критериев качества.

**Третья глава** диссертации посвящена развитию методологического подхода селективной инвариантности применительно к структурным вариантам МВ с колебательной и интегральной компонентами при их переносе из основного контура медленного движения в контур быстрого движения ЭМСУ. Это разделение модели возмущений позволило дать анализ еще восьми дополнительным структурным решениям селективно инвариантных ЭМСУ по предложенному комплексу показателей качества. Установлено, что применение принципа разделения модели возмущения позволяет достичь гораздо большего разнообразия значений показателей качества при существенном улучшении отработки возмущений по моменту нагрузки электродвигателя. Проведенные исследования показали также, что с увеличением порядка динамической составляющей МВ, вводимой в состав «быстрой» подсистемы, возрастает чувствительность ЭМСУ к влиянию факторов, не учтенных при ее синтезе, в частности к запаздыванию сигнала в силовом преобразователе. Делается вывод, что более предпочтительными являются те варианты ЭМСУ, в которых внутренняя подсистема содержит более простую интегральную составляющую МВ.

**В четвертой главе** решаются задачи адаптивной параметрической настройки управляющего устройства с МВ при изменении рабочих скоростей электропривода. Разработанный способ адаптивной компенсации влияния гармонических колебаний момента нагрузки в ЭМСУ предполагает одновременную коррекцию коэффициентов регулятора с внутренней МВ и внеконтурного формирователя в соответствии с изменениями угловой скорости рабочего органа. Предложенный способ адаптивной компенсации влияния гармонических возмущений носит универсальный характер и может быть применен ко всем синтезированным структурам селективно инвариантных ЭМСУ. Делается вывод, что с применением адаптивной перенастройки параметров МВ будет достигнута эффективная отработка не только синусоидальных, но и сложных несинусоидальных периодических возмущений с широким спектром гармоник.

**Пятая глава** диссертации посвящена комплексным экспериментальным исследованиям различных вариантов селективно-инвариантных мехатронных систем на основе применения принципов физического моделирования ЭМСУ в реальном масштабе времени. Практическая реализация и экспериментальные исследования разработанных ЭМСУ проводились на базе лабораторного стенда с использованием технологии быстрого прототипирования (Rapid Control Prototyping (RCP)), реальных компонентов электропривода, а также микропроцессорного контроллера и управляющей ЭВМ. Гармоническое возмущение на валу двигателя имитировалось с помощью установленного механического эксцентрика, что позволило изменением взаимного расположения и веса дополнительных элементов эксцентрика влиять как на амплитуду гармонических составляющих момента

нагрузки, так и на состав гармоник. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие теоретические положения.

### **3 Основные научные результаты и их новизна**

К наиболее значимым научным результатам диссертационной работы Тихомировой И.А. следует отнести следующее:

1. Разработаны новые решения задачи синтеза селективно инвариантных ЭМСУ, основанные на включении в устройство управления электропривода внутренней модели гармонического возмущения (МВ) и содержащие аналитические процедуры расчета параметров регуляторов на основе векторно-матричного аппарата. Оригинальное комбинирование принципа селективной инвариантности с принципами структурно-параметрической аппроксимации моделей, каскадного, полиномиального регулирования и регулирования по состоянию, а также разделения темпов движения МВ на отдельные составляющие с их перемещением в контуры «быстрых» и «медленных» подсистем позволило получить многообразие вариантов структур и выделить наиболее эффективные из них для компенсации колебаний момента нагрузки.

2. Предложен комплекс определяющих показателей качества функционирования селективно инвариантных ЭМСУ и разработана оригинальная методика сравнительной экспертной оценки полученных структурных реализаций, позволяющая выявить их характерные достоинства и недостатки при использовании того или иного сочетания принципов построения систем и облегчающая проектировщику выбор наиболее эффективного структурного решения для конкретной области практического применения электропривода.

3. Предложен универсальный способ адаптивной параметрической настройки управляющего устройства с моделью возмущения в соответствии с изменениями рабочих скоростей электропривода, обеспечивающий компенсацию влияния гармонических колебаний момента нагрузки во всем скоростном диапазоне, а также эффективную отработку полигармонических возмущений с широким спектром гармоник.

Новизна основных научных результатов работы подтверждена 4-мя патентами на изобретения.

### **4 Практическая значимость результатов работы**

Практическая ценность работы, на наш взгляд, состоит в следующем:

1. Разработанные структурные и аналитические модели селективно инвариантных ЭМСУ позволяют проводить их всесторонние компьютерные исследования и могут найти применение на стадиях предпроектных НИР.

2. Разработанная комплексная система оценок определяющих показателей качества селективно инвариантных ЭМСУ позволяет дать практические рекомендации по выбору оптимального структурного решения в конкретных практических применениях электропривода в промышленности.

3. Аппаратно-программная реализация компьютеризированного стенда может стать практической основой для комплексных экспериментальных исследований ЭМСУ в учебных и научно-исследовательских целях.

### **5 Апробация и публикации**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на нескольких Международных и Всероссийских научно-технических конференциях, а также научных семинарах различного ранга. По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, получено 4 патента. Все это свидетельствует о достаточной для кандидатской диссертации публичной презентации результатов исследований.

### **6 Замечания и вопросы для дискуссии**

1. Для сравнительного анализа эффективности различных структур селективно-инвариантных ЭМСУ использована линеаризованная модель объекта в виде силового модуля «Управляемый полупроводниковый выпрямитель – двигатель постоянного тока» (с. 26). Это модель 3-го порядка, причем в целях повышения робастных свойств автором принято решение об аппроксимации силового преобразователя безынерционным звеном. Такое решение представляется не самым удачным, поскольку, во-первых, не позволяет реализовать ограничение тока двигателя в системах с безынерционным регулятором состояния (рис. 1.7,б) и с полиномиальным контурным регулятором (рис. 1.7,в), во-вторых, не учитывает инерционные свойства преобразователя, которые неизбежно проявят себя при включении его в контур «быстрой подсистемы». В этом смысле целесообразно его включить в замкнутый контур регулирования тока, что снимало бы сразу обе проблемы – ограничения тока на допустимом уровне и косвенного учета инерционности самого преобразователя. При этом замкнутый контур тока (момента) современных мехатронных систем очень быстродействующий и может быть аппроксимирован апериодическим звеном с ничтожно малой постоянной времени. Почему такой структурный вариант ЭМСУ рассмотрен только применительно к каскадному регулированию?

2. В диссертационной работе рассматривается оригинальная методика сравнительной оценки эффективности разработанных структур селективно инвариантных ЭМСУ, базирующаяся на заданном множестве неких оценок факторов качества по пятибалльной шкале (с. 52–56), таких как оценка реакции систем на введение помехи в цепи измерителя скорости, оценка степени сложности регулятора, допустимого диапазона изменения момента инерции и др. Что легло в основу выбора именно этого перечня оценок для селективно-инвариантных по отношению к нагрузке ЭМСУ, а не применение традиционных интегральных или среднеквадратичных оценок точности стабилизации скорости/положения рабочего органа при колебаниях момента нагрузки?

3. Что легло в основу выбора быстродействия 7 миллисекунд «быстрого» контура, причем именно в 5–7 раз большее, чем заданное быстродействие 50 миллисекунд «медленного» внешнего контура (с. 47)? Ориентировались ли на сто-

ронние исследования, реально достижимые экспериментальные показатели для конкретного контура регулирования или эта оценка получена в результате расчета, моделирования?

4. Впечатляют численные значения коэффициентов некоторых полиномов синтезированных регуляторов, например на с. 33. Действительно ли надо удерживать столько значащих цифр, и не целесообразна ли редукция порядка таких полиномов с учетом отличия их коэффициентов на несколько порядков?

Указанные замечания ни в коей мере не снижают уровень научной значимости теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в диссертации. Целесообразно дальнейшее развитие данного направления исследований, в частности, для класса инвариантных систем управления не только по отношению к нагрузке на валу в системах стабилизации, но и по отношению к задающему воздействию программных и следящих ЭМСУ.

### 7 Общее заключение по диссертации

С учетом представленной аналитической оценки можно сделать вывод: диссертационная работа Тихомировой Ирины Александровны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, обеспечивающих селективную инвариантность электромеханических систем управления к вариациям момента нагрузки.

Автореферат диссертации в полной мере освещает тематику диссертации, написан понятным и грамотным языком, материал изложен в логической последовательности, выводы хорошо аргументированы.

Тема диссертации соответствует специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК России и заслуживает положительной оценки, а ее автор Тихомирова Ирина Александровна достойна присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент доктор технических наук, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации (МСА) Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), 614990, Пермский Край, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29  
Тел: +7 (342) 2391821  
E-mail: [kvp.pnpu@mail.ru](mailto:kvp.pnpu@mail.ru)

Казанцев  
Владимир Петрович

Подпись Казанцева В.П. заверяю

*6 июля 2018г.*

Зам. начальника УК  
Н.В. Колчина