

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени В.И. Ленина»



На правах рукописи

ТИХОМИРОВА Ирина Александровна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ СО СВОЙСТВАМИ СЕЛЕКТИВНОЙ
ИНВАРИАНТНОСТИ К КОЛЕБАНИЯМ МОМЕНТА НАГРУЗКИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., проф. Тарарыкин С. В.

Иваново – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	7
Введение	8
Глава 1. Анализ возможностей и перспектив развития селективно-инвариантных электромеханических систем.....	17
1.1 Роль электромеханических систем в решении задач автоматизации технологических процессов. Требования к ЭМС	17
1.2. Особенности построения механической части электроприводов. Проблематика колебаний момента нагрузки.....	20
1.3. Оценка возможностей типовых ЭМС в отработке гармонического возмущения момента нагрузки	25
1.4. Анализ эффективности селективно-инвариантных ЭМС.....	31
1.5. Основные пути развития селективно-инвариантных ЭМС. Определение направлений исследований	39
Выводы	41
Глава 2. Структурно-параметрический синтез и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с объединенной моделью возмущения.....	43
2.1. Особенности построения и расчета управляющих устройств селективно-инвариантных ЭМС.....	44
2.2. Исследование возможностей и структурная оптимизация селективно-инвариантных ЭМС.....	51
2.3. Модификация разработанных вариантов селективно-инвариантных ЭМС	56
Выводы	59

Глава 3. Структурно-параметрический синтез и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с распределенной моделью возмущения.....	61
3.1. Особенности построения и расчета управляющих устройств	62
3.1.1. Перенос интегральной составляющей модели возмущения в «быструю» внутреннюю подсистему ЭМС	62
3.1.2. Перенос колебательной составляющей модели возмущения в «быструю» внутреннюю подсистему ЭМС	69
3.2. Сравнительный анализ показателей качества и структурная оптимизация систем с распределенными моделями возмущения	70
3.3. Модификация разработанных вариантов селективно-инвариантных ЭМС	75
3.4. Сравнительный частотно-временной анализ разработанных вариантов систем.....	78
Выводы	83
Глава 4. Разработка и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с адаптацией управляющих устройств к вариациям рабочей скорости.....	84
4.1. Оценка возможностей разработанных систем при работе в широком диапазоне скоростей.....	84
4.2. Особенности построения адаптивных управляющих устройств с моделью возмущения.....	86
Выводы	90
Глава 5. Практическая реализация и экспериментальные исследования селективно-инвариантных электромеханических систем.....	92
5.1. Разработка экспериментального стенда для исследования селективно-инвариантных ЭМС	93
5.2. Экспериментальные исследования и оценка эффективности селективно-инвариантных ЭМС.....	97

Выводы	101
Заключение	103
Список литературы.....	105
Приложения:	
Приложение 1	115
Приложение 2	116
Приложение 3	117
Приложение 4	118
Приложение 5	119
Приложение 6	119
Приложение 7	121
Приложение 8	1212

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A** – матрица состояния математической модели объекта управления в системе реальных координат
- B** – матрица входа объекта в той же форме
- C** – матрица выхода объекта в той же форме
- \bar{K}** – матрица обратных связей в канонической форме управляемости
- \bar{U}, U** – матрицы управляемости объекта в канонической форме управляемости и в реальных координатах соответственно
- X** – вектор переменных состояния
- $A(s)$** – характеристический полином модели объекта
- $B(s)$** – полином воздействия модели объекта
- $D(s)$** – желаемый характеристический полином (характеристический полином замкнутой системы)
- $E(s)$** – характеристический полином внеконтурного префильтра
- $G(s)$** – полином, формирующий математическую модель гармонической составляющей возмущения
- $N_{\text{рег}}$** – суммарный порядок динамических звеньев регуляторов
- $H_{\text{ОУ}}$** – передаточная функция модели объекта
- $P(s)$** – характеристический полином внутренней подсистемы
- $Q(s)$** – полином воздействия передаточной функции внутренней подсистемы
- $V(s)$** – вспомогательный полином, обеспечивающий техническую реализуемость регулятора
- a_i** – коэффициенты полинома $A(s)$
- b_i** – коэффициенты полинома $B(s)$
- i** – передаточное отношение редуктора
- s** – комплексная переменная Лапласа
- U_y** – управляющее воздействие на объект

- M_0 – постоянная составляющая момента
- M_1 – амплитуда колебаний момента
- Ω_0 – среднегеометрический корень полинома $D(s)$
- ω_1 – частота вращения рабочего органа
- Ω_3, Ω – заданное и действительное значения частоты вращения электродвигателя

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

КФН	– каноническая форма наблюдаемости
МВ	– модель возмущения
МУ	– модальное управление
ОС	– обратная связь
ОУ	– объект управления
ПР	– полиномиальный регулятор
ПФ	– передаточная функция
РД	– разделение движения
РМВ	– разделение модели возмущения
РО	– рабочий орган
РС	– регулятор состояния
РСК	– регулятор скорости
РТ	– регулятор тока
САУ	– система автоматического управления
СИ ЭМС	– селективно-инвариантная электромеханическая система
СП	– силовой преобразователь
ХП	– характеристический полином
ЭД	– электродвигатель
ЭМС	– электромеханическая система
ЭП	– электропривод

Введение

Современные тенденции развития машиностроения направлены на применение индивидуальных приводных устройств технологических машин широкого спектра действия в различных отраслях промышленности, а также взаимосвязанных электроприводов (ЭП), содержащих два или несколько электрически или механически связанных между собой индивидуальных электропривода; на усложнение выполняемых ими функций [5, 10, 24, 37, 46].

Электроприводы постоянного и переменного тока образуют в совокупности с рабочими органами машин электромеханические системы (ЭМС), которые входят как наиболее важные составляющие в такие технологические объекты, как металлорежущие станки, бумагоделательные машины, агрегаты и поточные линии текстильной промышленности, прокатные станы металлургического производства; линии по производству полимерных пленок, химических волокон; механизмы непрерывной подачи, перемещения и наматывания материалов при осуществлении процессов вытягивания, кручения, резания и т.п. [1, 2, 5, 6, 8, 14, 15, 23, 27, 35, 48 – 50, 65, 66, 71 – 73].

Благодаря применению индивидуальных электроприводов удается достичь существенного упрощения или полного исключения кинематических передач между электродвигателем (ЭД) и главным рабочим органом и, тем самым, существенно снизить габариты и повысить точность работы машин.

При этом рабочий орган, сохраняющий значительные габаритные размеры, становится главным элементом механической части ЭМС.

Движение рабочего органа в совокупности с его конструктивными особенностями и дефектами изготовления оказывает влияние на момент нагрузки двигателя, вызывая появление гармонических колебаний и, как следствие, неравномерность движения, которая снижает точность выполнения операций технологического процесса.

Электроприводы, работающие с колебательной нагрузкой на валу, как любые механические устройства, более подвержены износу при эксплуатации в условиях вибрации вала. Такой неблагоприятный режим работы может

привести к значительному снижению качественных показателей систем автоматического управления скоростными режимами технологических установок, ухудшению точности изготовления деталей при металлообработке, вызвать отклонения геометрических размеров длинномерных материалов при обработке в поточных линиях (диаметр волокна, толщина пленки и различных покрытий), снизить светопропускание оптических световодов и т.п. [20, 28, 30, 51, 81].

Повторяемость размеров деталей и качество их обработки, стабильность диаметра волокна, создание необходимого натяжения, вытяжки, точность позиционирования в значительной мере зависят от постоянства скорости электроприводов технологических машин.

Электроприводы секций, являющиеся в зависимости от технологии и свойств обрабатываемого материала ведущими на определенном участке поточной линии, допускают погрешности согласования скоростей от 1,0% в устройствах по производству транспортных лент и автокамерных заготовок [25] до 0,05% в меловальных машинах и агрегатах для нанесения покрытий на пленки [25, 28, 72, 73].

При производстве оптического волокна для выдержки заданных температурно-скоростных режимов формирования приводные устройства, подающие расплав и принимающие волокно, должны обеспечивать точную стабилизацию частот вращения исполнительных механизмов с погрешностью не более 0,5% [54]. Для бумагоделательного оборудования [5, 8, 43, 73] и экструзионных линий по производству синтетических пленок [24, 25] относительная погрешность стабилизации скоростей не должна превышать (0,2..0,5)%.

Для обеспечения минимальных флуктуаций диаметра оптического волокна и снижения потерь рассеяния приводные устройства должны иметь высокую стабильность рабочих скоростей с коэффициентом неравномерности на уровне (1..2)% [54].

Кроме того, современные ЭП требуют больших диапазонов регулирования скорости. Для приводов подачи стола и фрезерных головок продольно-фрезерных станков диапазон регулирования скорости составляет (40..60):1, в тяжелых токарных станках он достигает значений (100...200):1. В общем случае полный диапазон регулирования скорости в станках фрезерной, расточной и токарной групп может возрастать до 10000:1 [3, 6, 37, 53].

Таким образом, обеспечение требуемого качества работы электропривода в широком диапазоне изменения скоростей при условии действия на объект внешних гармонических возмущений является одной из основных проблем современных ЭМС.

В настоящее время разработано много методов и подходов к решению задачи компенсации внешних возмущений. Очевидно, что уменьшить влияние флуктуаций момента нагрузки можно путем повышения быстродействия (динамической точности) систем регулирования скорости, которые могут строиться как на принципах подчиненного регулирования координат [69], так и на основе использования безынерционных регуляторов состояния (РС) или динамических (полиномиальных) регуляторов (ПР) «входа-выхода» [13]. Однако значительное снижение уровня пульсаций скорости путем повышения коэффициента петлевого усиления следящей ЭМС может привести к существенному ухудшению качества отработки управляющего воздействия или повышению токовых форсировок и соответствующему сокращению размеров линейной зоны работы системы [30].

Используется метод вспомогательного контура, в котором выделяется сигнал, несущий информацию о внешних и параметрических возмущениях, позволяющий получить требуемые оценки и, соответственно, скомпенсировать нежелательное воздействие на регулируемые параметры [67, 68]. В [7] предлагается сначала проводить идентификацию внешнего гармонического возмущения, а затем уже синтезировать алгоритм управления. Однако применение этих методов требует априорной информации о параметрах возмущений, что не всегда представляется возможным.

Наиболее рациональным способом решения поставленной проблемы является применение принципа инвариантности систем управления к внешним возмущениям. Впервые на возможность создания системы регулирования, инвариантной к внешним возмущениям, было указано Г.В. Щипановым [76]. Позднее в работах В.С. Кулебакина [34, 35] теория инвариантности распространяется на процессы управления, которые обладают нечувствительностью к возмущениям параметров математической модели системы (параметрической или селективной инвариантностью).

Значительный вклад в развитие данной теории внесли также научные работы Н.Н. Лузина, П. И. Кузнецова, Б.П. Петрова, А.Ю. Ишлинского, В.А. Якубовича, А.И. Кухтенко, В.В. Величко, А.Р. Гайдука Г.К. Гудвина, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо, Б. Р. Андриевского, А. Фрэнсиса, М. Уонема, Л.И. Розоноэра и других ученых.

Несмотря на очевидные достоинства традиционных селективно-инвариантных систем, степень достижения основного показателя ЭМС – качества отработки возмущения по моменту нагрузки ЭД в широком скоростном диапазоне, а также уровень сложности регуляторов, помехоустойчивость и чувствительность к вариациям внутренних параметров в известных структурных решениях могут не удовлетворить проектировщика.

В соответствии с изложенным выше **целью** данной диссертации является повышение точности управления органами движения технологических машин и улучшение качества выпускаемого продукта в условиях влияния возмущений путем совершенствования структур селективно-инвариантных ЭМС и разработки эффективных методов их параметрического синтеза.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **основных задач**:

1. Анализ потенциальных возможностей, определение перспектив и направлений развития селективно-инвариантных ЭМС в отношении отработки доминирующих возмущений и улучшения основных показателей качества.

2. Разработка новых структурных решений, расширение функциональных возможностей и сравнительные исследования селективно-инвариантных ЭМС с различными схемами компоновки внутренней модели возмущений.

3. Разработка методов оперативного автоматизированного расчета управляющих устройств в новых структурных реализациях селективно-инвариантных ЭМС, а также их сравнительные оценки по комплексу определяющих показателей качества.

4. Разработка и реализация принципов адаптивного управления селективно-инвариантных ЭМС, предназначенных для работы в широком скоростном диапазоне.

5. Практическая реализация и экспериментальные исследования ЭМС со свойствами селективной инвариантности к возмущениям момента нагрузки.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе используются методы пространства состояний ТАУ, аппарат теории матриц и передаточных функций, методы модального управления, редуцирования регуляторов и принципы селективной инвариантности. Исследование САУ электромеханическими системами проводится методами вычислительного эксперимента на ЭВМ, а также методами физического моделирования на экспериментальном лабораторном оборудовании.

Научная новизна работы определяется разработкой и реализацией новых подходов к решению проблемы компенсации внешних возмущений по моменту нагрузки ЭД и оптимизации работы системы по выработанному комплексу показателей качества.

1. Разработаны новые структурные решения астатических СИ ЭМС, отличительной особенностью которых является сочетание принципа внутренней модели гармонического возмущения с другими принципами ТАУ – разделением темпов движения, регулированием состояния, полиномиальным регулированием по выходу, подчиненным регулированием с последовательной коррекцией, каскадным регулированием, разделением модели возмущения на отдельные составляющие в контурах управления. Эти разработки позволяют

существенно расширить возможности систем в отработке возмущений и в достижении комплекса основных показателей качества.

2. Разработаны процедуры автоматизированного расчета параметров управляющих устройств для новых структур СИ ЭМС, основанные на объединении методов параметрического синтеза безынерционных и динамических регуляторов состояния и «входа-выхода» с методами синтеза каскадных регуляторов и подчиненного регулирования координат, а также на применении метода редуцирования регуляторов путем их структурного представления в канонической форме наблюдаемости. Эти процедуры позволяют существенно облегчить и ускорить определение параметров устройств управления объектами высокого порядка.

3. Разработана методика сравнительной оценки полученных структурных реализаций селективно-инвариантных ЭМС по комплексу определяющих показателей качества, 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.

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

Практическая ценность работы определяется следующим:

1. Разработаны вычислительные модели ЭМС, позволяющие проводить их всесторонние компьютерные исследования на ранних стадиях проектирования.

2. Разработана комплексная система оценок определяющих показателей качества разработанных селективно-инвариантных ЭМС, позволяющая выбрать

оптимальное структурное решение по заданной схеме компромиссов в конкретных практических применениях.

3. Выполнена аппаратно-программная реализация экспериментального компьютеризированного стенда, позволяющего реализовать комплексные исследования электромеханических систем управления и выполнить всестороннюю оценку их показателей качества.

На защиту выносятся разработанные методы структурно-параметрического синтеза астатических селективно-инвариантных ЭМС, результаты их исследования и практической реализации.

Работа соответствует **формуле специальности 05.09.03** – «Электротехнические комплексы и системы» и ее **области исследований**, поскольку отражает вопросы математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем, включая разработку, структурный и параметрический синтез алгоритмов эффективного управления электромеханическими системами, их оптимизацию.

Личное участие соискателя. Соискателем лично, под управлением научного руководителя, выполнены все основные исследования и разработки, составляющие научную новизну и практическую ценность представленной работы.

Оценка эффективности полученных решений методом моделирования осуществлялась при участии Л.Г. Копыловой, А.И. Терехова.

Создание лабораторного стенда и проведение экспериментальных исследований САУ были выполнены совместно с Л.Г. Копыловой, С.А. Самаринским.

Связь с целевыми программами.

Результаты исследований использовались при выполнении НИР:

– по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2016 годы» по проекту 14.574.21.007 «Разработка

энергоэффективной цифровой системы управления многокоординатными обрабатывающими центрами для решения проблемы импортозамещения наукоемких средств металлообработки»;

– по гранту приоритетного направления деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» по проекту №14-19-00972 за 2014-2016 годы «Разработка методов проектирования энергоэффективных электромехатронных систем с инвариантно-робастными свойствами»;

– по проектной части государственного задания Минобрнауки №8.1373.2017/ПЧ «Разработка и микропроцессорная реализация устройств управления мехатронными системами, обеспечивающими достижение заданных робастных, селективно-инвариантных и адаптивных свойств».

Использование результатов работы в учебном процессе

Основные результаты проведенных исследований использовались при разработке учебных курсов «Мехатроника», «Современные проблемы теории управления», для студентов, обучающихся по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Управление в технических системах» на уровнях бакалавриата и магистратуры.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались:

– на VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП – 2014 (г. Саранск, 2014 год);

– на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (Бенардосовские чтения)» (ФГБОУ ВПО ИГЭУ, г. Иваново 2015 год);

– на IX Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП – 2016 (г. Пермь, 2016 год);

– на Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Санкт-Петербург, 2017 год);

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, из которых 3 – в журналах, входящих в базу данных Scopus. Получены 4 патента РФ на 6 изобретений, из которых 3 способа и 3 устройства управления ЭМС.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 90 наименований, и 8 приложений. Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 6 таблиц.

Глава 1. Анализ возможностей и перспектив развития селективно-инвариантных электромеханических систем

1.1 Роль электромеханических систем в решении задач автоматизации технологических процессов. Требования к ЭМС

Современный этап развития промышленности характеризуется интенсивной автоматизацией технологических комплексов и производственных операций. Развитие новых отраслей науки и техники неразрывно связано с усложнением функций управления, расширением диапазонов регулирования скоростей и повышением точности траекторий движения рабочих машин и механизмов.

К наиболее перспективным с точки зрения автоматизации можно отнести технологические процессы добывающей, перерабатывающей, машиностроительной, металлообрабатывающей отраслей, нефтехимической и химической индустрии, различные виды обработки сырья и полуфабрикатов, осуществляемые на высокопроизводительном оборудовании, обычно непрерывного действия [1 – 3, 10, 11, 16, 19, 24, 25, 39, 41, 42, 44, 45, 73, 74 – 76]. Типовыми технологическими объектами являются: металлорежущие, расточные, сверлильные, фрезерные станки, прессы, кalandры, вальцы, цепные и ленточные транспортеры, рольганги, шнеки, конвейеры, экструдеры, формовочные и другие машины [1, 2, 6, 28, 53, 73, 74].

Перечисленные объекты характерны для следующего оборудования:

– станов горячей и холодной прокатки, трубопрокатных станов, технологических линий по производству проволоки, стальных тросов и т.п., применяемых в металлургической промышленности [11, 25, 53];

– чесальных, прядильных, сновальных, красильно-роликовых машин, печатных машин с гравированными валами, сетчатыми шаблонами и линий заключительной отделки текстильной промышленности [2, 3, 19, 25, 51];

– линий по производству полимерных пленок, химических волокон, пластмассовых изделий, каучука химической промышленности [16, 25, 51];

– оборудования общепромышленного назначения: станков, поточных линий, бумагоделательных машин, робототехнических комплексов [5, 28, 38, 46].

Широкое применение в современных технологических комплексах получили электромеханические системы, представляющие собой совокупность управляющего устройства, силового преобразователя, электродвигателя, механической передачи и рабочего органа.

Электромеханические системы (электроприводы) можно назвать основным звеном автоматизации, назначение которого состоит в повышении производительности за счет совершенствования технических и технологических характеристик оборудования, улучшения качества обработки продукта, в сокращении или полной замене человеческого труда.

Общими требованиями, предъявляемыми к ЭМС, являются [5, 10, 16, 24, 25, 28, 39, 41, 54, 74, 76]:

– регулирование рабочей скорости или углового перемещения в определенном диапазоне с заданными показателями точности и плавности;

– стабилизация технологических параметров в условиях действия внешних возмущений на материал, средства его формирования, транспортирования и обработки;

– регулирование соотношений скоростей или угловых перемещений машин с заданной точностью и плавностью для компенсации погрешностей механической части, создания необходимого натяжения, вытяжки (утяжки) или управления весовыми показателями, геометрическими размерами и другими параметрами вырабатываемого продукта;

– обеспечение низкой чувствительности к параметрическим возмущениям.

Допустимая погрешность регулирования скоростей рабочих машин и их вспомогательного оборудования в зависимости от технологического процесса может быть различной: от (2-3)% в автокамерных и протекторных агрегатах [25] до 0,05% в меловальных машинах и агрегатах для нанесения покрытий на пленки [25, 28, 73, 74]. Скоростные режимы формирующих и приемных

устройств в экструзионных линиях для производства полимерных материалов [24, 25] должны быть стабилизированы с погрешностью $(0,5-0,05)\%$ от установившегося уровня, в поточных линиях текстильной и легкой промышленности допустимая погрешность может составлять $(0,5-1)\%$.

Очевидно, что перечисленные выше требования определяют необходимость высокой степени точности и быстродействия (малого времени переходных процессов) обработки заданных законов и траекторий движения ЭМС.

К большинству видов современных ленточных и волоконных материалов предъявляют жесткие требования минимизации отклонений средних значений весовых параметров, геометрических размеров, а также неравномерности их распределения по длине и ширине полотна. Особенно остро задача минимизации отклонений геометрических размеров стоит при производстве волокон из дорогостоящих компонентов, а также в установках термовытягивания, где, с целью наилучшего сочетания оптических и прочностных характеристик готового волокна, необходимо обеспечить высокую точность задания и минимальные отклонения оптимальной величины термовытяжки.

К материалам, не допускающим больших деформаций, можно отнести: ткань, нити и волокна, большинство полимерных пленок. Характерной особенностью указанных материалов является высокая скорость движения в процессе обработки, что ужесточает требования к быстродействию электроприводов по регулированию натяжений. Поэтому системы управления поточными линиями должны обеспечивать поддержание заданных значений скорости движения с погрешностью $0,5-0,05\%$ при быстродействии до 100 мс. Натяжение транспортируемого материала в процессе обработки необходимо обеспечивать с погрешностью не более $5-15\%$ при монотонном или малоколебательном характере переходных процессов [1, 24, 25, 54].

Анализ приведенных требований показывает необходимость увеличения точности поддержания заданных скоростных режимов электропривода ведущих механизмов линии, а также вытяжки и натяжения обрабатываемого материала.

Принимая во внимание выше сказанное, можно сделать вывод, что в результате совершенствования ЭМС удастся повысить технические и технологические показатели оборудования, а следовательно, и качество готовой продукции.

1.2. Особенности построения механической части электроприводов. Проблематика колебаний момента нагрузки

Современные тенденции в машиностроении направлены на достижение все более высоких показателей качества движения исполнительных элементов, что может быть достигнуто за счет применения индивидуальных приводных устройств технологических машин широкого спектра действия, увеличения количества приводных устройств одной машины.

Благодаря этому удастся существенно упростить кинематические передачи между электродвигателем и главным рабочим органом. При этом РО, в большинстве случаев имеющий значительные габаритные размеры, становится доминирующим элементом механической части ЭМС (рис. 1.1) [30, 54].

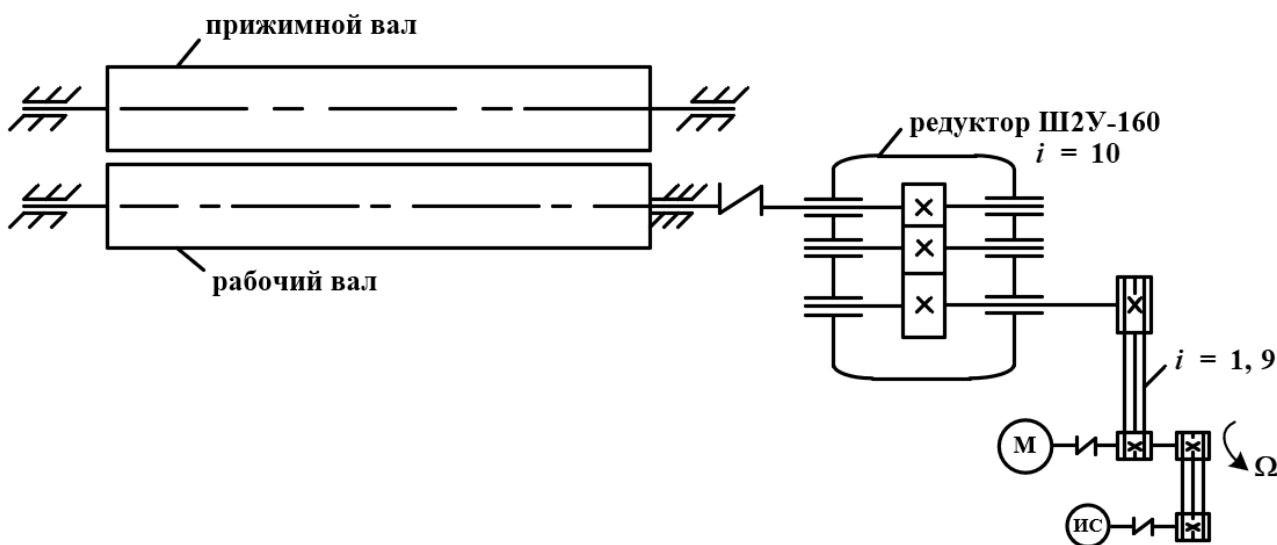


Рис. 1.1 Схема механической части двухвальной плюсовки с индивидуальным приводом

Наличие дефектов его изготовления, например, эксцентриситета рабочих валов и систем передач движения, погрешности сборки и монтажа, а также конструктивные особенности становятся причиной появления доминирующих гармонических возмущений момента нагрузки (рис. 1.2) [20, 30, 52, 54, 72].

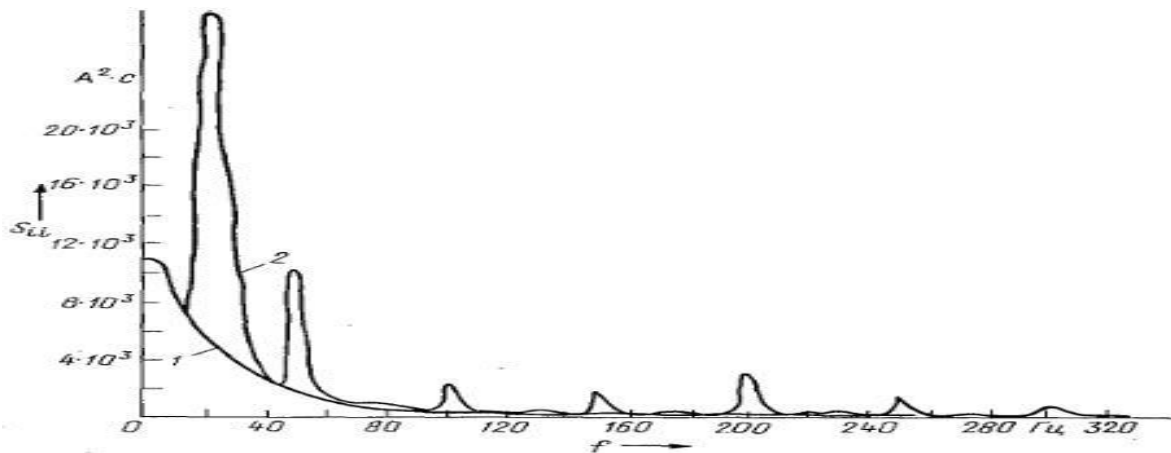


Рис. 1.2 Спектрограмма тока якоря в электроприводе: 1 – случайная составляющая; 2 – случайная и периодическая составляющие

Изменение момента нагрузки роторных электромеханических систем может быть выражено детерминированной функцией времени общего вида:

$$M_H = M_0 + \sum_{j=1}^n M_j \sin(\Omega_j t + \varphi_{0j}), \quad (1.1)$$

где M_0 , M_j – соответственно постоянная составляющая момента и амплитуда его j -ой гармоники; Ω_j , φ_{0j} – угловая скорость и начальное угловое положение j -го ротора, n – общее число вращающихся масс.

В первом приближении момент нагрузки индивидуального ЭП можно представить в следующем виде

$$M_H(t) = M_0 + M_1 \sin(\omega_1 t), \quad (1.2)$$

где M_0 – постоянная составляющая момента; M_1 – амплитуда колебаний момента; ω_1 – скорость рабочего органа; t – время.

Флуктуации момента нагрузки ЭД и, как следствие, скорости РО технологических машин могут вызвать существенные изменения качественных показателей готовой продукции: точности изготовления деталей, заданных геометрических размеров изделий (диаметра волокна или провода, толщины

пленки или различных покрытий), весовых параметров материалов (плотности бумаги, ткани), светопропускания оптических световодов и т.п.

Это подтверждают результаты соответствующих исследований [20, 52, 54, 72], выполненных на технологических машинах различного назначения методом спектрального анализа координат в широком диапазоне рабочих скоростей.

На рис. 1.3, 1.4 приведены технологическая схема и характерные спектрограммы скоростей рабочих машин технологической линии ПЭТФ-2400 по производству полимерной пленки, а также спектрограммы натяжений материала $F1...4$ по ходу его движения в линии [54]. Они показывают, что периодические флуктуации скоростей приводят к соответствующим (с теми же частотами) колебаниям натяжения транспортируемого материала и, очевидно, толщины получаемой пленки.

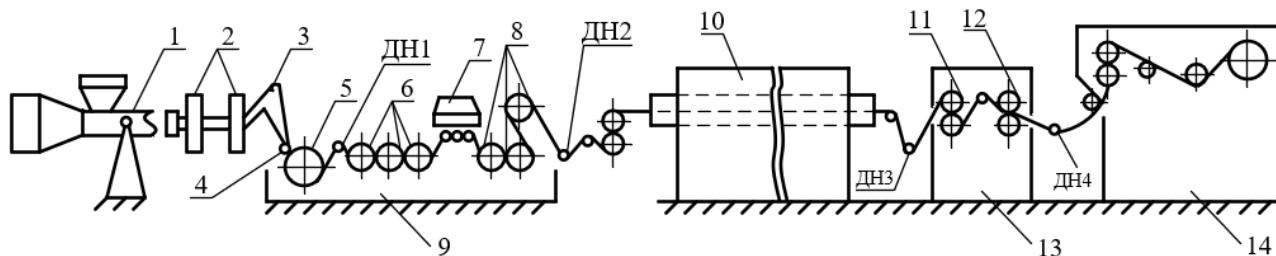


Рис. 1.3 Технологическая схема поточной линии ПЭТФ-2400 для производства двухосноориентированной синтетической пленки: 1 – экструдер; 2 – фильтр; 3 – фильера; 4 – подфильерный валок; 5 – приемный барабан; 6 – тихоходные валки; 7 – облучатель; 8 – быстроходные валки; 9 – установка формования и продольной ориентации; 10 – установка поперечной ориентации; 11 – тянущие валки; 12 – зажимные валки; 13 – резательное устройство; 14 – намоточная станция; ДН1..4 – датчики натяжения

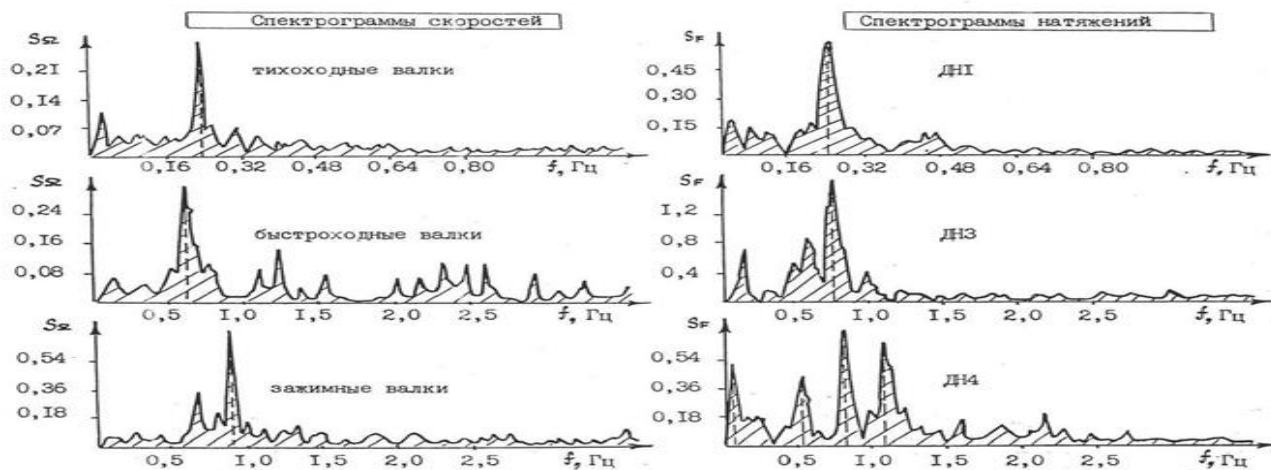


Рис. 1.4 Спектрограммы скоростей машин и натяжений пленки в зонах деформации поточной линии ПЭТФ-2400 на рабочей скорости 25 м/мин

Наличие свойства «памяти» транспортируемого вязкоупругого полотна и технологические воздействия приводят к накоплению и фиксации флуктуаций деформации, что формирует неровноту толщины готового материала на отрезках соответствующей длины и может стать причиной существенного ухудшения его потребительских свойств, а также перерасхода сырья.

Особенно остро задача минимизации отклонений геометрических размеров стоит при производстве волокон из дорогостоящих компонентов. Допустимые погрешности стабилизации рабочих скоростей приемных и подающих устройств соответствующих технологических установок (рис. 1.5) не должны превышать (0,5 - 0,25)%.

Аналогичные требования предъявляются к управлению соотношением скоростей подающего и приемного устройств в установках термовытягивания (рис. 1.5), где, с целью наилучшего сочетания оптических и прочностных характеристик готового волокна, необходимо обеспечить высокую точность задания и минимальные отклонения оптимальной величины термовытяжки [54].

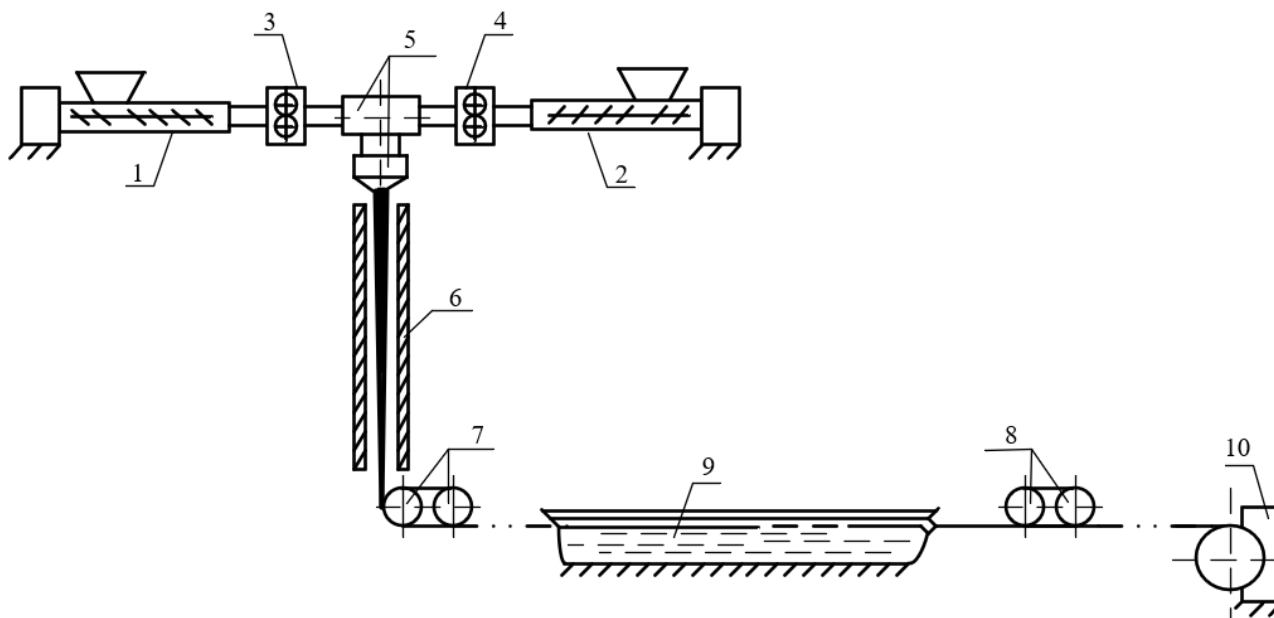


Рис. 1.5 Технологическая схема совмещенной установки формирования и термовытяжки полимерного оптического волокна: 1,2 – экструдеры ядра и оболочки; 3,4 – дозирующие насосы; 5 – фильерный узел; 6 – сопроводительная шахта; 7,8 – приемные и вытяжные диавальцы; 9 – ванна термической обработки; 10 – намоточное устройство

При производстве полимерного оптического волокна важно достичь стабильных геометрических и оптических параметров. Одной из основных

причин потерь светового потока при его прохождении через волокна являются флуктуации размеров диаметра их сердцевины, неравномерность поверхности раздела сердцевины и оболочки [82]. Повышение флуктуаций диаметра сердцевины до 30-40% приводит к возрастанию оптических потерь до уровней 80 и 120 дБ/км соответственно [43].

Основной причиной повышенных пульсаций диаметра волокна являются колебания скорости дозирующего насоса, которые обуславливают наличие характерных максимумов в графиках спектральной плотности амплитуд на его основной и удвоенной частотах вращения (рис. 1.6). Для отклонения толщины оболочки волокна на 1% от установленного значения достаточно изменить скорость подающего устройства полимера лишь на 0,5 % или рабочую скорость устройства подачи сердцевины на 1,5% [55].

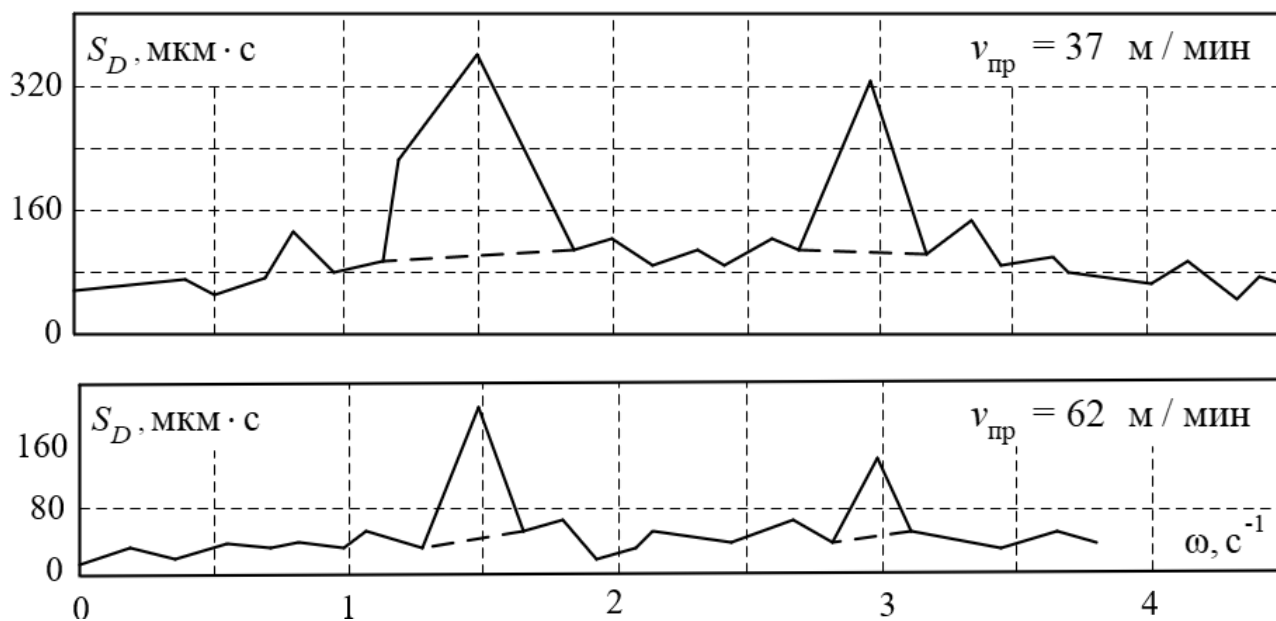


Рис. 1.6 Спектрограммы диаметра волокна на различных уровнях скорости приемки

Таким образом, поддержание с заданной точностью таких параметров технологического процесса, как линейные скорости, натяжения, вытяжки и т.п. в условиях действия на объект внешних возмущений является одной из основных проблем современных ЭМС.

В связи с этим важно оценить, в какой степени можно удовлетворить указанным требованиям в условиях колебаний нагрузочных моментов ЭД при

использовании в современном оборудовании традиционных технических решений, применяемых для управления ЭП.

1.3. Оценка возможностей типовых ЭМС в отработке гармонического возмущения момента нагрузки

Рост требований к качеству управления электромеханическими системами, вынуждает проектировщиков учитывать более тонкие моменты физических процессов, используя более сложные модели объектов управления (ОУ).

В связи с этим распространение получило применение замкнутых систем подчиненного регулирования на базе каскадных регуляторов тока (момента) и скорости. Данный метод основан на разделении системы на несколько вложенных контуров, каждый из которых содержит свою регулируемую координату. Традиционной является настройка контуров, близкая к так называемому «техническому оптимуму», обеспечиваемая регуляторами П- и ПИ-типа. При расчете параметров каждого внешнего контура предыдущий внутренний будет учитываться как звено 1-го порядка с некоторой эквивалентной постоянной времени. Настройка внешнего контура должна осуществляться на быстроедействие, меньшее, чем внутреннего, для исключения их влияния друг на друга. Таким образом, принцип подчиненного регулирования координат обеспечивает простую настройку синтезированной на его основе системы управления [9, 71, 78].

Для оценки возможностей типовых ЭМС в качестве объекта исследований примем систему ЭД постоянного тока [68], к структуре которой могут быть приведены и аналогичные системы векторного управления ЭД переменного тока. Соответствующая структурная схема ЭМС с жесткой механической частью представлена на рис. 1.7, а, где использованы следующие обозначения: Ω_3, Ω – заданное и действительное значения частоты вращения ЭД; U_y, U – управляющее и выходное напряжение силового преобразователя (СП), I_a – ток якорной цепи, $K_{СП}$ и $T_{СП}$ – коэффициент передачи и постоянная времени СП, R_a и T_a – активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи, C –

конструктивная постоянная ЭД, J – суммарный приведенный момент инерции ротора ЭД и РО, i – передаточное отношение редуктора, s - комплексная переменная Лапласа.

Для конкретности примем следующие значения параметров системы:

$K_{СП} = 22$, $T_{СП} = 0,003$ с, $R_a = 0,177$ Ом, $T_a = 0,02$ с, $C = 1,37$ Вб, $J = 0,2$ кг·м², $i = 10$, $M_1 = 8,22$ Нм.

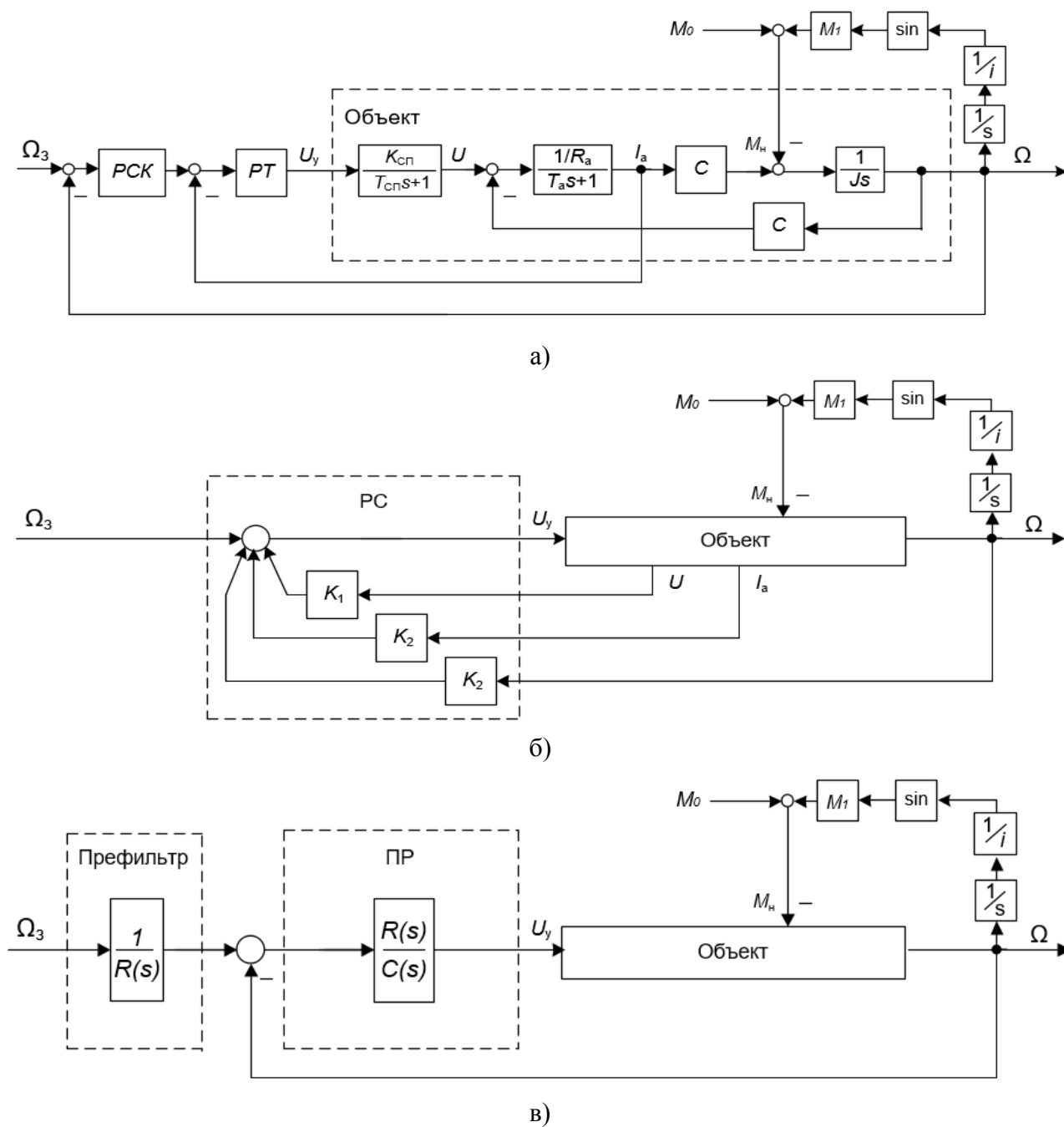


Рис. 1.7 Структурные схемы объекта управления и различных вариантов ЭМС

Система каскадного управления будет содержать внутренний контур тока и внешний контур скорости. ПИ-регулятор тока (РТ) и П-регулятор скорости (РСК), настроенные на «модульные» оптимумы, будут представлены следующими передаточными функциями (ПФ):

$$H_{РТ}(s) = 0,0268 \cdot \frac{0,02s + 1}{0,02s}; \quad H_{РСК} = 4.$$

Полученные моделированием средствами программного комплекса MATLAB [46, 47, 70, 79, 80] графики переходных процессов отработки ступенчатого сигнала задания скорости и гармонического возмущения (1.2), поданного в момент времени $t = 2$ с, приведены на рис. 1.8, кривая 1. Графики наглядно иллюстрируют высокий уровень колебаний скорости ЭД, который является неприемлемым для прецизионных систем электропривода. Попытки снижения амплитуды колебаний путем повышения быстродействия (динамической точности) ЭМС, т.е. достижения времени регулирования, меньшего 150 мс, оказывается безуспешным, поскольку наличие некомпенсируемой постоянной времени СП приводит к ухудшению качества переходных процессов и снижению запаса устойчивости системы.

Таким образом, становится актуальной задача поиска более рациональных структурных решений ЭМС, способных обеспечить повышенную эффективность отработки гармонических возмущений момента нагрузки ЭД [58, 62, 90].

Одним из возможных подходов к созданию систем управления линейными объектами является модальное управление (МУ). Этот метод позволяет достичь заданной динамики систем путем формирования стандартных характеристических полиномов (Ньютона, Бесселя, Баттерворта и др.) их передаточных функций, распределения корней которых непосредственно определяют время переходного процесса, перерегулирование, колебательность, статическую точность [34, 40, 63].

Возможным вариантом построения системы модального управления является схема с безынерционным регулятором состояния (РС). Такой

регулятор использует информацию о полном векторе состояния управляемого объекта, т.е. является регулятором полной размерности, равной порядку объекта управления [21, 34, 59, 64].

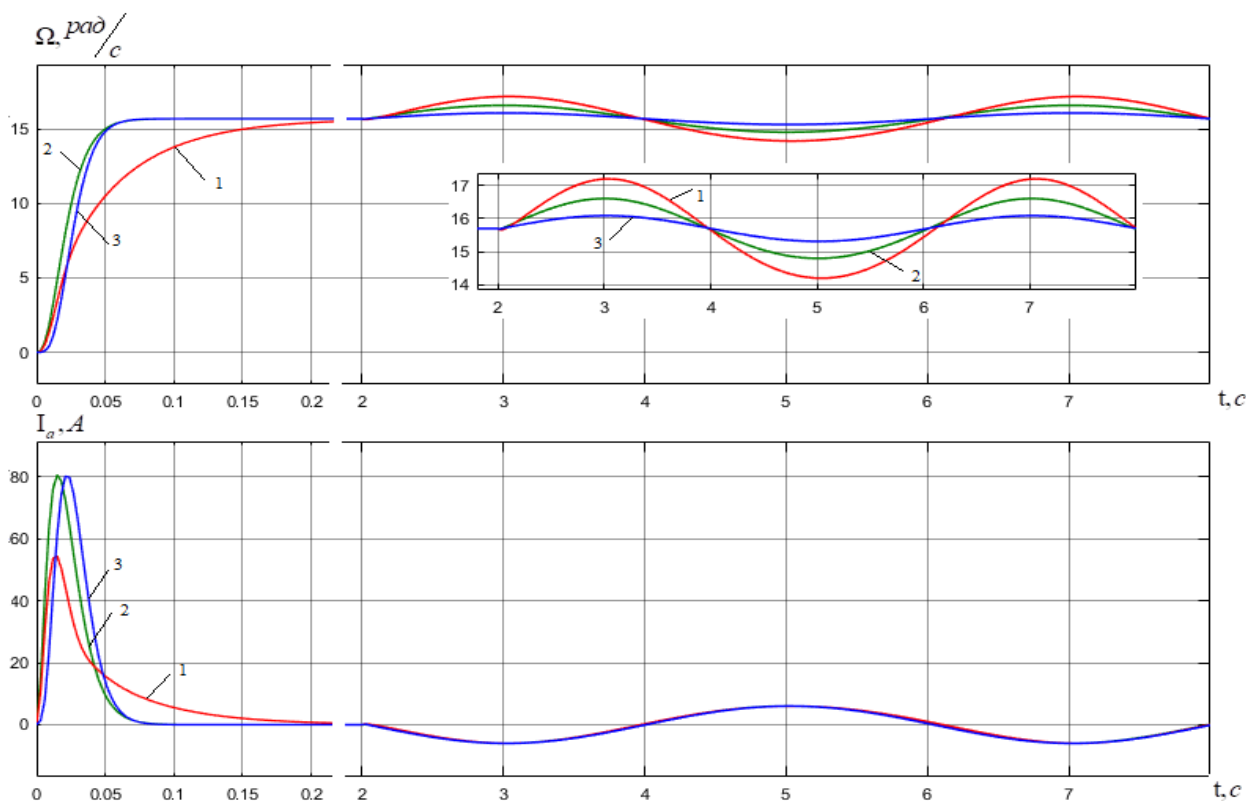


Рис. 1.8 Переходные процессы для ЭМС: с РТ и РСК (графики 1), с РС (графики 2), с ПР (графики 3)

Соответствующая структурная схема ЭМС, построенной на базе РС приведена на рис. 1.7, б.

Одномерный линейный ОУ произвольного порядка может быть описан следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} s\mathbf{x}(s) = \mathbf{A}\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}U_y(s) \\ \Omega(s) = \mathbf{C}\mathbf{x}(s), \end{cases}$$

где $\mathbf{x}(s)$ – вектор переменных состояния, \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} – матрицы состояния, входа (управления) и выхода с размерностями $n \times n$, $n \times 1$, и $1 \times n$ соответственно, s – комплексная переменная преобразования Лапласа.

Для рассматриваемой ЭМС с жесткой механической связью между двигателем и рабочим органом векторно-матричное описание будет иметь следующий вид

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{\text{СП}}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{\text{я}}} & -\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} & -\frac{C}{L_{\text{я}}} \\ 0 & \frac{C}{J} & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{\text{СП}}}{T_{\text{СП}}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = [0 \ 0 \ 1].$$

Передаточная функция (ПФ) объекта (рис. 1.7, а) от входа U_y к выходной координате Ω будет выглядеть следующим образом:

$$H_{\Omega U_y}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{14190000}{s^3 + 383,333s^2 + 19320s + 883700}.$$

Для расчета матрицы коэффициентов РС воспользуемся следующим выражением [60]:

$$\mathbf{K} = \overline{\mathbf{K}} \overline{\mathbf{U}} \mathbf{U}^{-1},$$

где $\overline{\mathbf{U}}$ и \mathbf{U}^{-1} – матрицы управляемости объекта в канонической форме управляемости и в реальных координатах соответственно; $\overline{\mathbf{K}}$ – матрица обратных связей в канонической форме управляемости.

В качестве желаемого характеристического полинома (ХП) системы выберем распределение Ньютона:

$$D(s) = s^3 + 3\Omega_0 s^2 + 3\Omega_0^2 s + \Omega_0^3,$$

где Ω_0 – среднегеометрический корень полинома.

Тогда

$$\overline{\mathbf{K}} = [\overline{k}_1 \ \overline{k}_2 \ \overline{k}_3] = [(a_0 - d_0) \ (a_1 - d_1) \ (a_2 - d_2)],$$

где a_i и d_i – коэффициенты при одинаковых степенях s исходного $A(s)$ и желаемого $D(s)$ полиномов системы.

Для рассматриваемого объекта 3-го порядка с указанными выше параметрами синтезируется РС с вектором коэффициентов обратных связей по напряжению, току и скорости

$$\overline{\mathbf{K}} = [\overline{k}_1 \ \overline{k}_2 \ \overline{k}_3] = [-0,0009 \ -0,015 \ -0,091],$$

который обеспечивает более высокое, по сравнению с системой подчиненного регулирования, быстродействие ($T_{\Pi} = 0,05$ с) за счет введения обратных связей по полному вектору состояния и распределения полюсов, соответствующего полиному Ньютона со среднегеометрическим корнем $\Omega_0 = 117$ с⁻¹.

Соответствующие графики 2 переходных процессов, полученные моделированием средствами программного комплекса MATLAB системы с РС, приведены на рис. 1.8.

Если измерение всех координат состояния является невозможным по техническим или экономическим причинам, то прибегают к использованию динамических полиномиальных регуляторов (ПР) в контуре выходной координаты объекта.

Структурная схема ЭМС, построенной на базе ПР приведена на рис. 1.7, в.

Порядки полиномов для получения минимального технически реализуемого регулятора зададим следующими:

$$\deg C(s) = \deg R(s) = \deg A(s) - 1 = 3 - 1 = 2;$$

$$\deg D(s) = \deg A(s) + \deg C(s) = 3 + 2 = 5.$$

Заданные динамические показатели переходного процесса обеспечиваются распределением полюсов замкнутой системы по Ньютону со среднегеометрическим корнем $\Omega_0 = 180$ с⁻¹.

Путем решения уравнения синтеза САУ [45]

$$A(s) \cdot C(s) + B(s) \cdot R(s) = D(s)$$

получаем полиномы регулятора вида:

$$R(s) = 0,4638s^2 + 192,5s + 6676;$$

$$C(s) = s^2 + 516,7s + 106624,5.$$

Соответствующие переходные процессы ЭМС, построенной на базе ПР, представлены графиками 3 на рис. 1.8.

Полученные результаты моделирования различных видов ЭМС с безынерционным и динамическим РС наглядно иллюстрируют определенное

снижение флуктуаций скорости ЭД от действия гармонического возмущения момента нагрузки при повышении быстродействия исследуемых систем.

Однако следует отметить, что токовые форсировки ЭД при этом существенно возрастают, а размеры линейной зоны работы ЭМС, определяемые возможностями силовой части, соответственно сокращаются. Попытки дальнейшего снижения влияния гармонического возмущения на скорость ЭД увеличением быстродействия ЭМС с регуляторами полной размерности могут привести к необоснованному превышению требований отработки управляющего воздействия и чрезмерными форсировкам ЭД в процессах регулирования скорости.

Заметим также, что несколько лучшее подавление колебаний момента в системе с ПР сопровождается снижением ее помехоустойчивости из-за наличия высших производных выходной координаты в структуре управления.

Таким образом, даже в ЭМС, построенных на базе полноразмерных регуляторов, стремление улучшить компенсацию гармонического возмущения момента нагрузки традиционным путем повышения их быстродействия, оказывается нерациональным, поскольку приводит к потере других составляющих качества управления.

Это определяет необходимость продолжения поиска более эффективных структурных решений ЭМС в отработке гармонических возмущений и управляющих воздействий.

1.4. Анализ эффективности селективно-инвариантных ЭМС

В настоящее время разработано много различных методов и подходов к решению задачи компенсации внешних возмущений [4, 17, 20, 22, 37].

Наиболее рациональным способом разрешения указанной проблематики является применение принципа селективной (избирательной) инвариантности САУ к воздействиям определенного вида, основанного на использовании внутренней модели возмущений (МВ). При этом под селективно-инвариантной

понимается такая система, которая обеспечивает минимум установившейся реакции на конкретный тип возмущений.

Развитие теории инвариантности связано с именами Г.В. Щипанова, В.С. Кулебакина, Н.Н. Лузина, П.И. Кузнецова, Б.П. Петрова, А.Ю. Ишлинского, В.А. Якубовича, А. И. Кухтенко, В.В. Величко, А.Р. Гайдука, Г.К. Гудвина, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо, Б.Р. Андриевского, А. Френсиса, М. Уонема, Л.И. Розоноэра и других ученых.

Согласно принципу селективной инвариантности, полином, формирующий математическую модель гармонической составляющей возмущения (1.1), определяется в данном случае в виде

$$G(s) = s^2 + \omega_1^2, \quad (1.3)$$

где s – комплексная переменная Лапласа, $\omega_1 = \frac{\Omega}{i}$, Ω – частота вращения ЭД, i – передаточное отношение редуктора, вводится множителем в знаменатель передаточной функции (ПФ) регулятора, а искажение ПФ по управляющему воздействию устраняется соответствующим внеконтурным префильтром. Выходной сигнал такого регулятора будет содержать гармоническую составляющую, которая при содействии отрицательной обратной связи по управляемой координате обеспечит противофазную компенсацию возмущения в установившемся режиме работы.

Синтез регулятора с МВ осуществляется [17] по правилам полиномиального модального управления и уравнению вида

$$A(s) \cdot F(s) + B(s) \cdot E(s) = D(s) \quad (1.4)$$

где $E(s)$ и $F(s)$ – полиномы числителя и знаменателя ПФ регулятора, причем $F(s) = G(s) \cdot V(s)$, $V(s)$ – вспомогательный полином, обеспечивающий техническую реализуемость регулятора, $D(s)$ – желаемый характеристический полином (ХП) синтезируемой ЭМС.

Для указанных выше параметров объекта при выборе в качестве $D(s)$ полинома Ньютона 7-го порядка с величиной $\Omega_0 = 238 \text{ с}^{-1}$, соответствующей

быстродействию 50 мс, и частоты настройки МВ $\omega_1 = 1,57 \text{ с}^{-1}$ получаем развернутое уравнение синтеза в виде

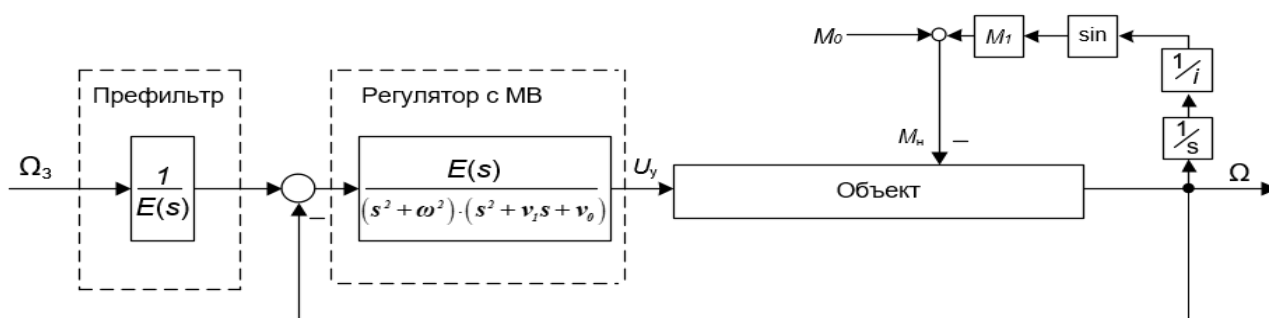
$$(s^3 + 383,333s^2 + 19320s + 883700) \cdot (s^2 + 1,57^2) \cdot (s^2 + v_1s + v_0) + 1419000 \cdot (e_4s^4 + e_3s^3 + e_2s^2 + e_1s + e_0) = (s + 238)^7.$$

Его решение дает следующие выражения полиномов ПФ объединенного регулятора, содержащего МВ:

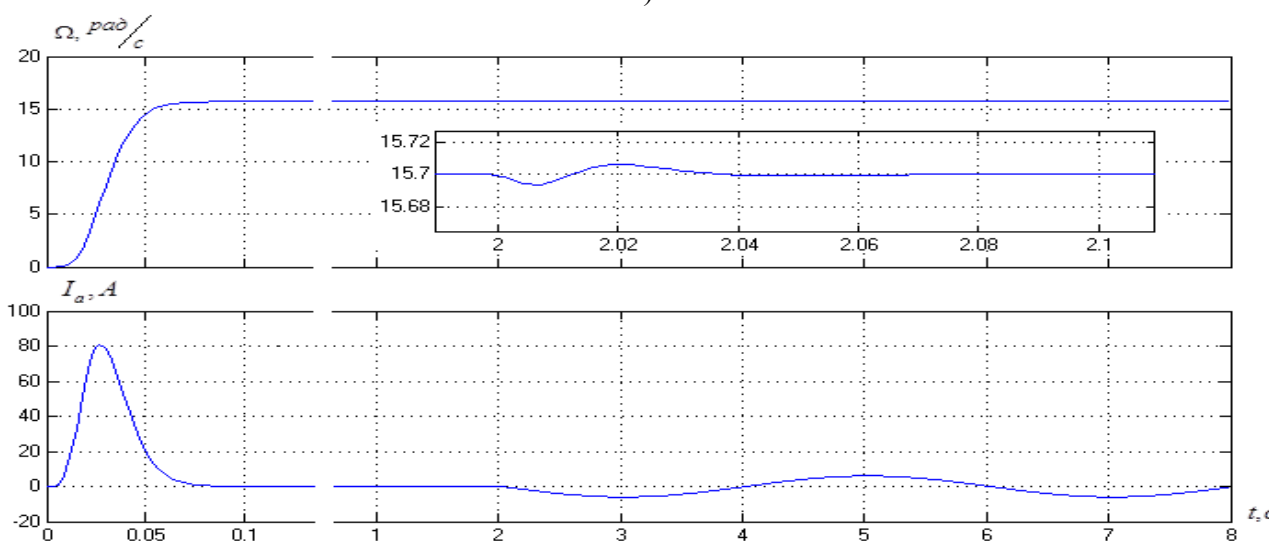
$$E(s) = 9,668s^4 + 4915,9s^3 + 728171,4s^2 + 55928854,5s + 17577430064;$$

$$F(s) = (s^2 + 1,57^2) \cdot (s^2 + 1156,667s + 553688,9).$$

Соответствующая структурная схема селективно-инвариантной ЭМС с контуром обратной связи по выходной координате, содержащим объединенный ПР с МВ, приведена на рис. 1.9, а, а результаты ее моделирования при отработке управляющего и возмущающего воздействий представлены на рис. 1.9, б.



а)



б)

Рис.1.9 Селективно-инвариантная ЭМС: а) структурная схема; б) переходные процессы по скорости и току

Полученные результаты наглядно показывают, что при сохранении качества отработки сигнала задания скорости и форсировочной способности ЭД, селективно-инвариантная ЭМС за счет определенного усложнения регулятора обеспечивает гораздо лучшую компенсацию влияния гармонического возмущения момента нагрузки с частотой, равной настроечной частоте МВ.

Однако использованная методика синтеза и настройки такой системы дает повод усомниться в ее эффективности при отработке возмущений различных частот в широком скоростном диапазоне электропривода. Поэтому для оценки возможностей, синтезированной селективно-инвариантной ЭМС по отработке широкого спектра возмущений были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики всех рассмотренных вариантов систем по управляющему и возмущающему воздействиям. Соответствующие графики 1-4 для системы подчиненного регулирования, ЭМС на базе РС, ПР, а также селективно инвариантной ЭМС при различных частотах настройки МВ ($\omega_1 = 1,57 \text{ c}^{-1}$, $15,7 \text{ c}^{-1}$ и 157 c^{-1}) приведены на рис. 1.10, а, б в логарифмических масштабах величин.

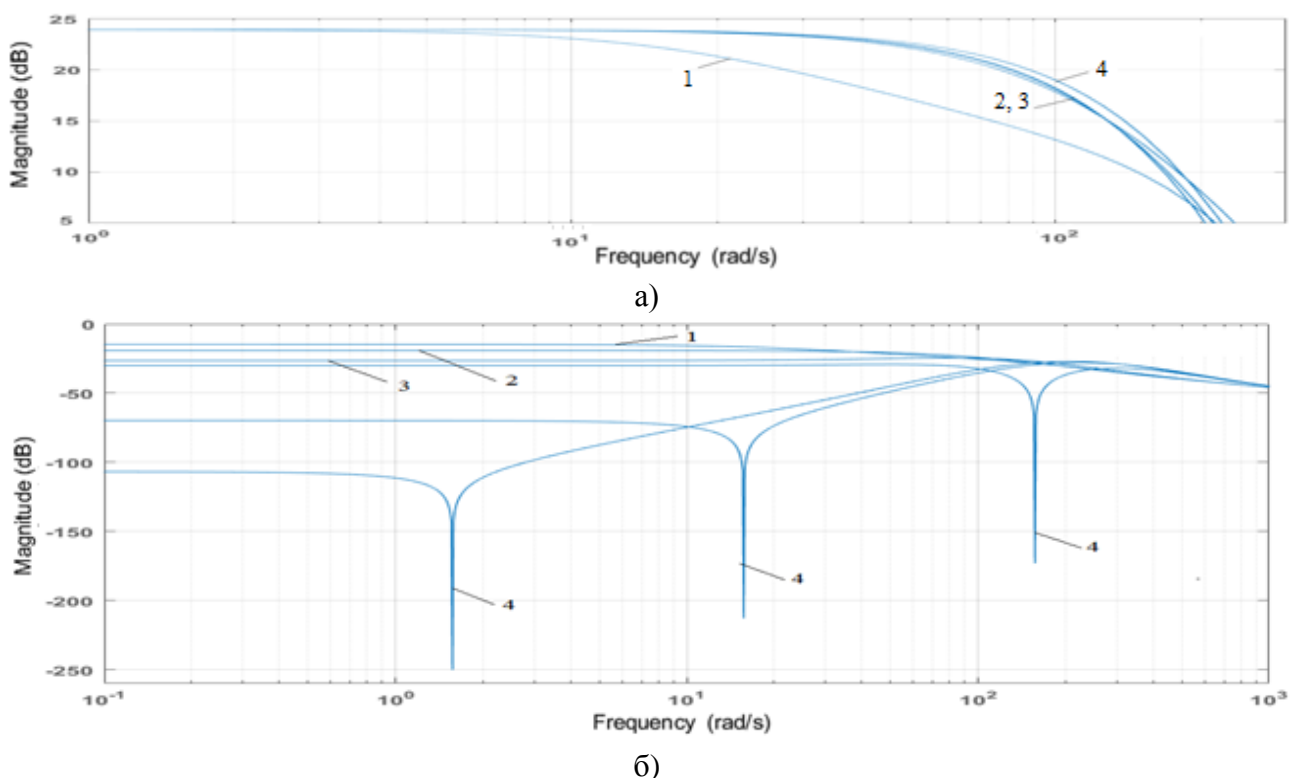


Рис. 1.10 Амплитудно-частотные характеристики по управляющему (а) и по возмущающему (б) воздействиям для ЭМС: с РТ и РСК (графики 1), с РС (графики 2), с ПР (графики 3) и с регулятором с внутренней МВ (графики 4)

Сравнительный анализ «частотных портретов» различных систем управления типовым электромеханическим объектом позволяет сделать ряд важных наблюдений и выводов.

1. При малых различиях исследуемых вариантов ЭМС в отработке управляющих воздействий селективно-инвариантная САУ выгодно отличается гораздо лучшей отработкой возмущений по моменту нагрузки ЭД не только на частоте настройки МВ, но и на других частотах скоростного диапазона электропривода за счет совместного действия МВ и главного контура отрицательной обратной связи по скорости. Наиболее высокая эффективность системы достигается при настройке МВ на уровень частоты возмущения в нижней части скоростного диапазона.

Таким образом, полученные результаты наглядно иллюстрируют робастные свойства селективно-инвариантных САУ с внутренней МВ, отмеченные ранее в [17].

2. В сравнении с другими вариантами ЭМС селективно-инвариантная САУ также гораздо эффективнее обрабатывает возмущения в виде постоянной составляющей момента нагрузки (гармоники нулевой частоты), что приближает ее по свойствам к астатическим системам с первой степенью астатизма.

Это иллюстрируется соответствующими графиками 1, 2 переходных процессов отработки ступенчатого возмущения момента нагрузки ($M_0 = 33 \text{ Нм}$), полученными моделированием ЭМС на базе ПР и селективно-инвариантной ЭМС и приведенными на рис.1.11.

Для полного исключения влияния постоянного момента нагрузки в модель возмущения может быть введена интегральная составляющая, которая в условиях действия обратной связи (ОС) обеспечивает астатизм 1-го порядка.

3. Селективно-инвариантная ЭМС способна более эффективно обрабатывать не только синусоидальные, но и несинусоидальные периодические возмущения момента нагрузки ЭД с широким спектральным

составом гармоник, например, воздействия ударного характера, вызванные дисбалансом вращающихся масс, неравномерностью трения и т.п.

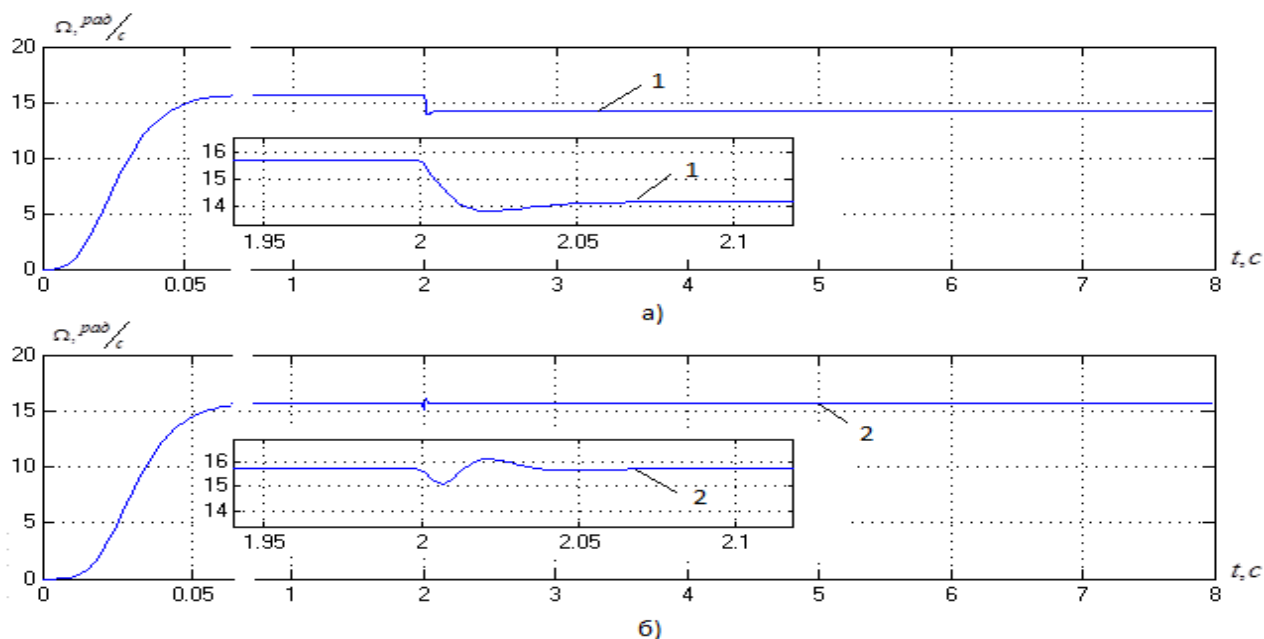


Рис. 1.11 Переходные процессы по скорости при отработке постоянного момента нагрузки
 а) ЭМС на базе ПР; б) селективно-инвариантной ЭМС

Наглядной иллюстрацией этого вывода являются приведенные на рис. 1.12, а, б, в графики и спектры соответственно сложного возмущения момента нагрузки, а также скорости ЭД как реакции на это возмущение в системе на базе ПР и в селективно-инвариантной ЭМС на базе МВ, полученные путем их цифрового моделирования.

4. Селективно-инвариантная ЭМС имеет дополнительные резервы повышения качества отработки возмущений по моменту нагрузки, которые могут быть использованы при адаптивной перестройке параметров МВ в соответствии с изменениями рабочей скорости электропривода, а также при введении дополнительной интегральной составляющей в состав регулятора скорости.

В этом случае можно обеспечить нулевое значение статической ошибки регулирования скорости при воздействии возмущения (1.2) во всем диапазоне работы электропривода.

Из приведенного анализа следует, что применение принципа селективной инвариантности позволяет достичь существенных улучшений в обработке постоянной и гармонической составляющей возмущений по моменту нагрузки.

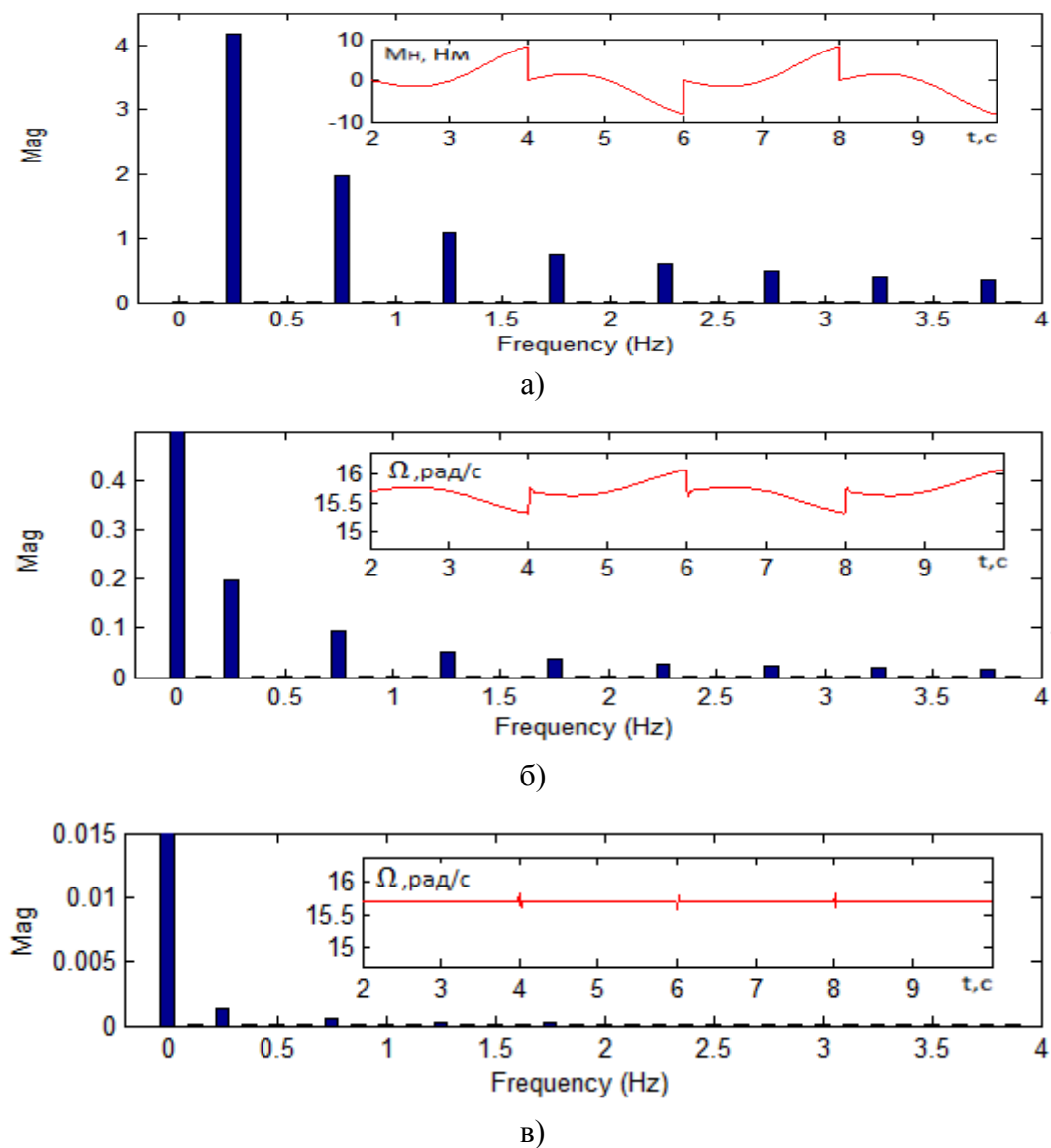


Рис. 1.12 Графики и спектры сложного возмущения момента нагрузки (а), скорости ЭД в ЭМС на базе ПР (б) и на базе ПР с МВ (в)

Однако достигнутые улучшения обеспечиваются ценой существенного повышения степени сложности управляющего устройства, которое должно содержать в своем составе модель гармонического возмущения.

Повышение сложности регулятора, в свою очередь, приводит к соответствующему усложнению процедур его параметрического синтеза, а также настройки на реальном объекте эксплуатации.

Однако основная проблематика селективно-инвариантных ЭМС, построенных по типовой структурной схеме (рис. 1.9, а), заключается в том, что повышение порядка передаточной функции полиномиального регулятора «входа-выхода» с внутренней МВ приводит к использованию более высоких производных выходной координаты, что вызывает существенное снижение помехоустойчивости системы и повышение ее чувствительности к вариациям внутренних параметров.

Таким образом, использование в классической структуре только принципов внутренней модели и полиномиального управления по выходной координате, обеспечивающих улучшение инвариантных свойств системы при сохранении размеров линейной зоны работы, также сопровождается ухудшением других важных показателей ее функционирования.

К этому следует добавить, что возможности дальнейшего повышения качества отработки возмущений по моменту нагрузки электродвигателей при сохранении величин их токовых форсировок в селективно-инвариантной ЭМС традиционной структуры оказываются в значительной мере исчерпанными. Кроме того, ограниченный набор используемых принципов управления не позволяет осуществлять гибкое перераспределение акцентов на требуемые показатели качества и реализовать необходимую схему их компромиссов, т.е. проводить оптимизацию системы по комплексному критерию качества. Не в полной мере обеспечивается стабилизация этих показателей при работе селективно-инвариантной ЭМС в широком скоростном диапазоне.

Отмеченные структурные свойства являются существенным фактором, ограничивающим потенциальные возможности селективно-инвариантных электромеханических систем (СИ ЭМС) в достижении высокого качества управления, и значительно снижают эффективность их работы в конкретных применениях.

Все это обуславливает необходимость дальнейшего структурного совершенствования СИ ЭМС на основе использования более широкой гаммы

принципов теории автоматического управления (ТАУ), а также разработки соответствующих методов их параметрического синтеза.

1.5. Основные пути развития селективно-инвариантных ЭМС. Определение направлений исследований

Одновременное обеспечение высоких требований к отработке управляющего воздействия и компенсации внешних возмущений по моменту нагрузки ЭД, а также удовлетворение дополнительным критериям качества может быть достигнуто путем сочетания различных принципов и приемов построения селективно-инвариантных ЭМС.

Использование принципа разделения движения (РД) СИ ЭМС на «быструю» и «медленную» составляющие с выделением соответственно «быстрой» и «медленной» подсистем и высокой степенью локализации возмущения по нагрузочному моменту ЭД может обеспечить существенное снижение порядка динамических звеньев в составе управляющего устройства и улучшить качество отработки доминирующего возмущения.

Реализация «быстрых» подсистем СИ ЭМС на основе принципов регулирования состояния (РС) или регулирования состояния по выходу (полиномиального регулирования) позволит обеспечить управление динамикой системы при различных сочетаниях показателей качества.

Использование принципов каскадного (К) и подчиненного (П) регулирования координат с последовательной коррекцией контуров управления и аппроксимацией внутренних контуров звеньями пониженного порядка позволит реализовать логичную методику параметрического синтеза и настройки управляющих устройств, обеспечить фильтрацию помех и снизить зависимость систем от влияния «малых» факторов, не учтенных при их синтезе.

Дополнительные возможности управления могут быть обеспечены реализацией принципа разделения модели возмущения (РМВ) на отдельные составляющие и их переносом в структуры «быстрой» и «медленной»

подсистем, охватывающих точку приложения доминирующего возмущения по моменту нагрузки ЭД.

Известная зависимость частоты гармонического возмущения и, как следствие параметров его модели, от угловой скорости РО определяет целесообразность применения принципа адаптации (А) синтезируемых регуляторов, содержащих модель возмущения, к изменениям скоростного режима селективно-инвариантных ЭМС в широком диапазоне.

В основу параметрического синтеза селективно-инвариантных ЭМС и их отдельных составляющих вполне могут быть положены хорошо отработанные методы теории модального управления (МУ) и их модификации, обеспечивающие заданные показатели качества путем формирования соответствующего распределения полюсов создаваемых систем (подсистем).

Логичным завершением процедуры синтеза различных вариантов селективно-инвариантных ЭМС будет являться их сравнительный анализ и детальное исследование возможностей полученных структурных реализаций на компьютерных моделях и реальном оборудовании.

При этом основными критериями качества могут быть приняты традиционные показатели отработки сигнала задания скорости (положения) и возмущений по моменту нагрузки ЭД: время регулирования, перерегулирование, время восстановления и др.

В качестве дополнительных критериев качества можно использовать: чувствительность к вариациям внутренних параметров, устойчивость к влиянию помех в канале обратной связи и наличие запаздывания сигналов в силовом преобразователе, а также степень сложности регулятора, определяемую общим порядком всех его динамических звеньев.

Таким образом, развитие селективно-инвариантных ЭМС в указанных направлениях и достижение главной цели работы разделяется на ряд связанных между собой задач, каждая из которых требует своего самостоятельного решения.

Выводы

1. В условиях повышения технических требований к современному оборудованию, производительности машин, качеству выпускаемой продукции электромеханические системы становятся одной из важнейших составляющих современных технологических комплексов, в значительной мере определяющих их потребительские свойства.

Новые технологические требования определяют необходимость обеспечения высоких показателей точности и быстродействия ЭМС при управлении параметрами движения рабочих машин в условиях влияния внешних и внутренних возмущений.

2. В современных компоновках ЭМС с индивидуальными приводами технологических машин их главные рабочие органы становятся доминирующими элементами механической части.

Неизбежные погрешности изготовления, сборки и монтажа этих элементов, а также их конструктивные особенности становятся причинами появления соответствующих доминирующих возмущений в виде гармонических колебаний моментов нагрузки электродвигателей с частотами, определяемыми угловыми скоростями главных роторов.

Флуктуации моментов нагрузки и, как следствие, угловых скоростей электродвигателей и рабочих органов машин вызывают существенное ухудшение качества выпускаемой продукции: точности изготовления деталей и формирования геометрических параметров изделий, обеспечения их весовых, оптических, электротехнических и других показателей.

3. Применение традиционных ЭМС на базе каскадных регуляторов тока-скорости, а также полноразмерных безынерционных и динамических регуляторов состояния, позволяет достичь определенного снижения флуктуаций скорости электродвигателя от действия гармонического возмущения за счет повышения быстродействия, но приводит к дополнительным форсировкам двигателей и соответствующему сокращению линейной зоны отработки управляющего воздействия.

4. Сравнительный анализ методов компенсации внешних возмущений позволяет сделать выбор в пользу принципа селективной (избирательной) инвариантности ЭМС к возмущениям определенного вида, позволяющего достичь существенных улучшений в отработке гармонических моментов нагрузки электродвигателей без их дополнительных форсировок.

5. Несмотря на очевидные достоинства традиционных селективно-инвариантных электромеханических систем, они обладают и рядом существенных недостатков, к числу которых относятся: повышение степени сложности управляющего устройства, снижение помехоустойчивости, чувствительность к вариациям внутренних параметров и др.

Возможности дальнейшего улучшения инвариантных свойств и перераспределения акцентов на различные показатели качества в традиционных структурах СИ ЭМС оказываются в значительной мере исчерпанными.

6. Дальнейшее развитие и повышение потенциальных возможностей СИ ЭМС может быть достигнуто путем их структурного совершенствования на основе расширенного состава используемых принципов управления (разделения движений и локализации, регулирования состояния, каскадного и подчиненного регулирования, разделения модели возмущения, адаптивного управления и др.), разработки более эффективных типов управляющих устройств и методов их автоматизированного синтеза.

Глава 2. Структурно-параметрический синтез и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с объединенной моделью возмущения

Как было показано выше, наиболее рациональным способом компенсации гармонических возмущений момента нагрузки является применение принципа селективной инвариантности систем автоматического управления, основанного на использовании внутренней модели возмущения.

Однако традиционная структура селективно-инвариантной ЭМС (рис. 1.9, а) ввиду ограниченного набора используемых принципов управления, не позволяет проводить оптимизацию системы по всему комплексу требуемых показателей качества, что приводит к значительному снижению эффективности ее работы в конкретных применениях.

В связи с этим возникает задача разработки усовершенствованных структурных решений ЭМС, призванных обеспечить повышение эффективности отработки внешних возмущений по моменту нагрузки ЭД при одновременном снижении сложности регуляторов и сохранении других показателей качества.

В данной главе выполняется структурно-параметрический синтез, и проводятся детализированные исследования различных структурных решений ЭМС, построенных на основе сочетания принципа внутренней модели гармонического возмущения, включаемой в состав управляющего устройства электропривода, с другими принципами теории управления [32, 56, 88]. На основе полученных результатов формируется методика сравнения и структурной оптимизации систем по заданному комплексу основных и дополнительных критериев качества.

2.1. Особенности построения и расчета управляющих устройств селективно-инвариантных ЭМС

Для возмущающего воздействия (1.2), состоящего из постоянной и колебательной составляющих, соответствующее изображение Лапласа имеет вид

$$M_H(s) = \frac{M_0}{s} + \frac{M_1 \cdot \omega_1}{s^2 + \omega_1^2}, \quad (2.1)$$

где s – комплексная переменная Лапласа, $\omega_1 = \frac{\Omega}{i}$, Ω – частота вращения ЭД, i – передаточное отношение редуктора.

Согласно принципу селективной инвариантности, полином, формирующий математическую модель возмущения (2.1) и вводимый в знаменатель передаточной функции (ПФ) регулятора, определяется в данном случае в виде

$$G'(s) = s \cdot (s^2 + \omega_1^2) = s \cdot G(s). \quad (2.2)$$

Регулятор с такой моделью возмущения приобретает интегральную и колебательную составляющие, которые в условиях действия отрицательной ОС в совокупности обеспечивают астатизм 1-го порядка, т.е. нулевую статическую ошибку от действия постоянной составляющей момента, и противофазную компенсацию его гармонической составляющей в установившемся режиме работы. Появление дополнительных нулей ПФ системы по управляющему воздействию устраняется соответствующим внеконтурным формирователем сигнала (префильтром).

Для конкретизации и облегчения восприятия процедур синтеза, обеспечения возможности сопоставления результатов, полученных в различных структурных реализациях ЭМС, примем единый объект управления (рис. 1.7,а), со значениями параметров, приведенными в главе 1.

Предположим, что требуется обеспечить время нарастания переходной характеристики системы регулирования частоты вращения в линейной зоне ее работы не более 50 мс при отсутствии перерегулирования и нулевую статическую ошибку по скорости от действия момента нагрузки вида

$$M_H(t) = 41,1 + 8,22 \cdot \sin\left(\frac{\Omega}{i}t\right), \quad (2.3)$$

а также эффективную динамическую компенсацию возмущения с временем восстановления, равным времени регулирования. Будем анализировать переходные характеристики ЭМС при пуске на пониженную частоту вращения $\Omega = 15,7$ рад/с (что соответствует $\omega_1 = 1,57$ рад/с).

Для повышения робастных свойств синтезируемых САУ (исключения появления положительных ОС или неминимально-фазовых звеньев в составе регуляторов) пренебрежем в расчетах согласно рекомендациям [59] относительно малой постоянной времени $T_{СП}$. В результате этого ПФ объекта управления принимает вид

$$H_{oy}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0} = \frac{42570,6}{s^2 + 50s + 2651}, \quad (2.4)$$

где $A(s)$ – характеристический полином и $B(s) = b_0$.

Традиционным [17, 20] и структурно наиболее простым решением поставленной задачи, требующим измерения лишь выходной координаты ОУ, является астатическая ЭМС, представленная на рис. 2.1, а. Она имеет один контур управления с объединенным полиномиальным регулятором (ПР), включающим в свой состав МВ, и обозначается далее, как О(ПРМВ).

Синтез объединенного регулятора осуществляется при этом путем решения [17] полиномиального уравнения вида

$$A(s) \cdot s \cdot F(s) + B(s) \cdot E(s) = D(s), \quad (2.5)$$

где $E(s)$ и $s \cdot F(s)$ – полиномы числителя и знаменателя ПФ регулятора, причем $F(s) = G(s) \cdot V(s)$, $V(s)$ – вспомогательный полином, обеспечивающий техническую реализуемость регулятора; $D(s)$ – желаемый ХП синтезируемой системы ($E(s)$ принимается также в качестве ХП внеконтурного префильтра).

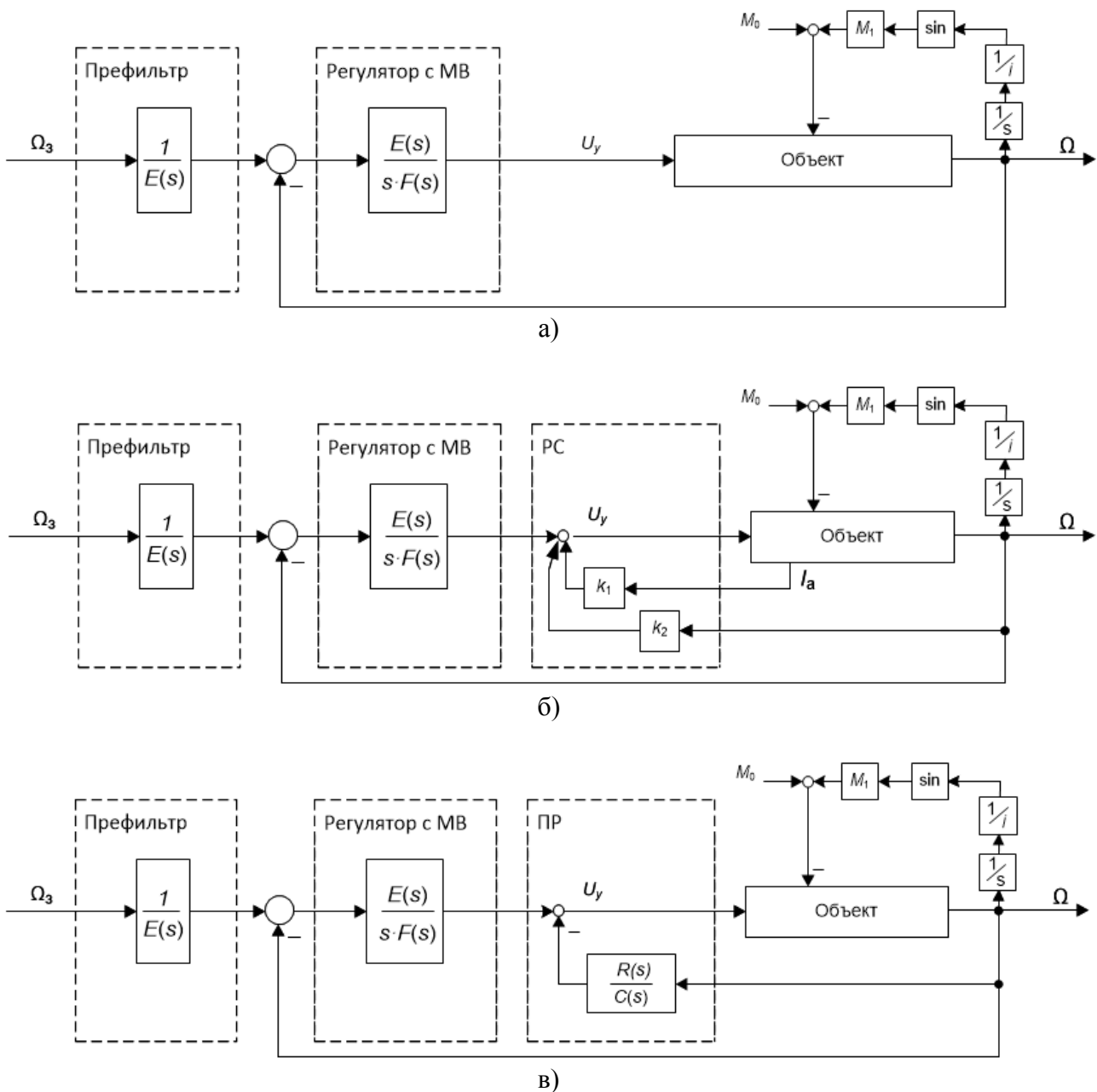


Рис. 2.1 Структурные схемы различных вариантов астатических СИ ЭМС

В соответствии с заданными требованиями динамики и выражениями (2.2) – (2.4) выберем в качестве $D(s)$ полином Ньютона 6-го порядка с величиной среднегеометрического корня (СГК) $\Omega_0 = 210 \text{ с}^{-1}$ что соответствует быстродействию 50 мс.

Для такой ЭМС развернутое уравнение (2.5) синтеза астатического ПР минимального порядка [62] принимает вид

$$(s^2 + 50s + 2651) \cdot s \cdot (s^2 + 1,57^2) \cdot (s + v_0) + 42570,6 \cdot (e_4 s^4 + e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_0) = (s + 210)^6.$$

Его решение в указанных условиях позволяет получить ПФ регулятора, вид и параметры которой приведены в первой строке табл.2.1.

Таблица 2.1. Структуры и параметры синтезированных регуляторов

№ САУ	Тип САУ	Используемые принципы управления	Структура и параметры регулятора
1	О(ПРМВ)	ПР, МВ	$\frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{14,055s^4 + 4275,467s^3 + 685261,526s^2 + 57562089,6 + 201467963,06}{s \cdot (s^2 + 1,57^2) \cdot (s + 1210)}$
2	ПРМВ-(РС)б	РС, РД, ПР, МВ	$\mathbf{K} = [-0,177 \quad -7,7]; \quad \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{2700s^2 + 315881,04s + 12320100}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$
3	ПРМВ-(ПР)б	ПР, РД, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0264s + 7,536}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{2700s^2 + 315881,04s + 12320100}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$
4	П(ПРМВ-РС)	П, РС, ПР, МВ	$\mathbf{K} = [-0,084 \quad -1,59]; \quad \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{5,33s^3 + 1574,97s^2 + 157495,891s + 5906250}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$
5	П(ПРМВ-ПР)	П, ПР, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,0123s + 0,593}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{5,33s^3 + 1574,97s^2 + 157495,891s + 5906250}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$
6	К(ПРМВ-РС)	КР, РС, ПР, МВ	$\mathbf{K} = [-0,14 \quad -4,64]; \quad \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{2,85s^3 + 1369,9s^2 + 123284,6s + 4438668,94}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$
7	К(ПРМВ-ПР)	КР, ПР, МВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,021s + 4,64}{0,0005s + 1}; \quad \frac{E(s)}{s \cdot F(s)} = \frac{2,85s^3 + 1369,9s^2 + 123284,6s + 4438668,94}{s \cdot (s^2 + 1,57^2)}$

Такая астатическая ЭМС способна удовлетворить основным заданным критериям качества, но характеризуется высокой степенью сложности регулятора (общий порядок звеньев равен 8) и, очевидно, будет обладать повышенной чувствительностью к воздействию помех.

Существенное упрощение регулятора может быть достигнуто в структуре астатической ЭМС, представленной на рис. 2.1, б и обозначенной как ПРМВ-(РС)б. Она содержит «быструю» внутреннюю подсистему на базе безынерционного РС, настраиваемую на быстроедействие, в 5-7 раз превышающее заданные динамические требования, а также внешний контур с ПР, содержащий модель возмущения.

Такая структура строится на основе сочетания принципов: РС, РД, ПР и МВ. Для синтеза ее регуляторов может быть предложена следующая расчетная процедура.

Методом МУ синтезируется безынерционный РС внутренней подсистемы с высоким быстродействием (7 мс). Для этого в качестве желаемого принимается ХП Ньютона 2-го порядка с величиной СГК $\Omega_{об} = 572 \text{ с}^{-1}$. Расчет матрицы коэффициентов ОС по току и скорости дает следующий результат: $\mathbf{K} = [-0,177 \quad -7,7]$.

При расчете внешнего ПР с МВ используется основное полиномиальное уравнение синтеза [17]

$$P(s) \cdot s \cdot F(s) + Q(s) \cdot E(s) = D(s), \quad (2.6)$$

где $P(s)$ и $Q(s)$ – ХП и полином воздействия ПФ внутренней подсистемы.

Высокое быстродействие внутренней подсистемы дает основание считать ее безынерционным звеном при синтезе внешнего ПР, т.е. принять при указанных параметрах: $P(s)=1$, $Q(s)=\frac{b_0}{\Omega_{об}^2}=0,13$. В соответствии с заданными требованиями динамики в качестве $D(s)$ выбирается полином Ньютона 3-го порядка с величиной СГК $\Omega_0 = 117 \text{ с}^{-1}$, что соответствует заданному быстродействию (50 мс).

В этом случае уравнение синтеза (2.6) принимает следующий развернутый вид

$$s \cdot (s^2 + 1,57^2) + 0,13 \cdot (e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = (s + 117)^3.$$

Его решение позволяет получить ПФ внешнего регулятора минимального порядка, параметры которой приведены во второй строке табл.2.1.

ЭМС такой структуры, использующая четыре из указанных выше принципов управления, способна удовлетворить основным заданным требованиям при невысокой сложности динамической части регулятора (общий порядок звеньев равен 5). Но она, очевидно, будет обладать повышенной чувствительностью к действию всех неучтенных при синтезе факторов, в частности, к запаздыванию сигналов в силовом преобразователе напряжения (СП).

Тот же принцип РД может быть использован в астатической ЭМС при измерении лишь одной выходной координаты (рис. 2.1, в). В этом случае

«быстрая» внутренняя подсистема регулирования скорости реализуется внутренним динамическим (ПР)б с полиномами числителя $-R(s)$ и знаменателя $-C(s)$ его ПФ. При этом уравнение синтеза внутреннего регулятора принимает вид

$$A(s) \cdot C(s) + B(s) \cdot R(s) = P(s). \quad (2.7)$$

При выборе в качестве $P(s)$ полинома Ньютона 2-го порядка с величиной СГК $\Omega_{об} = 572 \text{ с}^{-1}$ и наложении условия $C(s)=1$ решением (2.7) получаем дифференцирующий (ПР)б с ПФ $R(s)=0,0264s+7,536$, для технической реализуемости которого принимаем: $C(s)=0,0005s+1$.

Расчет внешнего ПР с МВ осуществляется так же, как это выполнялось для предыдущей структуры (рис. 2.1, б) по уравнению синтеза (2.6) при условии безынерционного характера внутренней подсистемы. Виды и параметры ПФ регуляторов для структуры ЭМС, представленной на рис. 2.1, в и обозначенной как ПРМВ-(ПР)б, приведены в третьей строке табл. 2.1.

Такая ЭМС, использующая динамические производные выходной координаты, может обеспечить более высокий коэффициент петлевого усиления и, как следствие, лучшую отработку возмущений по моменту нагрузки, но может вызвать существенное снижение помехоустойчивости системы.

Снижение чувствительности ЭМС к воздействию помех в измерительных каналах можно обеспечить за счет более «медленной» настройки внутренней подсистемы регулирования скорости с РС и ПР (рис. 2.1, б, в) и использования принципа последовательной коррекции (П). При этом умеренно (в 2 – 2,5 раза) ускоренная внутренняя подсистема аппроксимируется апериодическим звеном 1-го порядка, после чего осуществляется синтез внешнего ПР с МВ. В данном случае для синтеза внутренней подсистемы на базе РС или ПР по уравнению (2.7) принимается желаемый полином $P(s)$ 2-го порядка в форме Ньютона с величиной СГК $\Omega_{об} = 267 \text{ с}^{-1}$, что соответствует умеренному быстродействию

(24 мс) и позволяет при синтезе внешнего регулятора аппроксимировать ее передаточной функцией вида

$$H_{\text{вн}}(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{b_0/\Omega_{\text{об}}^2}{Ts+1} = \frac{0,6}{0,007s+1}.$$

В этом случае уравнение синтеза (2.6) с полиномом $D(s)$ 4-го порядка в форме Ньютона и значением $\Omega_0 = 150 \text{ с}^{-1}$ принимает следующий развернутый вид

$$(0,007s+1) \cdot s \cdot (s^2 + 1,57^2) + 0,6 \cdot (e_3s^3 + e_2s^2 + e_1s + e_0) = (s+150)^4.$$

Полученные выражения и параметры полиномов ПФ и коэффициенты ОС регуляторов обоих вариантов ЭМС, обозначенных соответственно как П(ПРМВ-РС) и П(ПРМВ-ПР) приведены в табл. 2.1.

Однако можно предположить, что применение принципа последовательной коррекции, сопровождающееся погрешностями аппроксимации внутренних подсистем звеньями более низкого порядка, приведет к соответствующему ухудшению отработки возмущений по моменту нагрузки в сравнении с другими вариантами ЭМС. При этом суммарный порядок звеньев регуляторов рассматриваемых систем возрастает до 6 и 7 соответственно.

Определенный компромисс между качеством отработки возмущений, действующих в прямом канале (на вал ЭД) и в канале измерения скорости, при сохранении степени сложности регуляторов могут обеспечить аналогичные структуры ЭМС, обозначенные как К(ПРМВ-РС) и К(ПРМВ-ПР). Они строятся по тому же каскадному принципу (рис. 2.1, б, в), но без аппроксимации и понижения порядка внутренней подсистемы регулирования скорости.

Синтез этих вариантов ЭМС проводится в два этапа по направлению от внешнего контура системы к внутреннему.

На первом этапе составляется уравнение синтеза (2.6), в правую часть которого вводится желаемый ХП $D(s)$ 5-го порядка (в данном случае в форме Ньютона с величиной $\Omega_0 = 180 \text{ с}^{-1}$, соответствующей быстродействию в 50 мс).

В качестве полинома $P(s)$ задается общий вид желаемого ХП внутренней

подсистемы 2-го порядка (в данном случае – также форма Ньютона) с неизвестным значением СГК $\Omega_{об}$. При этом, как и в двух предыдущих вариантах ЭМС, не требуется введение вспомогательного полинома $V(s)$. Полином $Q(s)$ заменяется коэффициентом $b_0 = 42570,6$. Определению подлежат параметры полинома $E(s)$ регулятора с моделью возмущения, а также величина СГК полинома $P(s) - \Omega_{об}$. Для синтезируемых вариантов ЭМС получаем развернутый вид уравнения (2.6)

$$(s + \Omega_{об})^2 \cdot s \cdot (s^2 + 1,57^2) + 42570,6 \cdot (e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = (s + 180)^5,$$

решение которого дает значения коэффициентов полинома $E(s)$, приведенные в табл. 2.1, и величину $\Omega_{об} = 450 \text{ с}^{-1}$, определяющую компромиссное быстродействие внутренней подсистемы (15 мс).

На втором этапе осуществляется синтез регуляторов внутренней подсистемы – соответственно РС или ПР для ЭМС на рис. 2.1, б или рис. 2.1, в. Процедуры этого синтеза аналогичны описанным выше для регуляторов (РС)б и (ПР)б с той лишь разницей, что в качестве желаемого ХП принимается полученный на первом этапе синтеза полином $P(s) = (s + 450)^2$.

Полная информация о структурах и параметрах регуляторов всех типов синтезированных ЭМС с указанием принципов управления, заложенных в их основу, представлена в табл. 2.1.

Очевидно, что каждый из синтезированных вариантов ЭМС будет обладать своими отличительными достоинствами и недостатками, обусловленными не только особенностями конкретного ОУ, но и общими закономерностями применения тех или иных принципов управления.

2.2. Исследование возможностей и структурная оптимизация селективно-инвариантных ЭМС

Исследование проводится путем постановки детализированных вычислительных экспериментов с моделями синтезированных ЭМС средствами программного комплекса MATLAB.

Рассчитываются переходные характеристики всех вариантов ЭМС при отработке управляющего воздействия, подтверждается их идентичность и соответствие заданным требованиям. Оценивается качество отдельной отработки (в момент времени $t = 1$ с) ступенчатого изменения постоянной составляющей момента нагрузки (фактор $M_{\text{=}}$) и воздействия его гармонической составляющей (фактор $M_{\text{~}}$). Графики указанных переходных процессов приведены на рис. 2.2, 2.3, где номера кривых соответствуют порядковым номерам ЭМС в табл. 2.1.

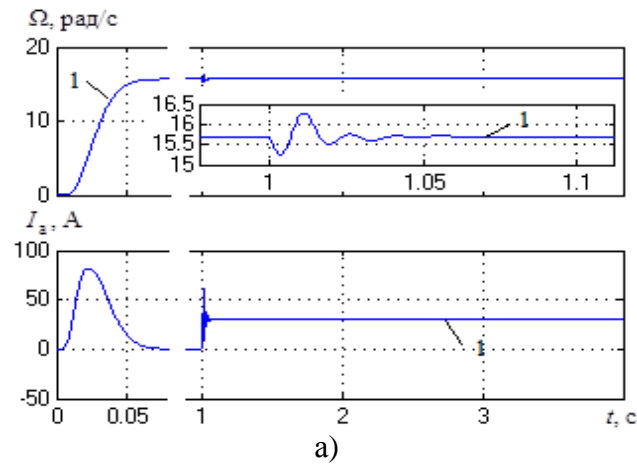
Путем проведения многократных вычислительных экспериментов с моделями ЭМС определяются диапазоны допустимых вариаций момента инерции механической части (фактор $J = \text{var}$) и максимальные значения времени «чистого» запаздывания τ_{max} сигнала в СП (фактор $e^{-\tau s}$, $\tau = \text{var}$), при которых системы сохраняют устойчивость. Полученные значения указанных факторов, а также суммарный порядок динамических звеньев регуляторов (фактор $N_{\text{рег}}$) синтезированных ЭМС приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Результаты вычислительных экспериментов с моделями ЭМС

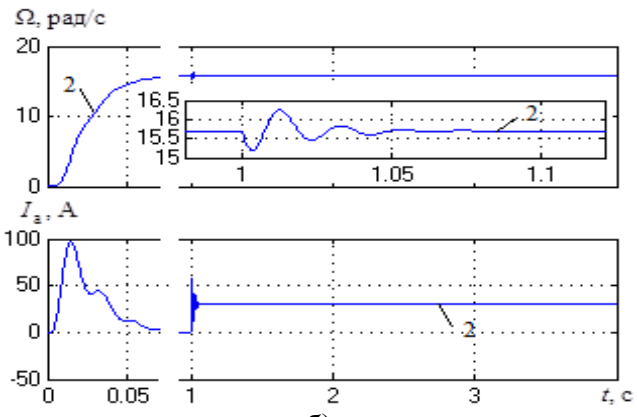
№ САУ	Тип САУ	Факторы качества ЭМС		
		$J = \text{var}$, кг·м ²	$e^{-\tau s}$ ($\tau = \text{var}$, мс)	$N_{\text{рег}}$
1	О(ПРМВ)	[0,09 0,38]	0,0014	8 (4)*
2	ПРМВ-(РС)б	[0,08 0,32]	0,0012	5 (3)
3	ПРМВ-(ПР)б	[0,13 0,38]	0,0008	6 (4)
4	П(ПРМВ-РС)	[0,17 0,57]	0,0011	6 (3)
5	П(ПРМВ-ПР)	[0,12 0,22]	0,00096	7 (4)
6	К(ПРМВ-РС)	[0,09 0,53]	0,0014	6 (3)
7	К(ПРМВ-ПР)	[0,12 0,65]	0,00092	7 (4)

*() – порядок динамических звеньев регуляторов, представленных в канонической форме наблюдаемости

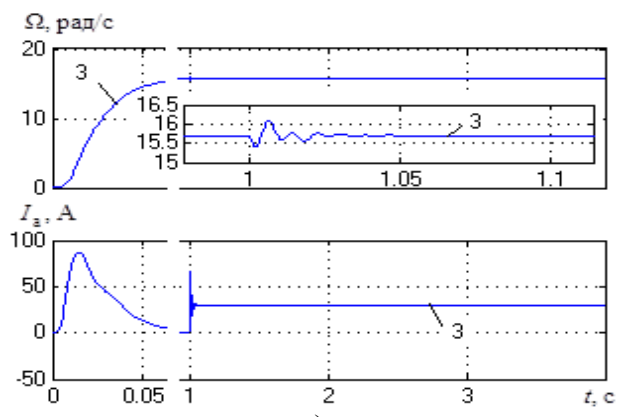
Помехоустойчивость ЭМС (фактор Π_{\sim}) оценивается по уровню пульсаций выходного сигнала скорости при наложении аддитивной помехи в виде «белого шума» с мощностью $N = 0,00001$ Вт/Гц в канале ее измерения. Графики тока и скорости для различных вариантов систем (табл. 2.1) в соответствии с принятой нумерацией приведены на рис. 2.4.



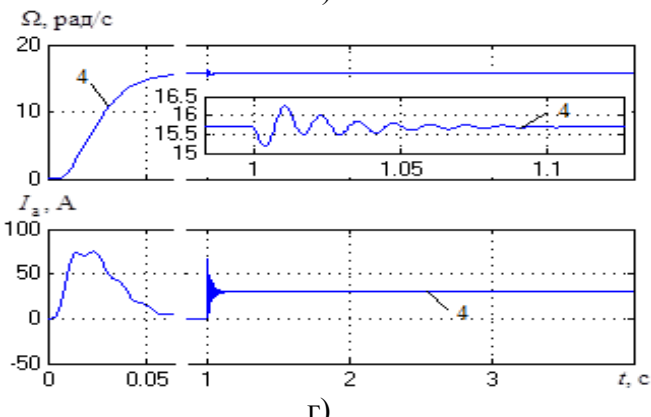
а)



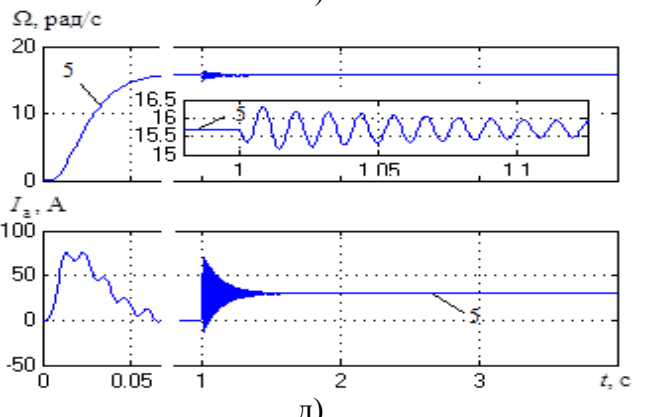
б)



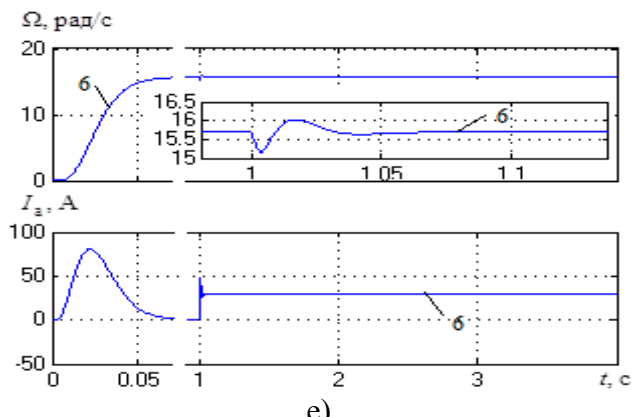
в)



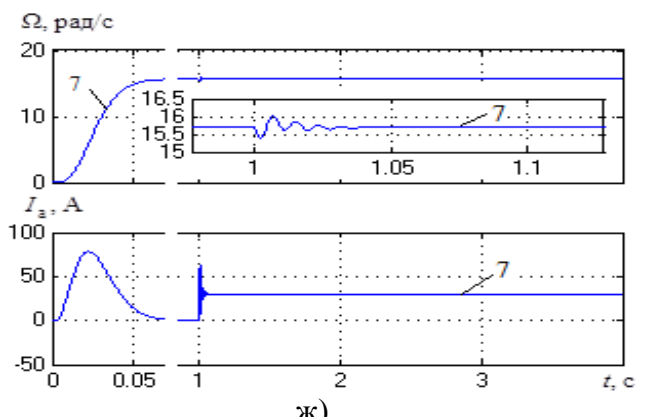
г)



д)

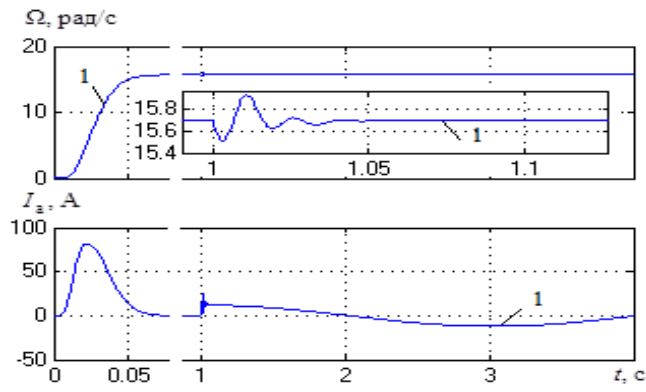


е)

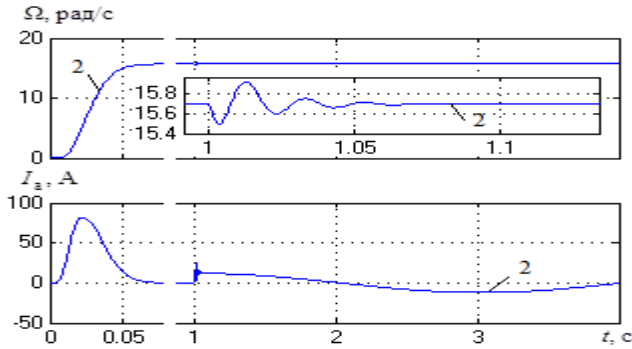


ж)

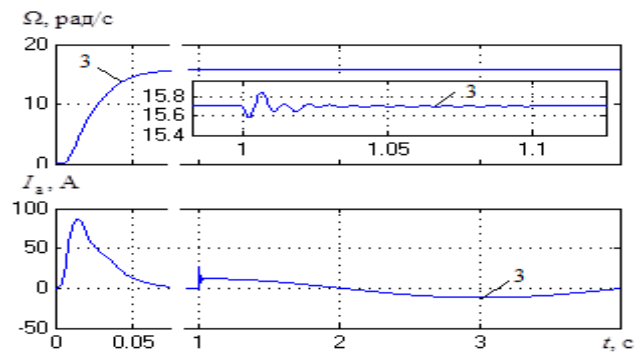
ис. 2.2. Оценка качества отработки постоянной составляющей момента нагрузки:
а – 3 балла; б – 2 балла; в – 5 баллов; г – 1 балл; д – 1 балл; е – 4 балла; ж – 5 баллов



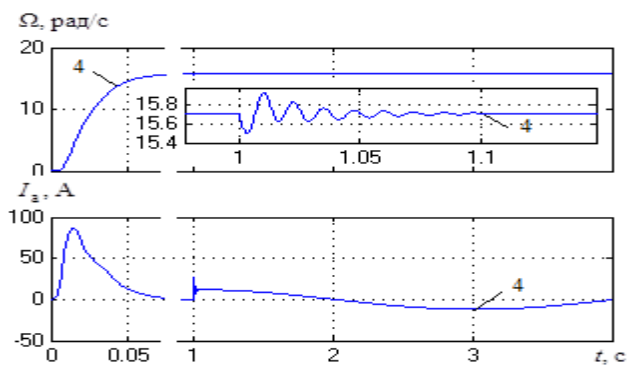
а)



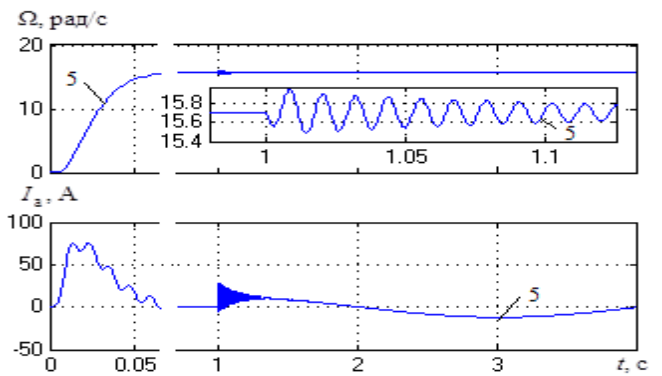
б)



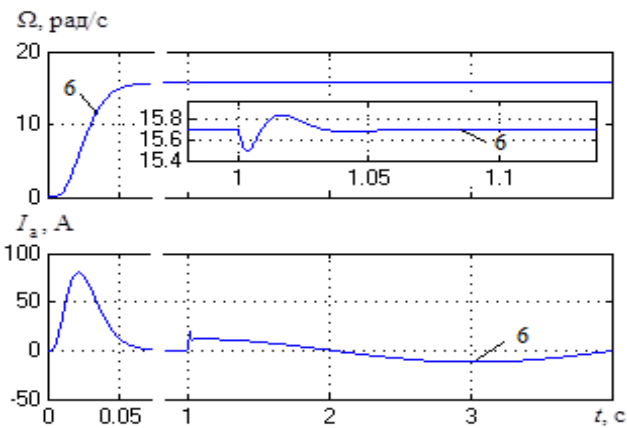
в)



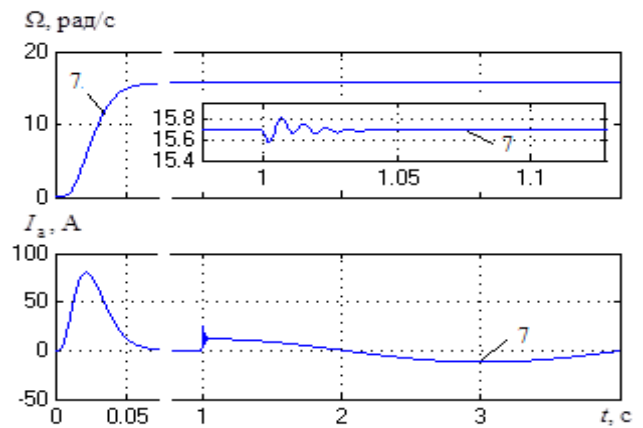
г)



д)



е)



ж)

Рис. 2.3. Оценка качества отработки гармонического момента нагрузки:
а – 3 балла; б – 2 балла; в – 5 баллов; г – 1 балл; д – 1 балл; е – 4 балла; ж – 5 баллов

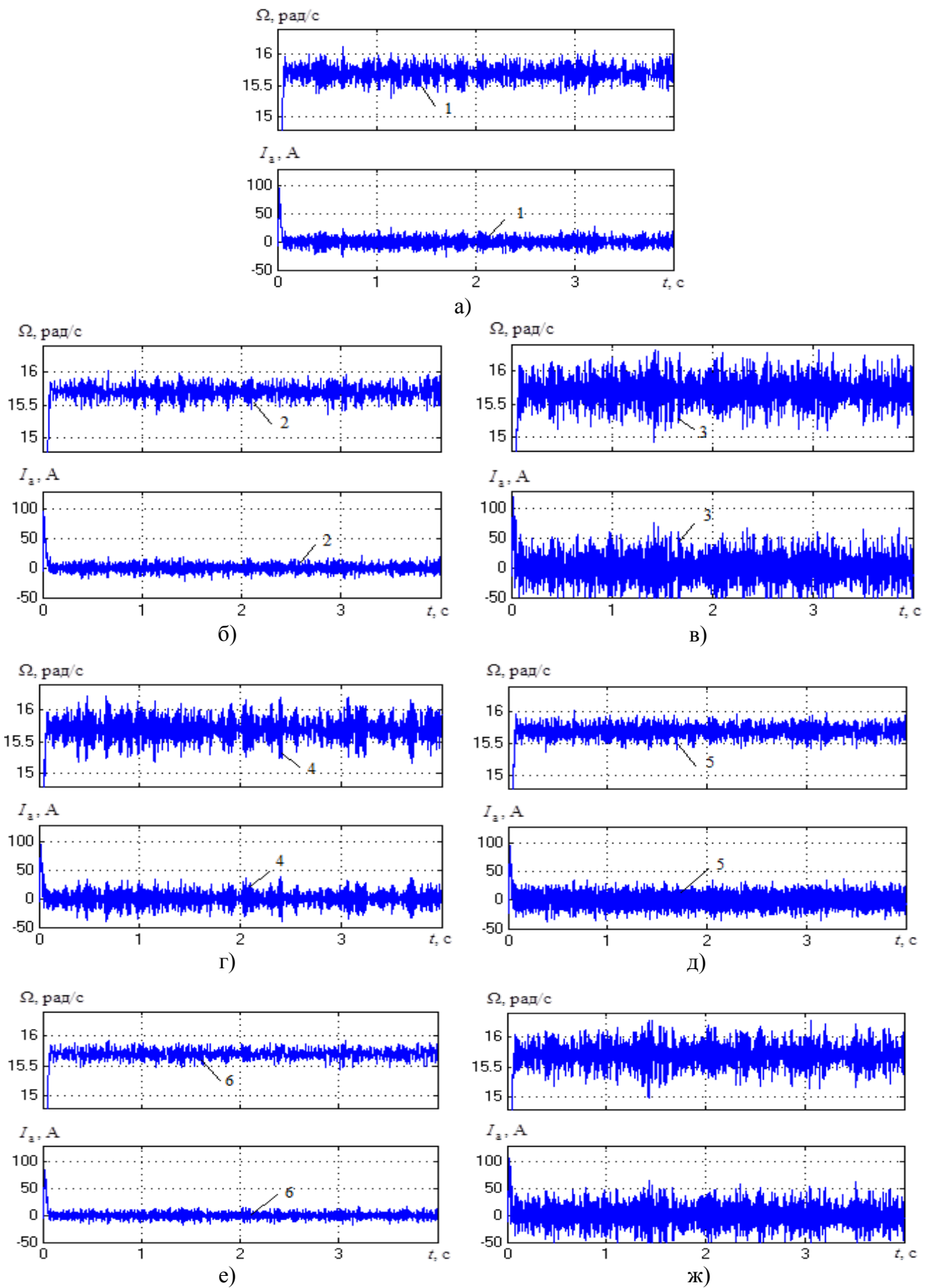


Рис. 2.4. Оценка реакции систем на введение помехи в цепи измерителя скорости:
а – 3 балла; б – 4 балла; в – 1 балл; г – 4 балла; д – 3 балла; е – 5 баллов; ж – 2 балла

Результаты исследований в виде графиков переходных процессов и числовых значений указанных факторов, полученных в ходе экспериментов, оцениваются по традиционной 5-бальной шкале экспертным методом и сводятся в итоговую табл. 2.3. Там же приводится суммарная оценка качества Q_{Σ} каждой ЭМС, полученная при условии одинаковой значимости перечисленных факторов.

Таблица 2.3. Результаты оценки качества ЭМС по комплексу заданных требований

№ САУ	Тип САУ	Оценки факторов качества ЭМС						
		M_{\sim}	$M_{=}$	$J = \text{var}$	Π_{\sim}	$e^{-\tau s}$	Сложность $N_{\text{рег}}$	Q_{Σ}
1	О(ПРМВ)	3	3	4	3	5	1 (4)	19 (22)
2	ПРМВ-(РС)б	2	2	4	4	4	5 (5)	21 (21)
3	ПРМВ-(ПР)б	5	5	2	1	1	4 (4)	18 (18)
4	П(ПРМВ-РС)	1	1	3	4	4	4 (5)	17 (18)
5	П(ПРМВ-ПР)	1	1	1	3	3	3 (4)	12 (13)
6	К(ПРМВ-РС)	4	4	5	5	5	4 (5)	27 (28)
7	К(ПРМВ-ПР)	5	5	5	2	2	3 (4)	22 (23)

Следует отметить, что на этом этапе не исследуется работа систем при значительных изменениях рабочих скоростей и частот гармонического возмущения нагрузочного момента, поскольку эти факторы создают собственную проблематику, которая, очевидно, должна разрешаться применением дополнительных адаптивных алгоритмов управления.

Полученные результаты исследований, отражающие степень выполнения всего комплекса заданных требований, наглядно отражают достоинства и недостатки каждого варианта ЭМС и позволяют проектировщикам решать задачи структурной оптимизации по наиболее предпочтительной схеме компромиссов.

2.3. Модификация разработанных вариантов селективно-инвариантных ЭМС

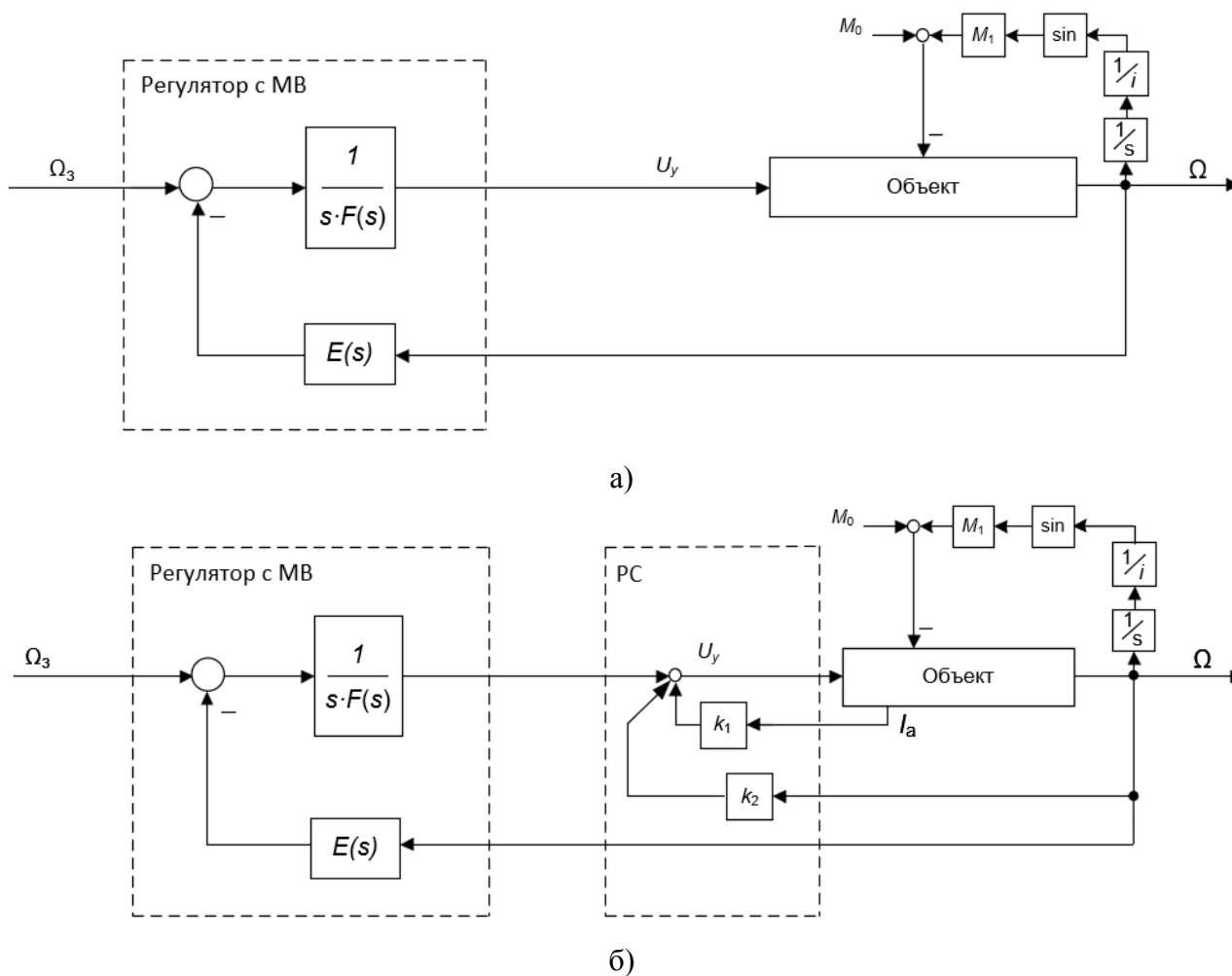
Совмещение принципа внутренней модели возмущения с другими принципами САУ позволило получить самые разнообразные сочетания

показателей качества и обеспечить достижение основного показателя ЭМС – отработки возмущения по моменту нагрузки ЭД.

Однако степень сложности регуляторов, определяемая общим порядком их динамических звеньев, в предложенных структурных решениях может не удовлетворять проектировщика.

Исключение из состава управляющего устройства префильтров позволит существенно снизить порядок регуляторов. Структурные схемы систем, синтезированных в пункте 2.1, в этом случае примут вид, изображенный на рис. 2.5, удобный для реализации в КФН.

Применение двухвходовой (расширенной) канонической формы наблюдаемости (КФН) [18, 65] позволяет достичь снижения порядка регуляторов в предложенных системах.



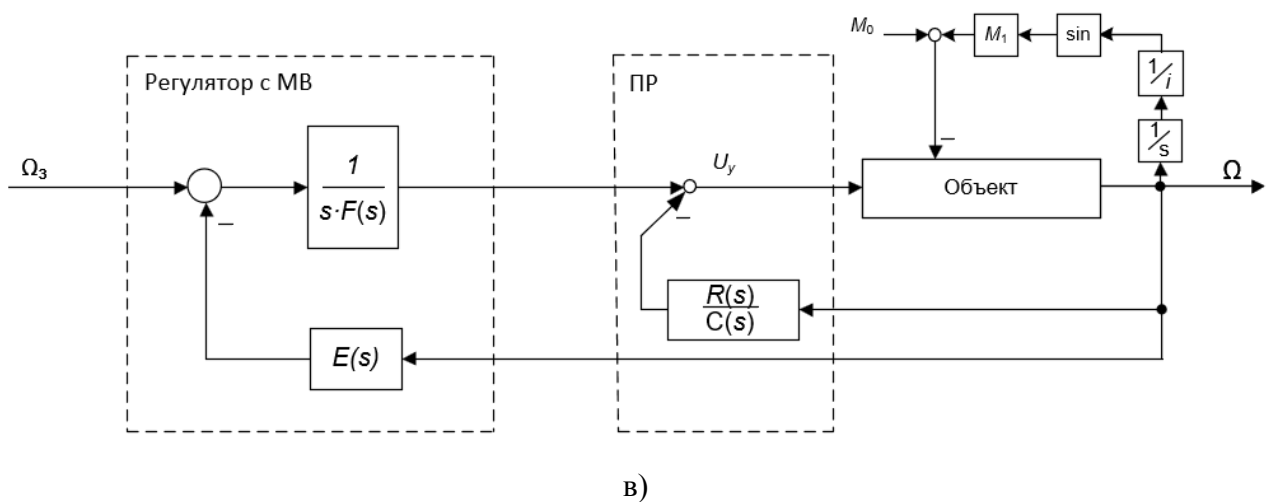


Рис. 2.5. Структурные схемы различных вариантов астатических СИ ЭМС

В качестве примера реализации предложенного метода рассмотрим синтез регулятора наиболее простого структурного решения, представленного на рис. 2.5, а, и обозначаемого как О(ПРМВ).

Для данной структуры справедливо полиномиальное уравнение вида

$$U_y \cdot s \cdot F(s) = \Omega_3 - E(s) \cdot \Omega, \quad (2.7)$$

где $E(s)$ и $s \cdot F(s)$ – полиномы числителя и знаменателя ПФ регулятора, Ω_3, Ω – заданное и действительное значения частоты вращения ЭД; U_y – управляющее напряжение силового преобразователя (СП).

С учетом выражений параметров ПФ данного регулятора, приведённых в первой строке табл. 2.1, уравнение (2.7) может быть записано в следующей форме

$$U_y = \frac{1}{s^4} \cdot (\Omega_3 - e_0 \cdot \Omega) + \frac{1}{s^3} \cdot (-e_1 \cdot \Omega - f_1 \cdot U_y) + \frac{1}{s^2} \cdot (-e_2 \cdot \Omega - f_2 \cdot U_y) + \frac{1}{s} \cdot (-e_3 \cdot \Omega - f_3 \cdot U_y) + (-e_4 \cdot \Omega) \quad (2.8)$$

Полученная по уравнению (2.8) структурная схема объединенного регулятора, представленная в расширенной КФН, приведена на рис. 2.6.

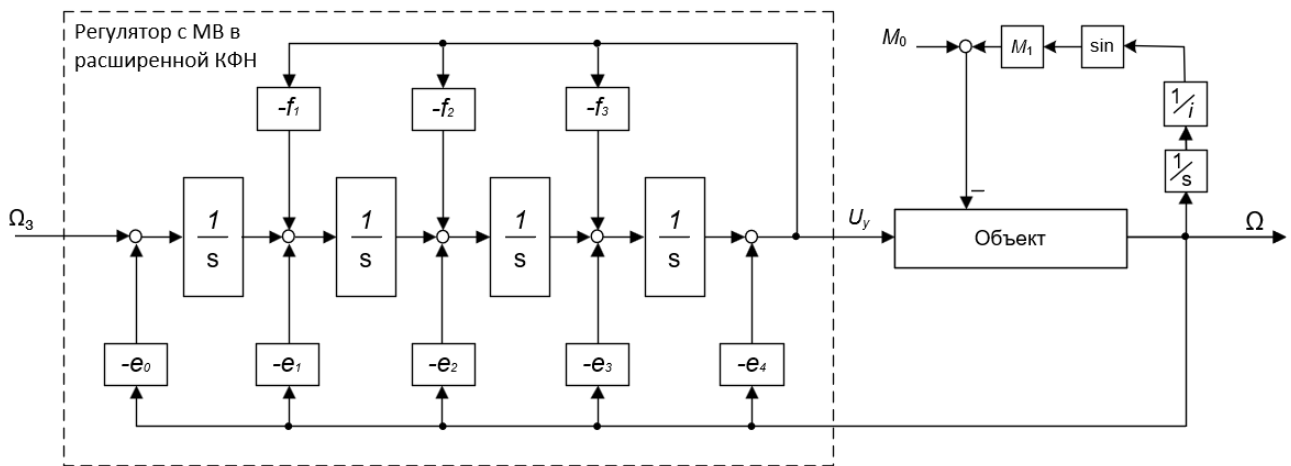


Рис. 2.6. Структурная схема объединенного регулятора в расширенной КФН

Проведенные по заданному комплексу основных и дополнительных показателей качества исследования показали полное совпадение с результатами, полученными для синтезированных в пункте 2.1 вариантов регуляторов, но исключение из состава УУ префильтров позволило существенно понизить порядок регуляторов. Суммарный порядок динамических звеньев регуляторов (фактор $N_{\text{рег}}$) для синтезированных таким образом ЭМС приведен в табл. 2.2. (данные указаны в скобках).

Однако следует отметить, что исходные структуры регуляторов (п. 2.1) более удобны при программной реализации.

Выводы

1. Сочетание принципа внутренней модели возмущения с принципами разделения темпов движения локальных подсистем управления, регулирования состояния по внутренним координатам и по выходу САУ, каскадного и подчиненного регулирования координат позволяет существенно повысить структурное разнообразие селективно-инвариантных электромеханических систем и расширить их функциональные возможности управления различными объектами.

2. Объединение модальных методов параметрического синтеза безынерционных и динамических регуляторов состояния и «входа-выхода» с методами синтеза каскадных регуляторов в системах подчиненного

регулирования координат, а также применение методов редуцирования регуляторов и их модификации с использованием канонической формы наблюдаемости позволяет обеспечить оперативный автоматизированный расчет параметров управляющих устройств во всех предложенных структурах селективно-инвариантных ЭМС.

3. Исследование разработанных вариантов селективно-инвариантных ЭМС по комплексу определяющих показателей качества, выполненное путем детализированных вычислительных экспериментов, позволяет выявить их достоинства, недостатки и области предпочтительного использования, облегчает выбор оптимального структурного решения по заданной схеме компромиссов в конкретных практических применениях.

4. Несмотря на достигнутые преимущества разработанных вариантов селективно-инвариантных ЭМС и их широкие возможности, качество отработки возмущений по моменту нагрузки ЭД, а также уровень сложности регуляторов в предложенных структурных решениях могут не удовлетворить проектировщика.

Это требует разработки более совершенных структурных решений СИ ЭМС, позволяющих повысить эффективность отдельных показателей качества или всего комплекса определяющих показателей качества.

Глава 3. Структурно-параметрический синтез и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с распределенной моделью возмущения

Вводные замечания

Предложенные в главе 2 структурные решения селективно-инвариантных ЭМС позволяют получить различные сочетания показателей качества, однако полученные результаты не всегда могут в полной мере удовлетворить требования проектировщиков, обусловленные особенностями работы систем в конкретных условиях эксплуатации.

Это делает актуальным поиск новых структурных решений селективно-инвариантных ЭМС, позволяющих обеспечить как улучшение отдельных показателей качества, так и расширение возможностей получения разнообразных сочетаний их основных свойств.

Возможным подходом к решению данной задачи может быть дальнейшее расширение используемых принципов управления за счет дополнительного разделения модели возмущения (РМВ) на интегральную и колебательную составляющие с перемещением одной из них в «быструю» внутреннюю подсистему объединенной ЭМС.

В данной главе выполняется структурно-параметрический синтез, и проводятся сравнительные исследования возможностей различных структурных реализаций ЭМС, построенных с применением распределенных моделей гармонического возмущения [31, 33, 57, 89]. На основе полученных результатов осуществляются сравнение и структурная оптимизация систем по заданному комплексу основных и дополнительных критериев качества.

3.1. Особенности построения и расчета управляющих устройств

3.1.1. Перенос интегральной составляющей модели возмущения в «быструю» внутреннюю подсистему ЭМС

Для обеспечения возможности сопоставления результатов синтеза различных структурных реализаций ЭМС продолжим применять единый объект управления (рис. 1.7, а) со значениями параметров и техническими требованиями к системе, принятыми в главах 1 и 2.

Перемещение интегральной составляющей МВ в «быстрый» внутренний контур управления ЭМС призвано обеспечить улучшение качества отработки постоянной составляющей момента нагрузки ЭД и снижение (в той или иной мере) порядка полиномиального регулятора внешнего контура, содержащего колебательную часть МВ. При этом соответственно упрощается передаточная функция внеконтурного префильтра, предназначенного для компенсации влияния нулей в ПФ системы, появляющихся при ее синтезе.

При этом наименьшей сложностью регуляторов, определяемой суммарным порядком их динамических звеньев, будет отличаться ЭМС, обозначаемая далее, как ПРМВ_к-(РС_и)б, структура которой представлена на рис. 3.1, а. Она содержит «быструю» внутреннюю подсистему на базе астатического РС с интегральной составляющей МВ, настраиваемую на быстроедействие, в 5-7 раз превышающее заданные динамические требования, а также внешний контур с ПР, содержащий колебательную составляющую МВ.

Такая структура формируется на основе сочетания принципов РС, РД, ПР и РМВ. Для синтеза ее регуляторов может использоваться следующая расчетная процедура.

Методом МУ синтезируется астатический РС внутренней подсистемы, наделяемой высоким быстроедействием (7 мс). Для этого в качестве желаемого принимается характеристический полином Ньютона 3-го порядка с величиной $СГК\Omega_{об} = 833 \text{ с}^{-1}$. Расчет матрицы коэффициентов ОС по току и скорости дает следующий результат: $\mathbf{K} = [-0,4 \quad -48 \quad -13424]$.

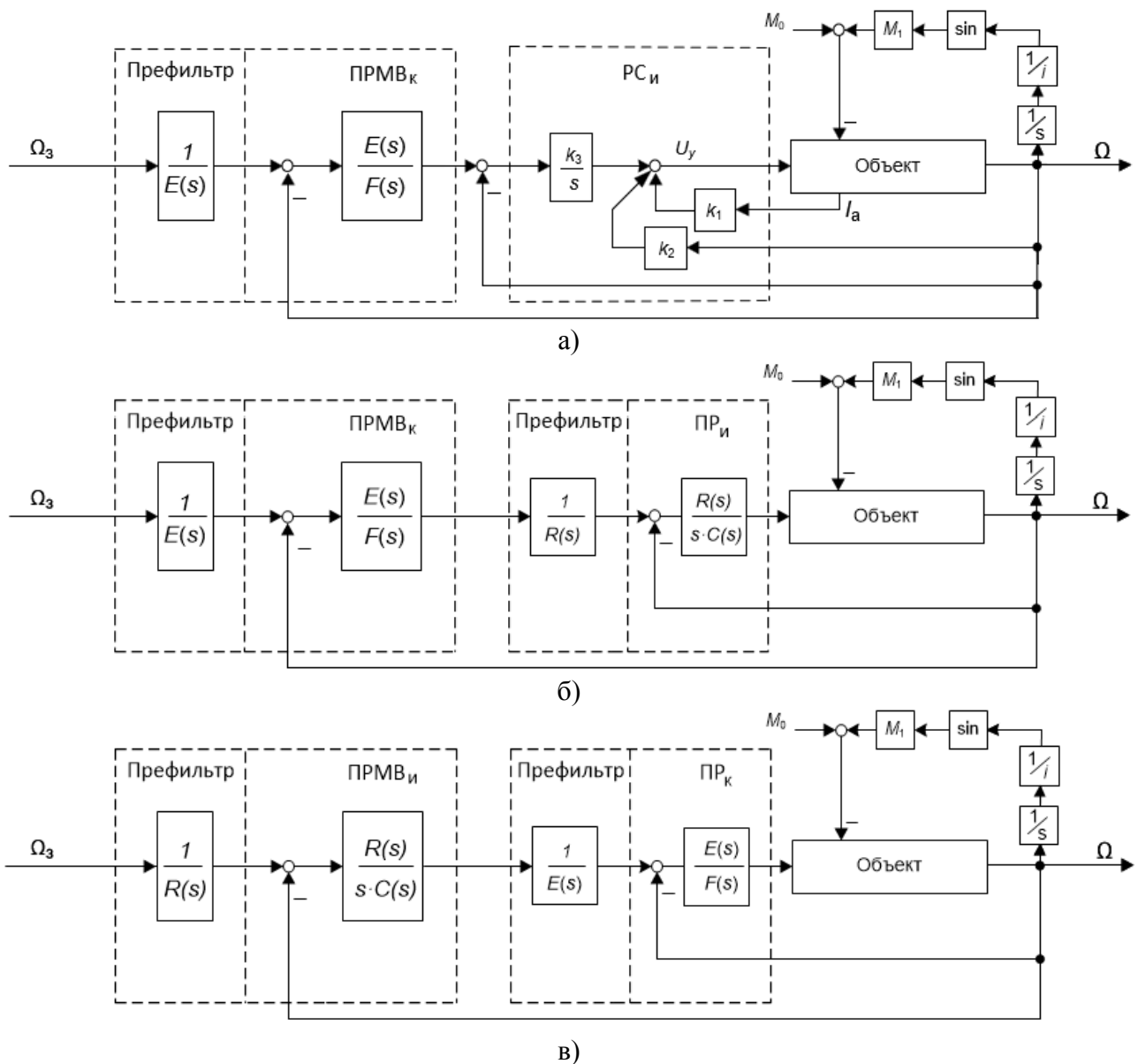


Рис. 3.1. Структурные схемы различных вариантов астатических СИ ЭМС с разделённой МВ

При расчете внешнего ПР с колебательной составляющей МВ используется основное полиномиальное уравнение синтеза [17]

$$P(s) \cdot F(s) + Q(s) \cdot E(s) = D(s), \quad (3.1)$$

где $P(s)$ и $Q(s)$ – ХП и полином воздействия ПФ внутренней подсистемы, $F(s)$ и $E(s)$ – ХП и полином воздействия регулятора.

Высокое быстродействие внутренней подсистемы с интегральным РС дает основание считать ее безынерционной при синтезе внешнего ПР, т.е. принимать: $P(s)=1$, $Q(s)=1$. В соответствии с заданными требованиями динамики в качестве $D(s)$ выбирается полином Ньютона 2-го порядка с

величиной СГК $\Omega_0 = 80 \text{ с}^{-1}$, что соответствует заданному быстродействию (50 мс).

В этом случае уравнение синтеза (3.1) принимает следующий развернутый вид

$$1 \cdot (s^2 + 1,57^2) + 1 \cdot (e_1 s + e_0) = (s + 80)^2.$$

Его решение позволяет получить ПФ внешнего регулятора минимального порядка, параметры которой приведены в первой строке табл. 3.1.

Такая ЭМС способна обеспечить выполнение заданных технических требований при высоком качестве обработки внешних возмущений и минимальной степени сложности регуляторов (общий порядок звеньев равен 4).

Однако такая ЭМС, очевидно, будет обладать повышенной чувствительностью к неучтенным при синтезе факторам, например, к запаздыванию сигналов в силовом преобразователе напряжения (СП), и потребует для реализации расширенный комплект измерительных устройств.

Сочетание тех же принципов – РД и РМВ – может быть обеспечено при измерении одной выходной координаты в структуре ЭМС, представленной на рис. 3.1, б и обозначенной как ПРМВ_к-(ПР_и)б. В этом случае внутренняя «быстрая» подсистема реализуется динамическим (ПР_и)б с полиномами числителя – $R(s)$ и знаменателя – $s \cdot C(s)$ его ПФ. При этом уравнение синтеза внутреннего регулятора принимает вид

$$A(s) \cdot s \cdot C(s) + B(s) \cdot R(s) = P(s). \quad (3.2)$$

При выборе в качестве $P(s)$ полинома Ньютона 4-го порядка с величиной СГК $\Omega_{об} = 750 \text{ с}^{-1}$ (для быстродействия 10 мс) уравнение (3.2) принимает следующий развернутый вид:

$$(s^2 + 50s + 2651) \cdot s \cdot (c_2 s + c_1) + 42570,6 \cdot (r_2 s^2 + r_1 s + r_0) = (s + 750)^4.$$

Расчет внешнего ПР с МВ осуществляется так же, как это выполнялось для предыдущей структуры (рис. 3.1, а) по уравнению синтеза (3.1) при условии безынерционного характера внутренней подсистемы. Виды и параметры ПФ

регуляторов для этой структуры ЭМС, а также использованные в ней принципы управления приведены во второй строке табл. 3.1.

Таблица 3.1. Структуры и параметры синтезированных регуляторов

№ САУ	Тип САУ	Используемые принципы управления	Структура и параметры регулятора
1	ПРМВ _к -(РС _и)б	РС, РД, ПР, РМВ	$\mathbf{K} = [-0,4 \quad -48 \quad -13424]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{160s + 6397,535}{(s^2 + 1,57^2)}$
2	ПРМВ _к -(ПР _и)б	ПР, РД, РМВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{75,753s^2 + 39456,328s + 7,433 \cdot 10^6}{s \cdot (s + 2950)}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{160s + 6397,535}{(s^2 + 1,57^2)}$
3	П(ПРМВ _к -РС _и)	П, РС, ПР, РМВ	$\mathbf{K} = [-0,18 \quad -10,53 \quad -1377,7]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,106s^2 + 246,387s + 9607,213}{(s^2 + 1,57^2)}$
4	П ₂ (ПРМВ _к -РС _и)	П, РС, ПР, РМВ	$\mathbf{K} = [-0,18 \quad -10,53 \quad -1377,7]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,0001s^3 + 0,56s^2 + 156,04s + 5849,8}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (0,0005s+1)}$
5	П(ПРМВ _к -ПР _и)	П, ПР, РМВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{32,8829s^2 + 11623,763s + 1,468}{s \cdot (s + 1950)}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{1,106s^2 + 246,387s + 9607,213}{(s^2 + 1,57^2)}$
6	К(ПРМВ _к -РС _и)	КР, РС, ПР, РМВ	$\mathbf{K} = [-0,14 \quad -6,21 \quad -627,1]$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,00199s^3 + 1,1599s^2 + 194,375s + 6995,935}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (0,0005s+1)}$
7	К(ПРМВ _к -ПР _и)	КР, ПР, РМВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{19,902s^2 + 5601,922s + 559479,26}{s \cdot (s + 1521,388)}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{0,00199s^3 + 1,1599s^2 + 194,375s + 6995,935}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (0,0005s+1)}$
8	ПР _и -(ПРМВ _к)б	ПР, РД, РМВ	$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{554831192609,648}{s}$; $\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{184,983s^3 + 170967,568s^2 + 77060211,62s + 13870839756,0879}{(s^2 + 1,57^2) \cdot (s+4450)}$

В данной системе измерение лишь одной выходной координаты объекта приводит к существенному усложнению регуляторов (их общий порядок возрастает до 7). Кроме этого, высокая чувствительность к наличию неучтенных факторов «быстрой» внутренней подсистемы может дополниться повышенной чувствительностью к воздействию помех из-за возрастания порядка дифференцирующих звеньев.

Использование принципа последовательной коррекции (П) и более «медленная» настройка внутренней подсистемы регулирования скорости с РС_И и ПР_И в структурах на рис. 3.1, а, б может обеспечить снижение чувствительности ЭМС к воздействию помех и влиянию запаздывания сигналов СП. В этом случае при синтезе внешнего ПР с МВ_К по уравнению (3.1) умеренно (в 2 – 2,5 раза) ускоренная внутренняя подсистема аппроксимируется аperiodическим звеном 1-го порядка.

Для синтеза внутренней подсистемы на базе РС_И в качестве желаемого принимается ХП Ньютона 3-го порядка с величиной СГК $\Omega_{об} = 390 \text{ с}^{-1}$, что позволяет при синтезе внешнего ПР с МВ_К аппроксимировать ее передаточной функцией вида

$$H_{вн}(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{1}{Ts+1} = \frac{1}{0,006s+1}. \quad (3.3)$$

Уравнение (3.1) синтеза внешнего регулятора при выборе в качестве $D(s)$ полинома Ньютона 3-го порядка с величиной СГК $\Omega_{об} = 117 \text{ с}^{-1}$, соответствующему заданному быстродействию (50 мс), принимает вид

$$(0,006s+1) \cdot (s^2 + 1,57^2) + 1 \cdot (e_2s^2 + e_1s + e_0) = (s+117)^3.$$

Полученные значения коэффициентов ОС, выражения и параметры полиномов ПФ регуляторов для данной ЭМС, обозначенной как П(ПРМВ_К-РС_И), приведены в третьей строке табл. 3.1.

Применение принципа последовательной коррекции при использовании РС_И в составе внутреннего контура управления незначительно повышает степень сложности регуляторов (порядок звеньев равен 5), но сопровождается погрешностями аппроксимации внутренней подсистемы звеном низкого порядка. Это может привести к определенным ухудшениям заданных показателей качества ЭМС в сравнении с другими структурными решениями.

Снизить погрешности аппроксимации позволяет представление внутренней подсистемы аperiodическим звеном 2-го порядка с ПФ вида

$$H_{вн}(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{k}{(T_1s+1) \cdot (T_2s+1)} = \frac{86505}{s^2 + 588,2352s + 86505}.$$

Уравнение (3.1) синтеза внешнего регулятора при выборе в качестве $D(s)$ полинома Ньютона 4-го порядка с величиной СГК $\Omega_0 = 150 \text{ с}^{-1}$, соответствующего заданному быстродействию (50 мс), принимает вид

$$(s^2 + 588,2352s + 86505) \cdot (s^2 + 1,57^2) + 86505 \cdot (e_3s^3 + e_2s^2 + e_1s + e_0) = (s + 150)^4.$$

Полученные значения коэффициентов ОС, выражения и параметры полиномов ПФ регуляторов для данной ЭМС, обозначенной как П2(ПРМВ_к-РС_и), приведены в четвертой строке табл. 3.1. Из их анализа следует, что степень сложности регуляторов в этом случае существенно возрастает (суммарный порядок звеньев равен 7).

При синтезе внутренней подсистемы на базе ПР_и уравнение синтеза (3.2) с полиномом $P(s)$ 4-го порядка в форме Ньютона и СГК $\Omega_{об} = 500 \text{ с}^{-1}$, принимает следующий развернутый вид

$$(s^2 + 50s + 2651) \cdot s \cdot (c_2s + c_1) + 42570,6 \cdot (r_2s^2 + r_1s + r_0) = (s + 500)^4.$$

Расчет внешнего ПР с МВ осуществляется так же, как это выполнялось для структуры (рис. 3.1, а) по уравнению синтеза 3.1 при условии аппроксимации внутреннего контура апериодическим звеном 1-го порядка с передаточной функцией (3.3).

Виды и параметры ПФ регуляторов для этой структуры ЭМС, обозначенной как П(ПРМВ_к-ПР_и), приведены в пятой строке табл. 3.1.

Применение принципа последовательной коррекции при использовании ПР_и в составе внутреннего контура управления позволяет удовлетворить заданным основным критериям качества, но увеличивает общий порядок звеньев регуляторов до восьми.

Использование того же каскадного принципа, но без аппроксимации и понижения порядка внутреннего контура управления могут обеспечить структуры ЭМС, обозначенные как К(ПРМВ_к-РС_и) и К(ПРМВ_к-ПР_и).

Синтез этих вариантов ЭМС проводится в два этапа по направлению от внешнего контура системы к внутреннему.

На первом этапе составляется уравнение синтеза (3.1), в правую часть которого в качестве $D(s)$ вводится ХП Ньютона 5-го порядка с СГК $\Omega_0 = 180 \text{ с}^{-1}$, что соответствует заданному быстродействию (50 мс). В качестве $P(s)$ принимается желаемый полином 3-го порядка (в данном случае также в форме Ньютона) с подлежащим определению СГК, определяющим быстродействие внутренней подсистемы. Полином $Q(s)$ заменяется выражением $\Omega_{об}^3$. Для синтезируемых вариантов ЭМС получаем следующий развернутый вид уравнения (3.1):

$$(s + \Omega_{об})^3 \cdot (s^2 + 1,57^2) + \Omega_{об}^3 \cdot (e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = (s + 180)^5,$$

решение которого дает значения коэффициентов полинома $E(s)$, приведенные в табл. 3.1, и значение $\Omega_{об} = 300 \text{ с}^{-1}$, определяющее компромиссное быстродействие внутренней подсистемы (19 мс).

На втором этапе методом модального управления осуществляется синтез регуляторов внутренней подсистемы – РС_и или ПР_и с использованием соответствующего полученного на первом этапе выражения желаемого ХП $P(s) = (s + 300)^3$ или $P(s) = (s + 300)^4$.

Соответствующая информация о структурах и параметрах регуляторов таких вариантов ЭМС, приведена в табл. 3.1 (шестая и седьмая строка соответственно). Отсутствие аппроксимирующих процедур при синтезе управляющих устройств позволяет надеяться на определенное улучшение показателей качества, достигаемых в таких системах, но при синтезе внутренней подсистемы на базе интегрирующего ПР степень сложности регуляторов существенно возрастает (суммарный порядок звеньев равен 10).

3.1.2. Перенос колебательной составляющей модели возмущения в «быструю» внутреннюю подсистему ЭМС

Перемещение колебательной составляющей МВ во внутренний («быстрый») контур управления ЭМС (рис. 3.1, в) призвано обеспечить улучшение качества отработки переменной составляющей момента (1.2) нагрузки ЭД и снижение порядка регулятора внешнего контура, содержащего интегральную часть МВ, при соответствующем упрощении внеконтурного префильтра. Для реализации принципа селективной инвариантности такой ЭМС в ее внешнем и внутреннем контурах управления используются только полиномиальные регуляторы «входа-выхода» – $ПР_{И}$ и $ПРМВ_{К}$.

Максимальное упрощение внешнего интегрального регулятора $ПР_{И}$ здесь также обеспечивается при настройке внутренней подсистемы на быстроедействие, не менее чем в 5–7 раз превышающее заданные динамические требования. Соответствующая структура ЭМС обозначается далее как $ПР_{И}-(ПРМВ_{К})б$.

При расчете внутреннего $ПРМВ_{К}$ используется следующее уравнение полиномиального синтеза

$$A(s) \cdot F(s) + B(s) \cdot E(s) = P(s) \quad (3.4)$$

где $F(s) = G(s) \cdot V(s)$; $V(s)$ – вспомогательный полином, обеспечивающий техническую реализуемость регулятора. В качестве желаемого ХП $P(s)$ выбирается полином Ньютона 5-го порядка с величиной СГК $\Omega_{об} = 900 \text{ с}^{-1}$, что соответствует быстроедействию 10 мс. В этом случае уравнение (3.4) принимает следующий развернутый вид

$$(s^2 + 50s + 2651) \cdot (s^2 + 1,57^2) \cdot (s + \nu_0) + 42570,6 \cdot (e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = (s + 900)^5.$$

Для синтеза внешнего $ПР_{И}$ используется следующее полиномиальное уравнение

$$P(s) \cdot s \cdot C(s) + Q(s) \cdot R(s) = D(s), \quad (3.5)$$

где $Q(s) = \frac{b_0}{\Omega_{\text{об}}^5} = 7,2094 \cdot 10^{-11}$. При выборе в качестве желаемого ХП $D(s)$

полинома Ньютона 1-го порядка с величиной СГК $\Omega_0 = 20 \text{ с}^{-1}$, соответствующей заданному быстродействию (50 мс), уравнение синтеза (3.5) принимает наиболее простой вид

$$1 \cdot s + 7,2094 \cdot 10^{-11} \cdot r_0 = s + 20.$$

Полученные значения параметров полиномов регуляторов для данного варианта ЭМС приведены в восьмой строке табл. 3.1.

Можно ожидать, что применение своеобразной «рокировки» динамических составляющих МВ с введением звена более высокого порядка в состав внутренней («быстрой») подсистемы ЭМС приведет к определенному улучшению отработки колебательной составляющей момента нагрузки ЭД, но это будет достигаться ценой дополнительного повышения чувствительности системы к влиянию факторов, неучтенных при синтезе «быстрой» подсистемы.

Следует отметить, что с использованием принципов подчиненного и каскадного регулирования изложенными методами могут быть синтезированы другие структуры ЭМС, аналогичные рассмотренным в п. 3.1.1, но отличающиеся расположением колебательной составляющей МВ в составе внутреннего контура управления. Однако степень сложности регуляторов таких систем оказывается существенно выше предыдущих, что также делает нецелесообразным их использование в рамках поставленной цели работы.

3.2. Сравнительный анализ показателей качества и структурная оптимизация систем с распределенными моделями возмущения

Исследование проводится путем постановки детализированных вычислительных экспериментов с моделями синтезированных ЭМС средствами программного комплекса MATLAB в соответствии с методикой, принятой в пункте 2.2.

Графики переходных процессов, по которым оценивается качество раздельной отработки (в момент времени $t=1 \text{ с}$) ступенчатого изменения

постоянной (фактор $M_{=}$) и гармонической (фактор M_{\sim}) составляющих момента нагрузки, приведены на рис. 3.2, 3.3, где номера кривых соответствуют порядковым номерам ЭМС в табл. 3.1.

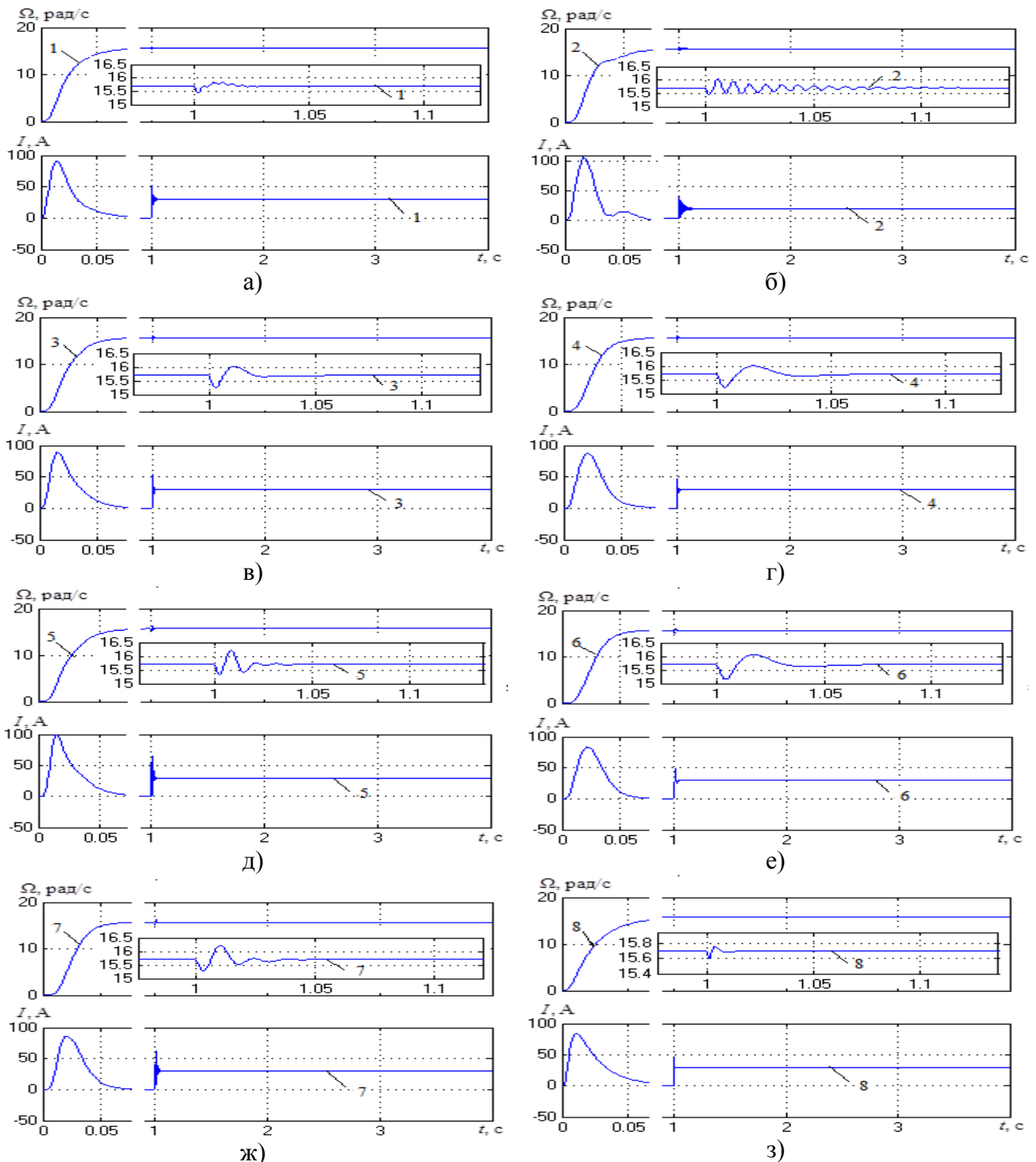


Рис. 3.2. Оценка качества обработки постоянной составляющей момента нагрузки:
 а – 6 баллов; б – 3 балла; в – 5 баллов; г – 4 балла; д – 5 баллов; е – 4 балла; ж – 4 балла;
 з – 7 баллов

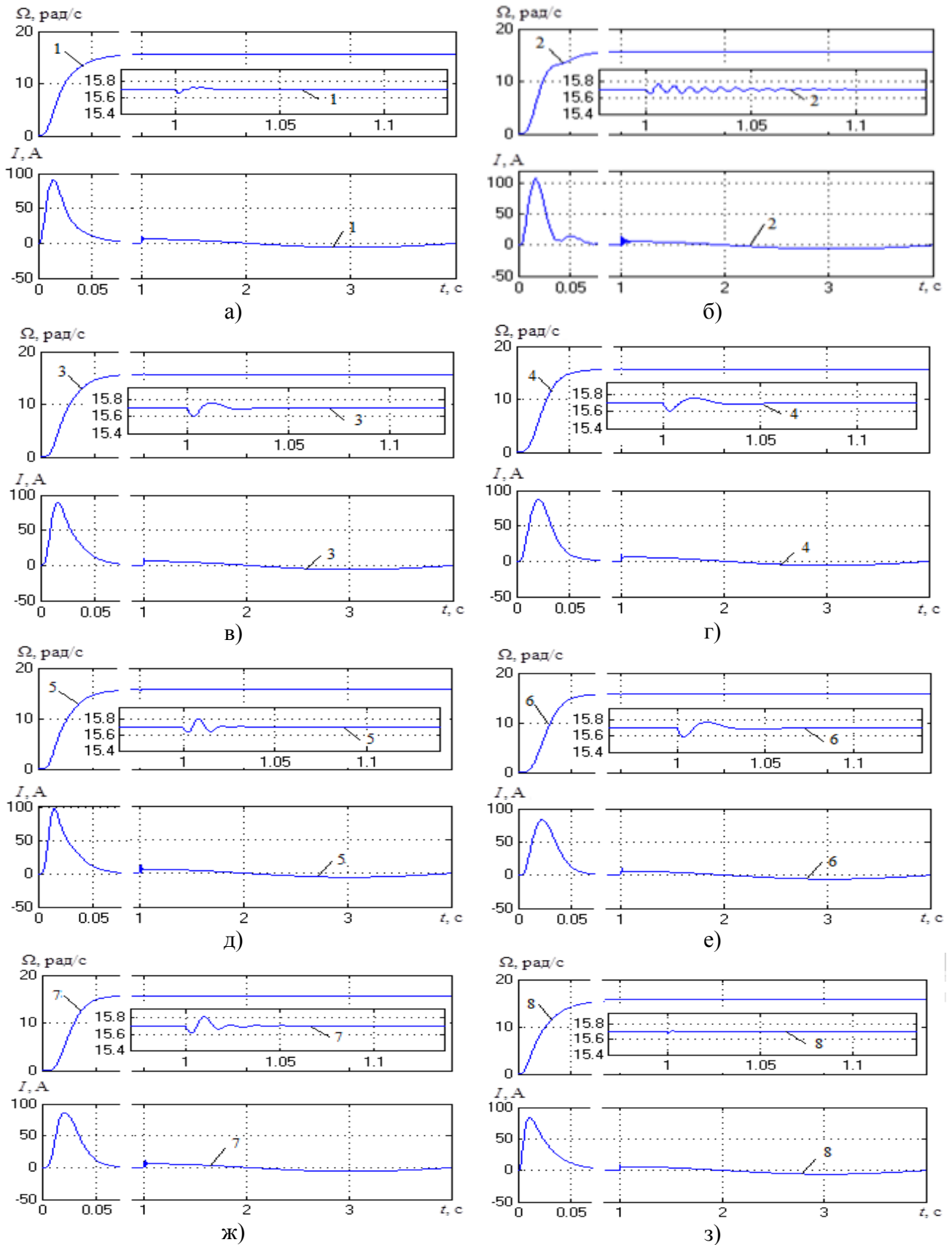


Рис. 3.3. Оценка качества обработки гармонического момента нагрузки:
 а – 6 баллов; б – 2 балла; в – 4 балла; г – 4 балла; д – 5 баллов; е – 4 балла; ж – 4 балла;
 з – 7 баллов

Помехоустойчивость ЭМС (фактор П~) оценивается по уровню пульсаций выходного сигнала скорости при наложении аддитивной помехи в виде «белого шума» с мощностью $N = 0,00001$ Вт/Гц в канале ее измерения.

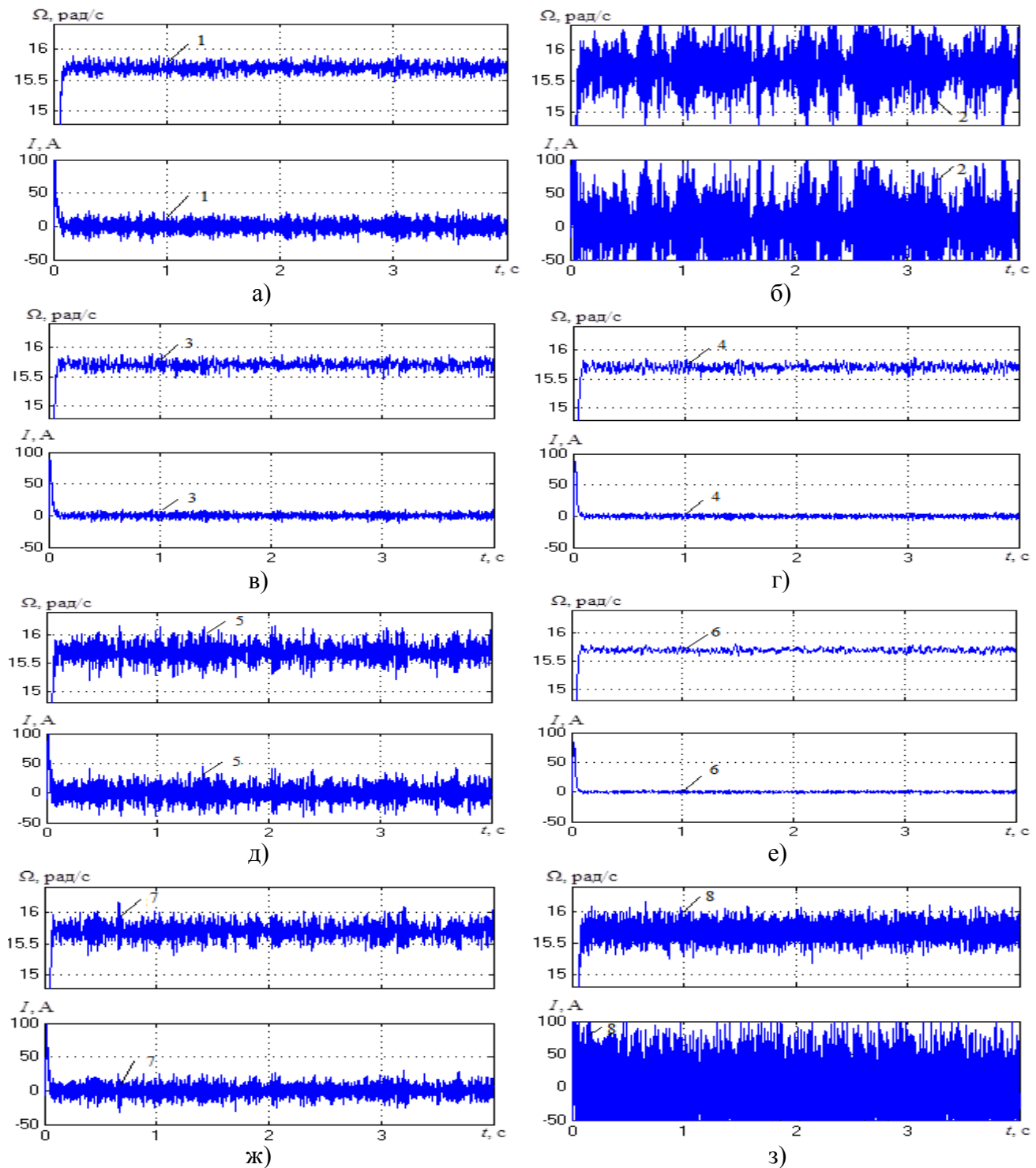


Рис. 3.4. Оценка реакции систем на введение помехи в цепи измерителя скорости:
 а – 4 балла; б – 0 баллов; в – 5 баллов; г – 5 баллов; д – 2 балла; е – 6 баллов; ж – 3 балла;
 з – 1 балл

Многочисленными вычислительными экспериментами с моделями ЭМС определяются диапазоны допустимых вариаций момента инерции

механической части (фактор $J = \text{var}$) и максимальные значения времени «чистого» запаздывания τ_{\max} сигнала в СП (фактор $e^{-\tau s}$, $\tau = \text{var}$), при которых системы сохраняют устойчивость. Полученные значения указанных факторов, а также суммарный порядок динамических звеньев регуляторов (фактор $N_{\text{рег}}$) синтезированных ЭМС приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Результаты вычислительных экспериментов с моделями ЭМС

№ САУ	Тип САУ	Факторы качества ЭМС		
		$J = \text{var}$, кг·м ²	$e^{-\tau s}$ ($\tau = \text{var}$, мс)	$N_{\text{рег}}$
1	ПРМВ _к -(РС _и)б	[0,17 0,8]	0,0005	4 (3)*
2	ПРМВ _к -(ПР _и)б	[0,15 0,54]	0,00075	7 (4)
3	П(ПРМВ _к -РС _и)	[0,11 0,46]	0,0011	5 (3)
4	П ₂ (ПРМВ _к -РС _и)	[0,1 0,52]	0,011	7 (4)
5	П(ПРМВ _к -ПР _и)	[0,09 0,29]	0,0011	8 (4)
6	К(ПРМВ _к -РС _и)	[0,08 0,5]	0,0014	7 (4)
7	К(ПРМВ _к -ПР _и)	[0,08 0,35]	0,00135	10 (5)
8	ПР _и (ПРМВ _к)б*	[0,05 0,59]	0,0004	7 (4)

*() – порядок динамических звеньев регуляторов, представленных в канонической форме наблюдаемости

Результаты исследований в виде графиков переходных процессов и числовых значений указанных факторов, полученных в ходе экспериментов, оценены в данном случае по расширенной семибалльной шкале экспериментальным методом и сведены в итоговую табл. 3.3. При этом нижняя и верхняя оценки шкалы по каждому критерию соответствуют наихудшему и наилучшему значениям показателя качества или виду переходного процесса, а все промежуточные оценки формируются путем простого усреднения экспертного мнения. В табл. 3.3 также приводится суммарная оценка качества (Q_{Σ}) каждой ЭМС, полученная при условии одинаковой значимости перечисленных факторов.

Применение расширенной оценочной шкалы с повышенным значением верхнего уровня взамен принятой в главе 2 [32, 56, 88] пятибалльной шкалы (при сохранении единых критериев оценок) обеспечивает возможность сопоставления результатов всего комплекса исследования с учетом

достигнутого улучшения отдельных показателей качества новых вариантов ЭМС.

Таблица 3.3. Результаты оценки качества ЭМС по комплексу заданных требований

№ САУ	Тип САУ	Оценки факторов качества ЭМС						
		$M\sim$	$M=$	$J = \text{var}$	$\Pi\sim$	$e^{-\tau s}$	Сложность $N_{\text{рег}}$	Q_{Σ}
1	ПРМВ _к -(РС _и)б	6	6	4	4	0	6 (7)	26 (27)
2	ПРМВ _к -(ПР _и)б	2	3	3	0	1	3 (6)	12 (15)
3	П(ПРМВ _к -РС _и)	4	5	4	5	3	5 (7)	26 (28)
4	П ₂ (ПРМВ _к -РС _и)	4	4	5	5	3	3 (6)	24 (27)
5	П(ПРМВ _к -ПР _и)	5	5	2	2	3	1 (6)	18 (23)
6	К(ПРМВ _к -РС _и)	4	4	6	6	5	3 (6)	28 (31)
7	К(ПРМВ _к -ПР _и)	4	4	4	3	5	0 (5)	20 (25)
8	ПР _и -(ПРМВ _к)б*	7	7	7	1	-	3 (6)	25 (28)

Необходимо уточнить, что сверхвысокая чувствительность 8-го варианта ЭМС к неучтенным факторам во внутреннем контуре управления позволила получить работоспособные решения только при использовании идеализированного безынерционного СП. Поэтому в табл. 3.2 и 3.3 такая система помечена звездочкой (*), означающей иные условия достижения принятых показателей качества.

3.3. Модификация разработанных вариантов селективно-инвариантных ЭМС

Расширение состава принципов управления за счет принципа разделения модели возмущения, позволило повысить эффективность разработанных структурных СИ ЭМС по отдельным техническим требованиям и обеспечить большее разнообразие сочетаний их показателей качества.

Однако задача снижения уровня сложности регуляторов была достигнута не для всех систем. Так, например, применение интегрирующих ПР внутренних подсистем в таких структурных решениях, как П(ПРМВ_к-ПР_и), К(ПРМВ_к-ПР_и), приводит к тому, что суммарный порядок динамических звеньев их регуляторов будет превышать порядок звеньев систем с объединенной МВ. Это делает нецелесообразным их использование в рамках поставленных задач.

Исключение из состава управляющего устройства префильтров позволит существенно снизить порядок регуляторов. Структурные схемы систем, синтезированных в пункте 3.1, в этом случае примут вид, изображенный на рис. 3.5, удобный для реализации в КФН.

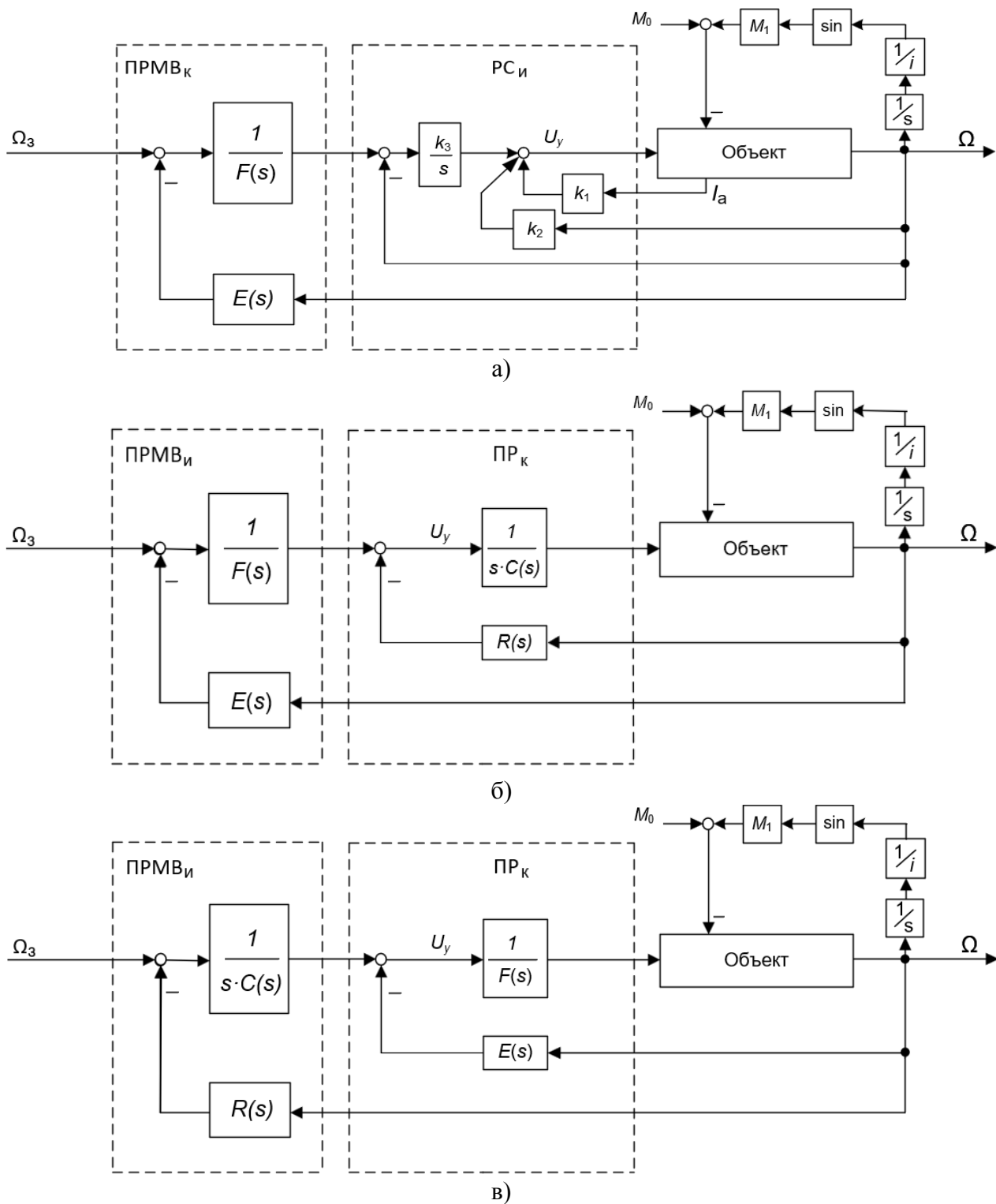


Рис. 3.5. Структурные схемы различных вариантов астатических СИ ЭМС

В качестве примера реализации предложенного метода рассмотрим синтез регуляторов для системы, представленной на рис. 3.5, б, и обозначенной как К(ПРМВ_к-ПР_и), так как для нее был получен самый высокий порядок динамических звеньев – $N_{\text{рег}} = 10$.

С учетом выражений параметров ПФ данного регулятора, приведенных в седьмой строке табл. 3.1, составим полиномиальные уравнения для внешнего (3.6) и внутреннего (3.7) контуров управления

$$U_y = \frac{1}{s^3} \cdot (\Omega_3 - e_0 \cdot \Omega - f_0 \cdot U) + \frac{1}{s^2} \cdot (-e_1 \cdot \Omega - f_1 \cdot U) + \frac{1}{s} \cdot (-e_2 \cdot \Omega - f_2 \cdot U) + (-e_3 \cdot \Omega); \quad (3.6)$$

$$U_y = \frac{1}{s^2} \cdot (\Omega_3 - r_0 \cdot \Omega) + \frac{1}{s} \cdot (-r_1 \cdot \Omega - c_1 \cdot U) + (-r_2 \cdot \Omega); \quad (3.7)$$

Полученная по уравнениям (3.6 – 3.7) структурная схема регуляторов для системы К(ПРМВ_к-ПР_и), представленных в расширенной КФН, приведена на рис. 3.6.

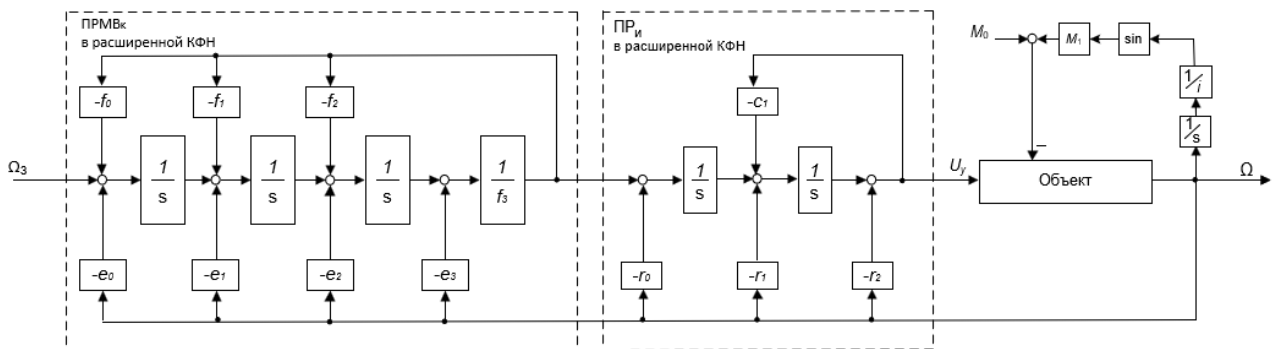


Рис. 3.6. Структурная схема регуляторов для системы К(ПРМВ_к-ПР_и), в расширенной КФН

Исключение префильтров из состава УУ ранее синтезированных ЭМС (п. 3.1) позволило существенно понизить порядок регуляторов при сохранении остальных показателей качества на достигнутом уровне. Суммарный порядок динамических звеньев регуляторов (фактор $N_{\text{рег}}$) для синтезированных таким образом ЭМС приведен в табл. 3.2. (данные указаны в скобках).

Однако, как было отмечено выше, определенным недостатком регуляторов, представленных в расширенной КФН, является более сложная процедура их программной реализации.

3.4. Сравнительный частотно-временной анализ разработанных вариантов систем

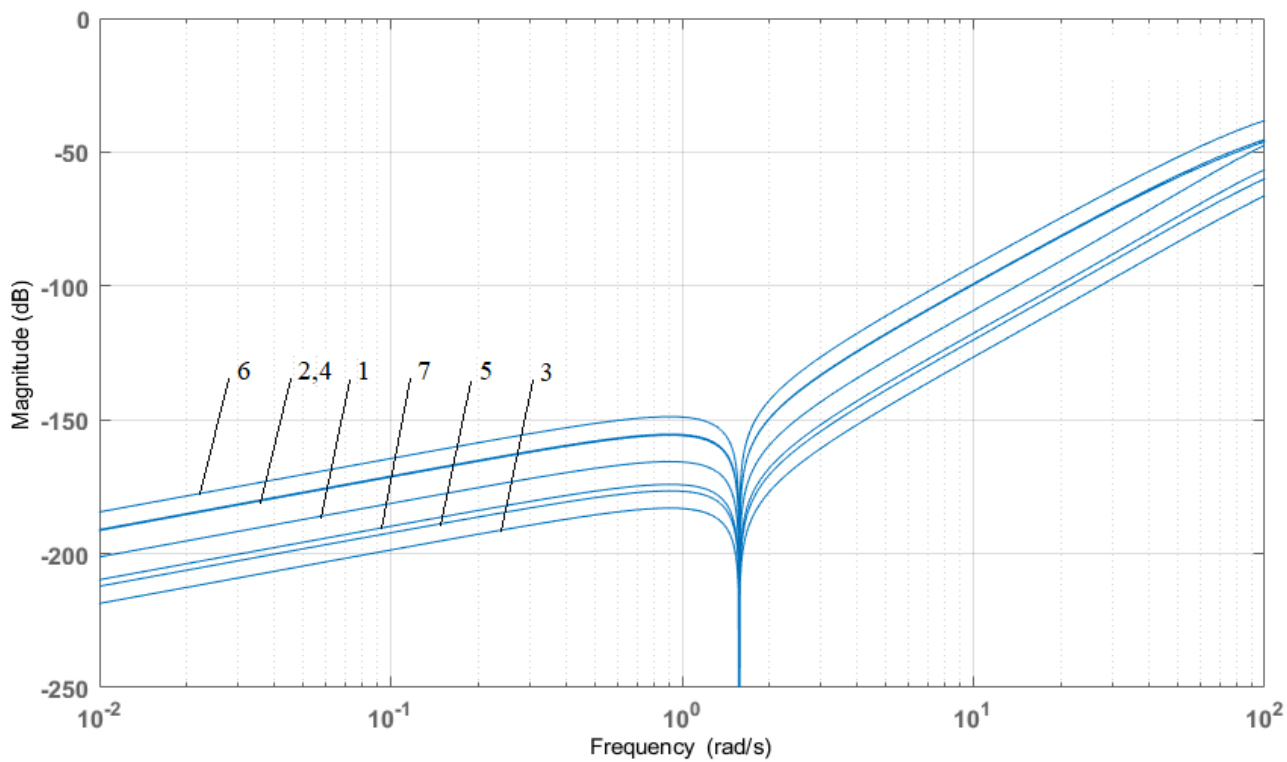
Синтезированные структурные решения СИ ЭМС показали свою эффективность в компенсации гармонических возмущений по моменту нагрузки на частоте настройки системы.

Однако представляет интерес сравнительная оценка возможностей различных структурных реализаций СИ ЭМС [30-33, 56, 57, 88, 89] при их работе в широком диапазоне скоростей и частот гармонического возмущения (более 1000:1), а также при воздействии несинусоидальных периодических возмущений момента нагрузки ЭД с широким спектральным составом гармоник [58, 61, 90].

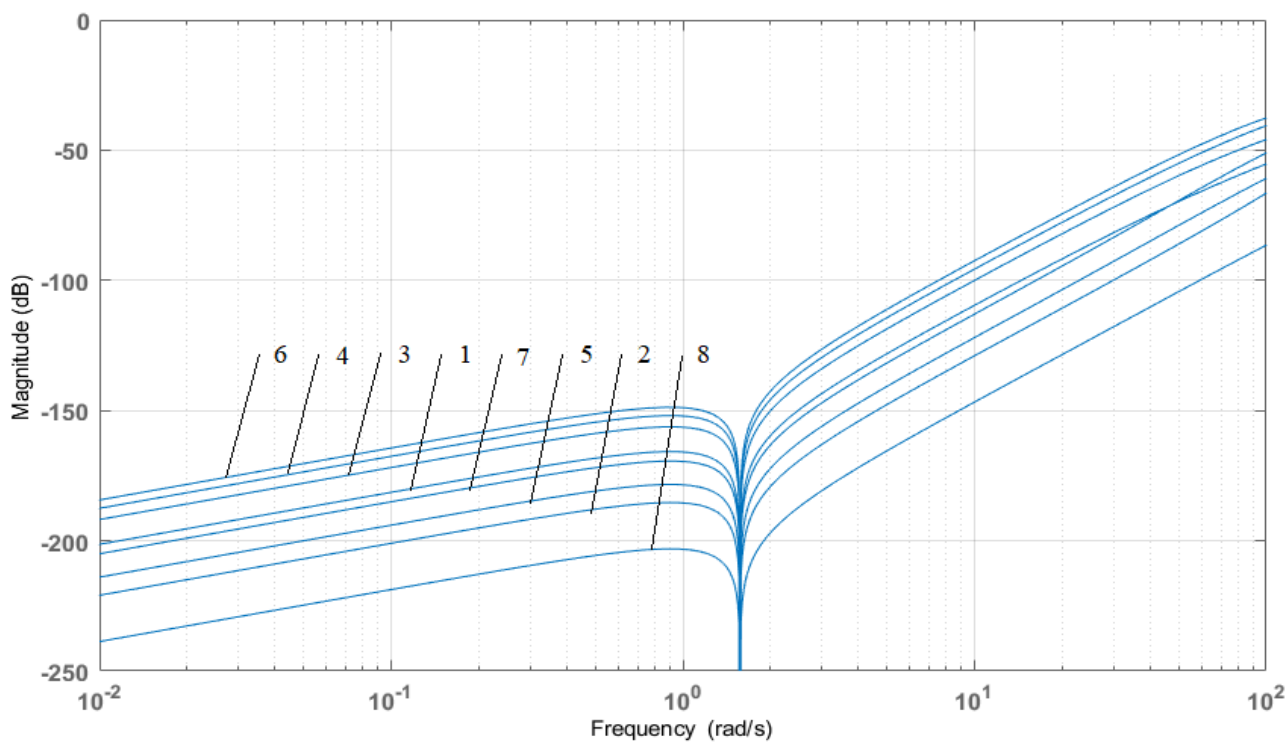
В этих целях проведены вычислительные эксперименты и сравнительный анализ частотных характеристик синтезированных ЭМС, а также соответствующих временных характеристик при отработке сложных полигармонических возмущений при работе систем в составе технологических агрегатов для производства ленточно-волоконных материалов [4].

Следует отметить, что при моделировании не учитывались нелинейности силовых преобразователей и зазоры кинематических передач ЭМС. Рассмотренные системы работают под воздействием реактивного момента нагрузки, однако режимы перегрузок и реверса при этом не исследуются, что позволяет использовать упрощенную модель активного нагрузочного момента.

Для оценки возможностей синтезированных селективно-инвариантных ЭМС были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики всех рассмотренных вариантов систем по возмущающему воздействию. Соответствующие графики для астатических систем с единой МВ и распределенной МВ приведены на рис. 3.7 а, б в логарифмических масштабах величин (номера графиков соответствуют номерам систем в табл. 2.1, 3.1).



a)



б)

Рис. 3.7. Амплитудно-частотные характеристики по возмущающему воздействию для ЭМС: а – астатических с единой МВ; б – астатических с разделенной МВ

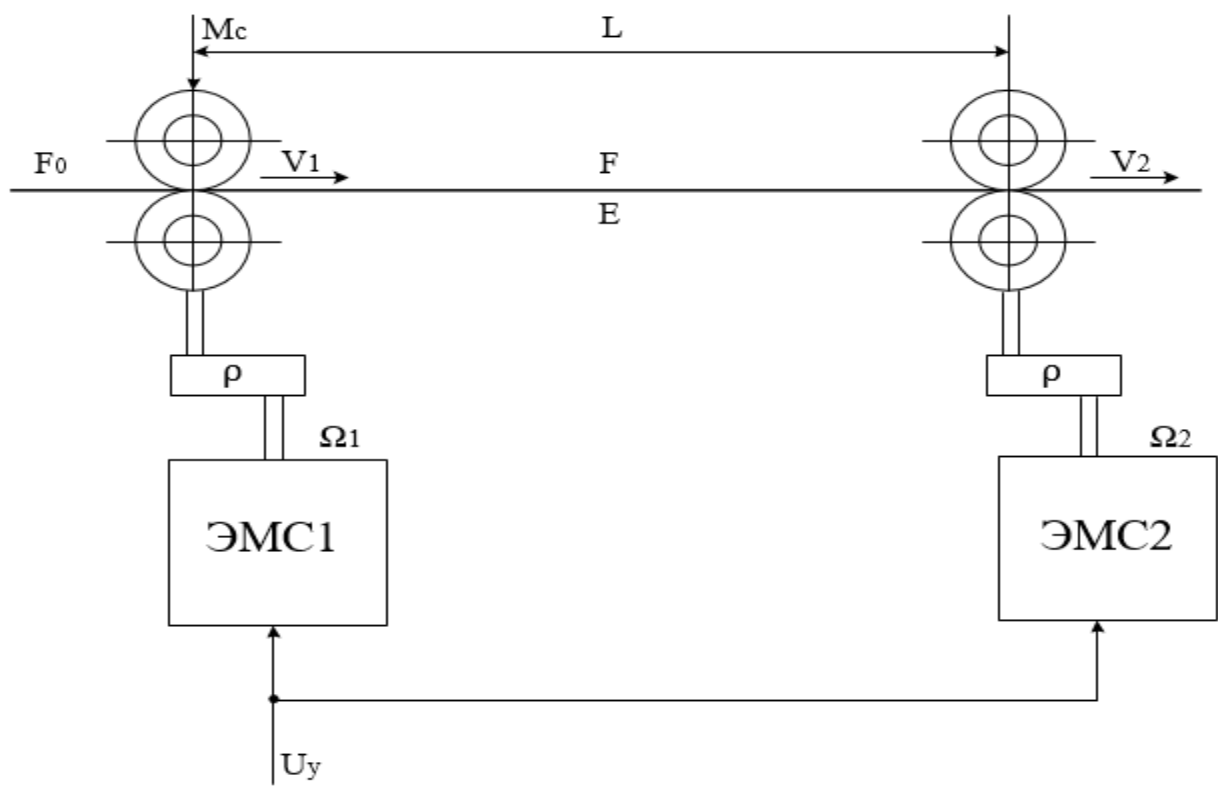
Полученные характеристики позволяют получить наглядную сравнительную оценку разработанных вариантов селективно-инвариантных ЭМС в обработке широкого спектра возмущений по моменту нагрузки. Они

иллюстрируют более высокую эффективность отдельных вариантов СИ ЭМС с распределенной моделью возмущения в достижении инвариантных свойств.

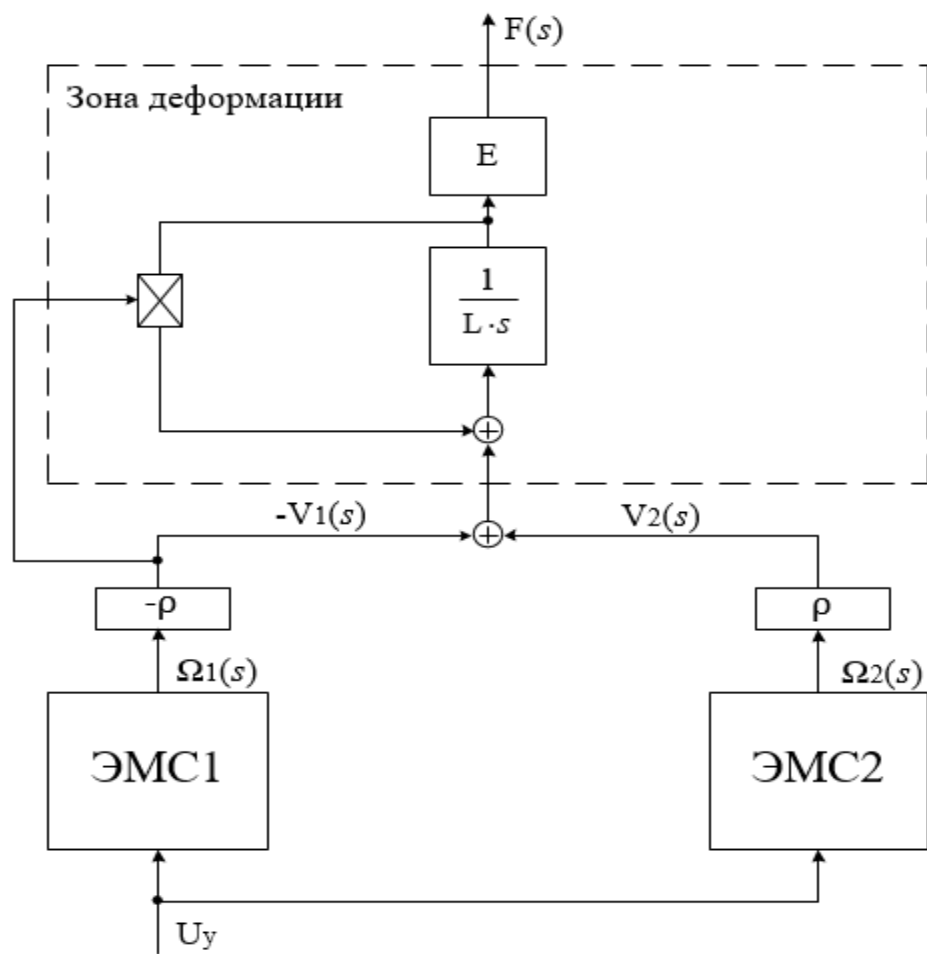
Высокое качество работы СИ ЭМС в широком скоростном диапазоне дает основание считать, что они будут эффективно обрабатывать не только синусоидальные возмущения по моменту нагрузки ЭД, но и сложные несинусоидальные периодические возмущения с широким спектром гармоник.

Исследуем это на примере изменения величины натяжения транспортируемого ленточного материала в двухканальной ЭМС технологического агрегата, структурная схема которой приведена на рис. 3.8, б где использованы следующие обозначения: L – длина материала в зоне деформации; E – приведенный к ширине модуль упругости материала; $\Omega_{1,2}$ – угловые скорости ЭД; ρ – радиус приведения.

Для анализа отработки сложного возмущения момента нагрузки, подаваемого на ведомый двигатель (ЭМС 1), в схеме на рис. 3.8, б выбраны следующие системы регулирования скорости, структурные схемы которых представлены на рис. 2.1, 3.1, с параметрами из табл. 2.1, 3.1: ПРМВ-(ПР)б (табл. 2.1, строка 3) – астатическая ЭМС с единой моделью возмущения; ПР_и-(ПРМВ_к)б (табл. 3.1, строка 8) – астатическая ЭМС с разделенной моделью возмущения.



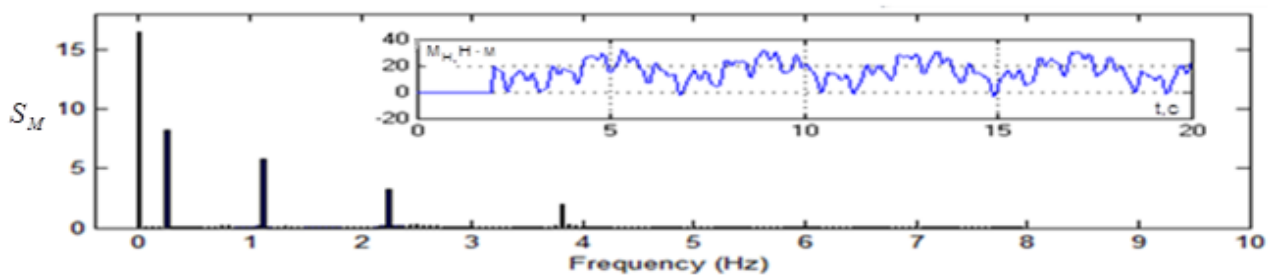
а)



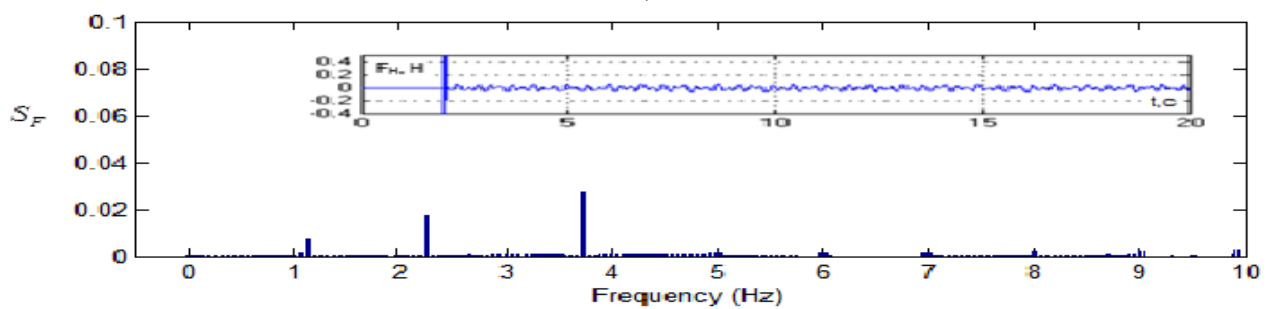
б)

Рис. 3.8. Структурные схемы: а – локальной зоны технологического агрегата; б – двухдвигательной ЭМС с зоной деформации

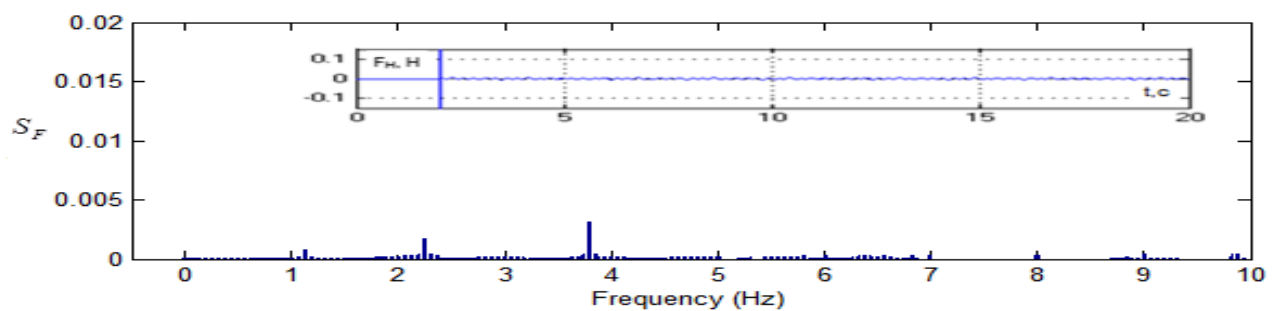
На рис. 3.9 приведены графики и спектры сложного возмущения момента нагрузки, а также величина натяжения в двухканальных ЭМС. Полученные результаты наглядно показывают, что селективно-инвариантные САУ существенно повышают качество обработки возмущений по моменту нагрузки как синусоидального, так и несинусоидального периодического характера (рис. 3,9, а). Введение интегральной составляющей в МВ позволяет полностью устранить влияние гармоник нулевой частоты (постоянной составляющей момента нагрузки).



а)



б)



в)

Рис. 3.9. Графики и спектры: а – сложного возмущения момента нагрузки; б – натяжения в ЭМС на базе астатической системы с единой моделью возмущения – ПРМВ-(ПР)б; в – астатической системы с разделенной моделью возмущения – ПР_И-(ПРМВ)_Кб

Применение принципа разделения модели гармонического возмущения момента нагрузки ЭД на интегральную и колебательную составляющие с перемещением одной из них в состав «быстрой» внутренней подсистемы позволяет в значительной степени улучшить обработку возмущений

несинусоидального периодического характера, что подтверждается характеристиками, приведенными на рис. 3.9, в.

Следует отметить, что селективно-инвариантные ЭМС имеют дополнительные резервы повышения качества отработки возмущений по моменту нагрузки, которые могут быть использованы при адаптивной перестройке параметров МВ в соответствии с изменениями рабочей скорости электропривода.

Выводы

1. Применение двухконтурных структур ЭМС с «быстрым» внутренним контуром управления и использование принципа разделения модели возмущения на интегральную и колебательную составляющие с переносом одной из них в состав «быстрой» подсистемы позволяет достичь как улучшения отдельных показателей качества СИ ЭМС, так и большего разнообразия значений всего комплекса заданных показателей качества.

2. С увеличением порядка динамической составляющей регулятора, вводимой в состав «быстрой» подсистемы, возрастает чувствительность СИ ЭМС к влиянию факторов, не учтенных при ее синтезе, в частности, к запаздыванию сигналов в силовом преобразователе.

Этот неблагоприятный эффект указывает на целесообразность применения структурных решений ЭМС, предполагающих введение более простой интегральной составляющей модели возмущения в состав внутреннего контура управления.

3. Результаты исследования разработанных вариантов селективно-инвариантных ЭМС с распределенными МВ, отражающие степень выполнения всего комплекса заданных требований (определяющих показателей качества), органично дополняют аналогичные результаты, полученные ранее для селективно-инвариантных систем с объединенными МВ, и позволяют проектировщикам в более полном объеме решать задачи структурной оптимизации систем по выбранной схеме компромиссов.

Глава 4. Разработка и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с адаптацией управляющих устройств к вариациям рабочей скорости

Вводные замечания

Как было показано выше существует ряд технических объектов, приводимых в движение средствами автоматизированного электропривода, наличие погрешностей в изготовлении механической части которых (например, эксцентриситет систем передач движения) приводит к возникновению гармонических колебаний статического момента нагрузки на валу рабочих органов. При этом частота таких колебаний жестко связана со скоростью электродвигателя (1.2).

В некоторых случаях, например при регулировании производительности технологического оборудования за счет изменения скорости рабочих органов, данная частота может меняться.

Минимизация последствий подобных возмущений позволит значительно улучшить показатели качества систем автоматического управления скоростными режимами технологических установок.

4.1. Оценка возможностей разработанных систем при работе в широком диапазоне скоростей

Результаты проведенных исследований [31-33, 57-59, 61, 88-90] показали эффективность разработанных СИ ЭМС в компенсации влияния гармонической составляющей момента сопротивления на частоте настройки системы. Однако в работе не давалась детальная оценка качества отработки гармонического момента нагрузки при значительных изменениях скоростей ЭД и, соответственно, частот гармонического возмущения.

С этой целью проведен анализ реакции на изменение параметров возмущающего воздействия для системы, представленной на рис. 2.1, б и обозначенной как К(ПРМВ-РС). При этом структуры внеконтурного формирователя и регулятора оставлены настроенными на ранее выбранное

возмущение (вид и параметры ПФ регулятора приведены в шестой строке таблицы 2.1). В качестве заданной скорости принято ее номинальное значение $\Omega=157$ рад/с, что приводит к изменению частоты воздействия возмущающего момента нагрузки $\omega_1=15,7$ рад/с (1.2).

На рис. 4.1 приведены результаты моделирования режима пуска и приложения в момент $t = 4$ с возмущающего момента.

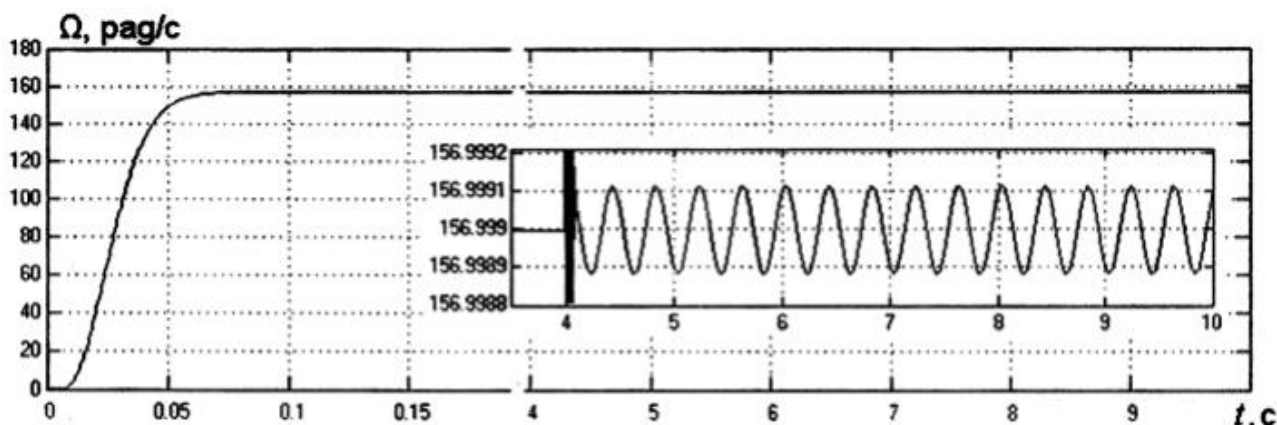


Рис.4.1. Переходные процессы для системы К(ПРМВ-РС) при работе на номинальной скорости

Полученные результаты наглядно показывают, что при смене задания на скорость в переходном процессе отработки возмущения вновь появляется пульсирующая составляющая момента сопротивления, величина которой свидетельствует о низкой эффективности работы системы на частоте, отличной от расчетной.

Такое изменение скорости рабочего органа характерно для механизмов, требующих регулирования производительности при смене ассортимента изделий, при изменении режимов обработки различных материалов и условий эксплуатации оборудования. При этом эффективность регулирования скорости существенно снижается.

Таким образом, зависимость частоты гармонического возмущения от угловой скорости РО определяет необходимость использования принципа адаптации внутренней модели возмущения и формирователя к изменениям скоростного режима ЭМС в широком диапазоне.

4.2. Особенности построения адаптивных управляющих устройств с моделью возмущения

При адаптивной компенсации влияния гармонических колебаний момента нагрузки в электромеханической системе первоначально производят снятие и исследование спектрограммы скоростей. Если спектрограмма была построена ранее, пользуются результатами проведенных исследований. На спектрограмме выделяют частоту наиболее существенного воздействия, которое приводит к возникновению доминирующего гармонического возмущения момента нагрузки на валу рабочего органа. По известной кинематической схеме механизма и выявленной частоте находят соответствующую угловую скорость рабочего органа ω_1 , которая позволяет вычислить математическую модель наиболее существенного возмущения, соответствующую уравнению (1.2).

Для организации процесса управления в состав системы кроме внешнего контура регулирования по основной координате (в данном случае – по скорости рабочего органа или жестко связанной с ней скорости ЭД) вводится внутренний контур регулирования. Как и в случае ранее синтезированных систем полученный формирующий полином вводится в знаменатель передаточной функции регулятора.

В качестве примера реализации предложенного метода рассмотрим синтез регуляторов для системы, представленной на рис. 2.1, б и обозначенной как К(ПРМВ-РС).

Для данной системы запишем полученное ранее полиномиальное уравнение синтеза внешнего контура управления (2.8) в общем виде, используя символическое обозначение скорости рабочего органа ω_1 вместо конкретного значения $\omega_1=1,57$ рад/с и b_0 вместо конкретной величины 42570,6 свободного члена полинома числителя передаточной функции (2.4) исходного объекта

$$(s + \Omega_{\text{об}})^2 \cdot s \cdot (s^2 + \omega_1^2) + b_0 \cdot (e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0) = (s + 180)^5. \quad (4.1)$$

Полученное уравнение позволяет реализовать внеконтурный формирователь и регулятор в виде цифровых или аналоговых блоков выполняющих математические преобразования с учетом текущего значения ω_1 .

Решение уравнения синтеза регулятора внешнего контура (4.1) позволяет получить выражения коэффициентов полинома передаточной функции регулятора $E(s)$ и $F(s)$.

$$e_0 = \frac{d_0}{b_0}; \quad (4.2)$$

$$e_1 = \frac{d_1 - \frac{d_4}{4} \omega_1^2}{b_0}; \quad (4.3)$$

$$e_2 = \frac{d_2 - d_4 \omega_1^2}{b_0}; \quad (4.4)$$

$$e_3 = \frac{d_3 - \frac{d_4}{4} \omega_1^2}{b_0}; \quad (4.5)$$

$$f_0 = \omega_1^2, \quad (4.6)$$

где коэффициенты d_0 , d_1 , d_2 , d_3 , и d_4 находятся по желаемому ХП синтезируемой системы $D(s)$ с подстановкой конкретного значения Ω_0 , соответствующего заданному быстродействию. Такие же зависимости $e_1(\omega_1)$, $e_2(\omega_1)$, $e_3(\omega_1)$ будут присущи и полиному внеконтурного формирователя. В отличие от неадаптивной системы К(ПРМВ-РС), регулятор и внеконтурный формирователь выполняются с возможностью изменения коэффициентов e_1 , e_2 , e_3 в зависимости от величины угловой скорости рабочего органа ω_1 .

Полученная по уравнениям (4.1-4.6) структурная схема регуляторов с каналом адаптации для системы К(ПРМВ-РС) приведена на рис. 4.2.

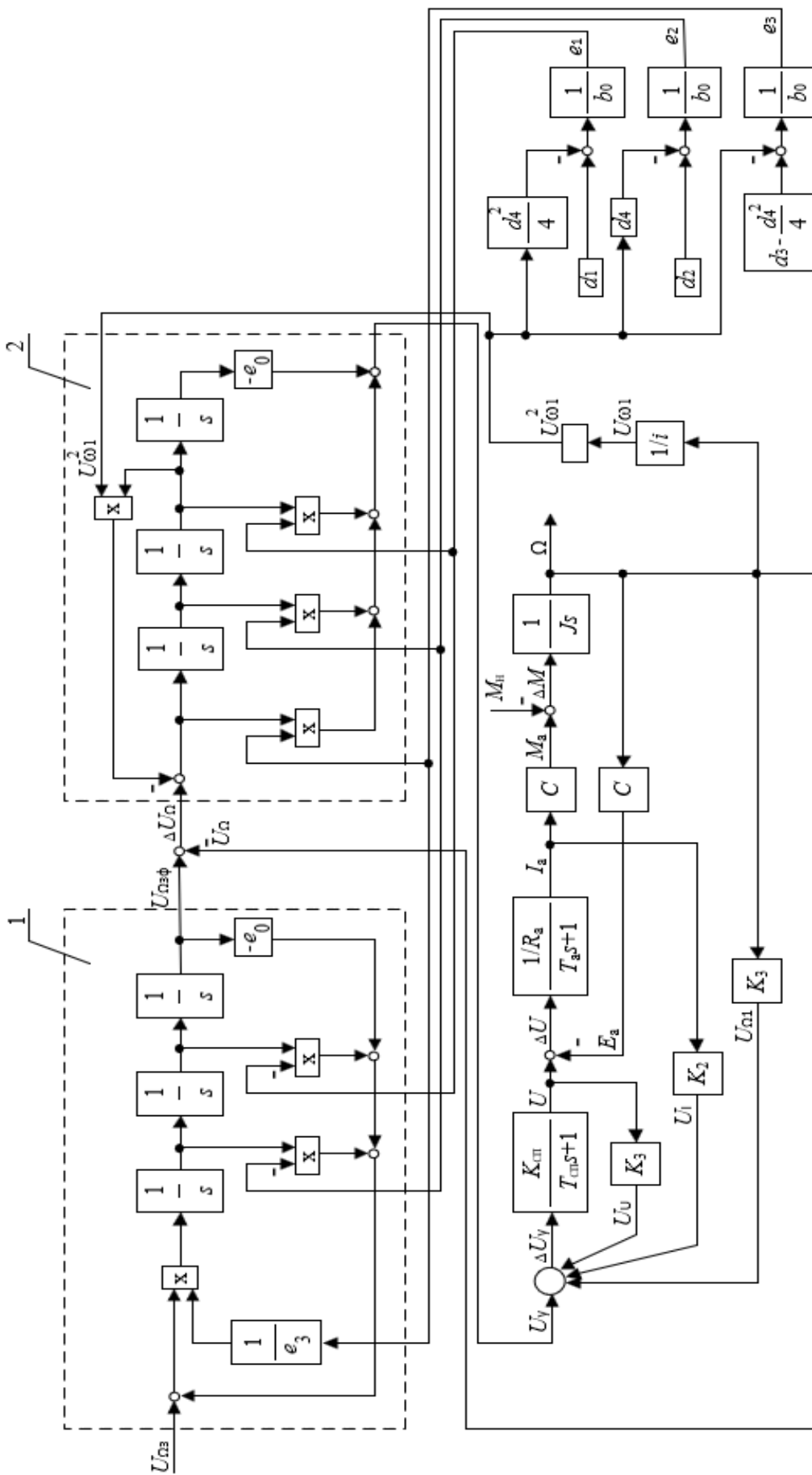


Рис. 4.2. Структурная схема системы управления с каналом адаптации

В данной системе текущее значение скорости рабочего органа вводится в регулятор с внутренней моделью возмущения как переменная, в зависимости от которой перестраиваются коэффициенты $f_0(\omega_1)=\omega_1^2$, $e_1(\omega_1)$, $e_2(\omega_1)$, $e_3(\omega_1)$ внеконтурного формирователя (1) и регулятора (2) с внутренней моделью возмущения.

Сигнал задания на скорость U_{Ω_3} проходит через формирователь с передаточной функцией $\frac{1}{E(s)}$. При этом коэффициенты $e_1(\omega_1)$, $e_2(\omega_1)$, $e_3(\omega_1)$ полинома $E(s)$ имеют значения, соответствующие текущему уровню угловой скорости рабочего органа ω_1 . Затем сигнал обратной связи по скорости U_{Ω} вычитается из сигнала, полученного на выходе внеконтурного формирователя (1). Сигнал разницы скоростей $U_{\Delta\Omega}$ поступает на ту часть регулятора (2) с внутренней моделью возмущения $\frac{E(s)}{s \cdot F(s)}$, которая стоит в прямом канале системы. Аналогично коэффициентам $e_1(\omega_1)$, $e_2(\omega_1)$, $e_3(\omega_1)$ полинома $E(s)$ значение коэффициента $f_0(\omega_1)$ полинома $F(s)$ соответствует текущему уровню угловой скорости рабочего органа ω_1 . Для удобства сопряжения канала адаптации с блоками формирователя $\frac{1}{E(s)}$ и регулятора $\frac{E(s)}{s \cdot F(s)}$ оба выполняются в канонической форме управляемости. Сформированный таким образом сигнал управления U_y поступает на неинвертирующий вход элемента сравнения внутреннего контура регулирования скорости.

Если скорость ЭД изменится (например под действием нового задающего воздействия, отличного от ранее рассмотренного), система отработает это изменение, установив новые значения коэффициентов передаточных функций $E(s)$ и $F(s)$ внеконтурного формирователя (1) и регулятора (2). При этом эффективность работы системы не снижается, и она успешно отрабатывает влияние нового возмущающего гармонического момента нагрузки.

Таким образом, предложенный способ адаптивной компенсации влияния гармонических колебаний момента нагрузки в электромеханической системе,

предполагающий коррекцию коэффициентов регулятора и внеконтурного формирователя, обрабатывает возникающие в процессе регулирования Ω переменные по частоте колебания момента нагрузки. Это наглядно видно на примере временных диаграмм, снятых путем компьютерного моделирования системы при воздействии гармонических колебаний момента нагрузки с частотами, соответствующими скоростям 15,7 рад/с и 157 рад/с (рис. 4.3, а, б).

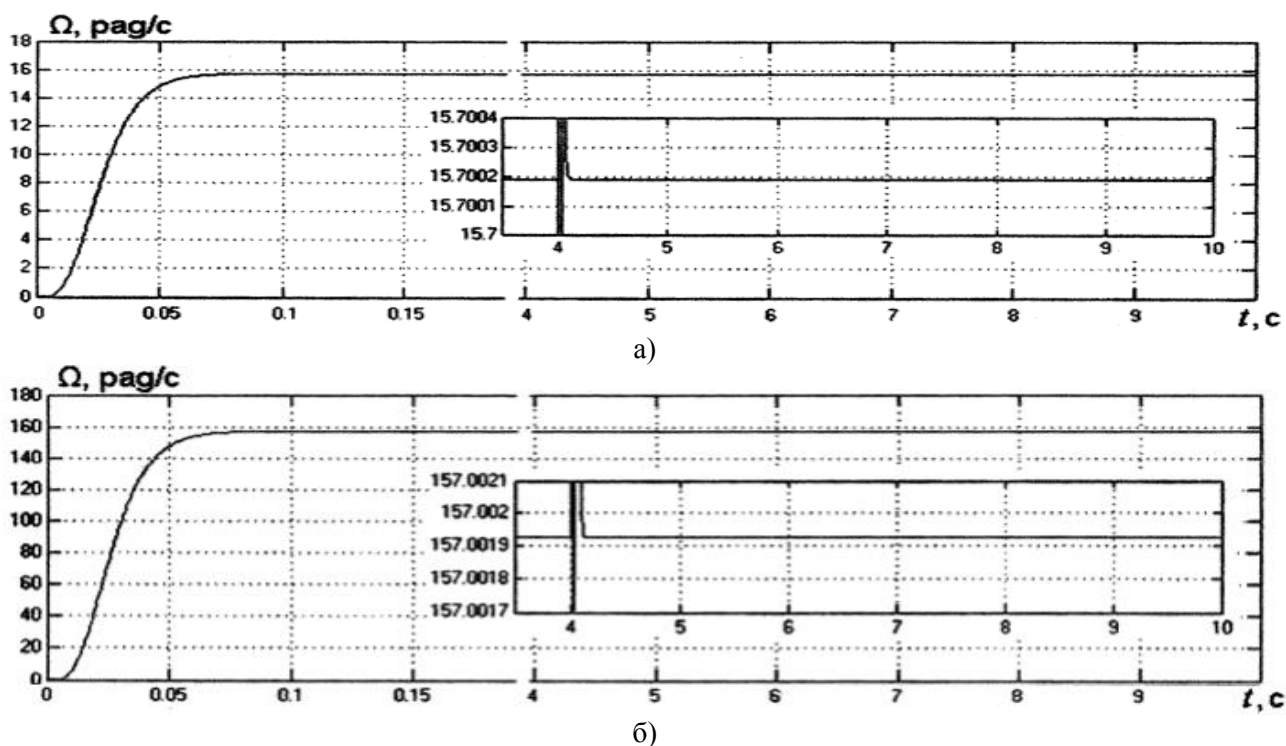


Рис. 4.3. Переходные процессы по скорости в ЭМС с адаптивным регулятором с внутренней моделью возмущения при работе на скорости а) - 15,7 рад/с; б) - 157 рад/с

Полученные результаты наглядно показывают, что и в том, и в другом случае система эффективно обрабатывает приложенный гармонический момент нагрузки. Колебаний скорости после внешнего воздействия не наблюдается.

Одновременная согласованная перестройка параметров внутренней МВ и звеньев управляющего устройства позволяет сохранить не только устойчивость, но и заданное качество переходных процессов адаптивной СИ ЭМС в широком диапазоне скоростей.

Выводы

1. Адаптивная перестройка параметров МВ в соответствии с изменениями рабочих скоростей ЭП позволяет обеспечить компенсацию влияния

гармонических колебаний момента нагрузки не только на частоте настройки системы, но и во всем диапазоне ее регулирования, что значительно улучшает показатели качества систем автоматического управления скоростными режимами технологических установок.

2. Предложенный способ адаптивной компенсации влияния гармонических возмущений носит универсальный характер и может быть применен ко всем синтезированным ранее структурным решениям СИ ЭМС.

В свою очередь высокое качество их работы в широком скоростном диапазоне, подтвержденное сравнительным частотно-временным анализом, проведенным в главе 3, дает основание считать, что с применением адаптивной перестройки параметров МВ будет достигнута эффективная отработка и сложных несинусоидальных периодических возмущений с широким спектром гармоник.

Глава 5. Практическая реализация и экспериментальные исследования селективно-инвариантных электромеханических систем

Вводные замечания

Проведенный в предыдущих главах структурный синтез различных модификаций СИ ЭМС, большой объем исследований и целый ряд вычислительных экспериментов с их математическими моделями, позволил выработать определенные рекомендации проектировщикам по разработке таких систем с заданными показателями качества в конкретных условиях эксплуатации.

Несмотря на развитие аппаратно-программных средств моделирования, окончательный вывод об эффективности разработанных систем следует делать по результатам комплексной экспериментальной проверки на реальном оборудовании.

Однако исследования в составе реального технологического оборудования зачастую являются дорогостоящими, не всегда имеется возможность оснастить исследуемый объект тем или иным регулятором за минимальное время без разработки дополнительного и доработки имеющегося аппаратного обеспечения, что затрудняет проведение экспериментов. По этой причине натурные эксперименты по реализации разработанных вариантов СИ ЭМС целесообразно проводить на базе экспериментальных лабораторных стендов, которые содержат основные элементы производственной установки, но в отличие от промышленного оборудования не ограничивают возможности таких исследований [29, 81].

В современном проектировании все более активно используется технология быстрого прототипирования (Rapid Control Prototyping – RCP) [12, 81, 86], позволяющая создавать и тестировать новые алгоритмы управления объектами в короткие сроки. Эта технология предполагает разработку и верификацию модели объекта, синтез различных вариантов системы управления и их тестирование вначале на модели, а затем на реальном

оборудовании, непосредственно управляемом компьютером с реализованной на нем системой управления.

В этой связи целью данной главы является разработка принципов физического моделирования для комплексных практических исследований различных типов селективно-инвариантных ЭМС, а также вопросов программно-аппаратной реализации для оперативной проверки теоретических результатов и формирования инновационных технических решений, подготовленных к практической реализации на реальном технологическом оборудовании.

5.1. Разработка экспериментального стенда для исследования селективно-инвариантных ЭМС

Практическая реализация и экспериментальные исследования разработанных СИ ЭМС проводилась на базе лабораторного стенда с использованием технологии RCP, реальных компонентов электропривода, а также микропроцессорного контроллера и управляющей ЭВМ.

В структуру экспериментального стенда (рис. 5.1) входит:

– электромеханическая часть, состоящая из интегрированного сервопривода серии СПШ [26], выполненного на базе электродвигателя переменного тока и преобразователя частоты, в котором используется векторное управление переменными;

– микропроцессорная часть, включающая в свой состав схему аналогового ввода-вывода, схему дискретного ввода-вывода и плату сопряжения NI PCIe-6343;

– информационно-вычислительная часть, состоящая из ЭВМ.

Состав, назначение и взаимодействие указанных блоков иллюстрирует функциональная схема на рис. 5.1.

В качестве информационно-вычислительного компонента установки выбран ПК типа Intel Core i5-3570, 3.4 GHz / 8 Gb / 1 Tb с операционной системой (ОС) Windows. Для реализации технологии RCP выбран

программный комплекс MATLAB, широко используемый при моделировании динамических объектов и систем управления.

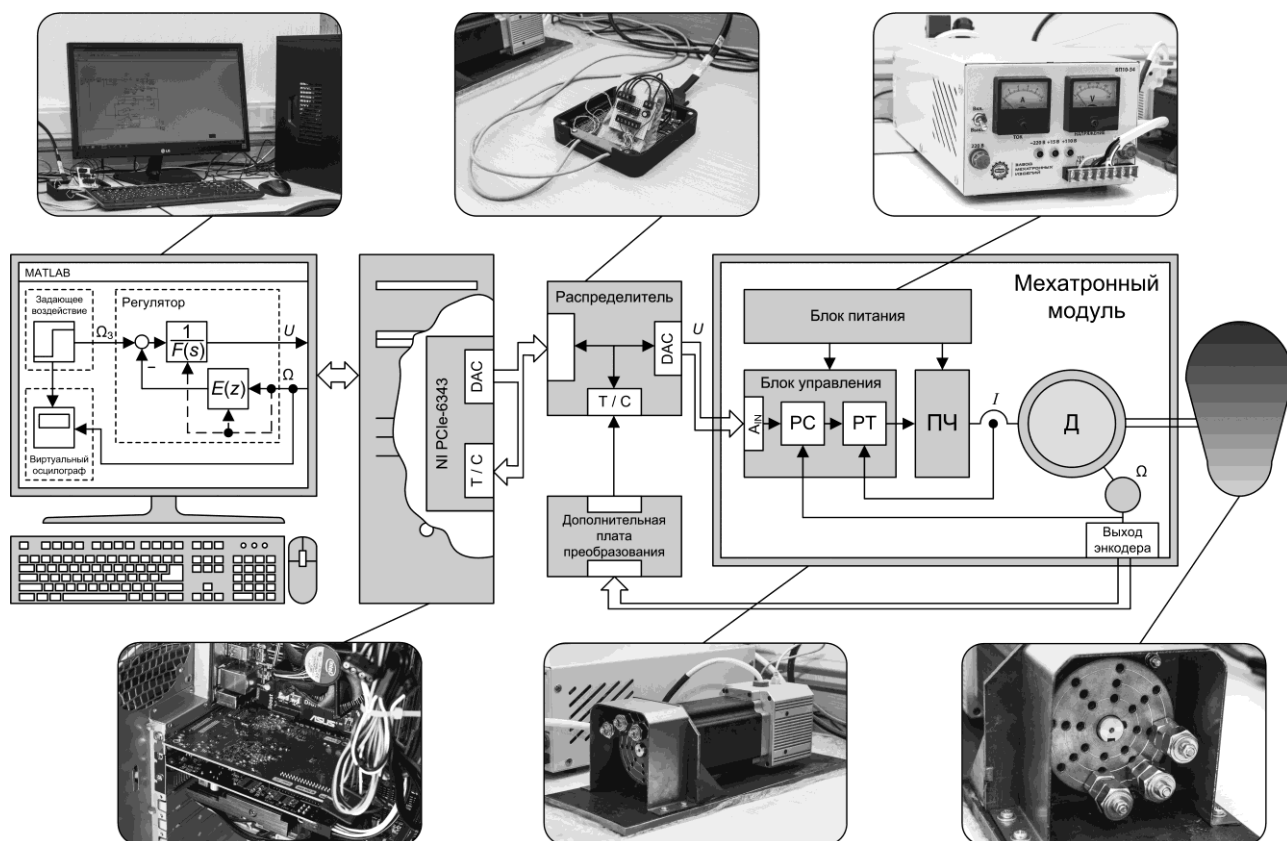


Рис. 5.1. Функциональная схема и внешний вид основных элементов стенда, разработанного с использованием технологии быстрого прототипирования. *PC* – регулятор скорости; *PT* – регулятор тока; *ПЧ* – преобразователь частоты; *Д* – двигатель; *DAC* – цифроаналоговый преобразователь; *T/C* (Timer/Counter) – таймер/счетчик; *AIN* – аналоговый вход; $F(s)$, $E(z)$ – полиномы регулятора внешнего контура; Ω_3 , Ω – заданное и текущее значение угловой скорости двигателя; U – напряжение управления; I – ток двигателя.

Важным аргументом в пользу выбора именно этого программного комплекса стало наличие в нем библиотеки реального времени Real-Time Windows Target [87].

Библиотека Real-Time Windows Target — это специальный программный продукт, обеспечивающий выполнение модели пакета Simulink в реальном времени непосредственно в среде ОС Windows при взаимодействии с внешними объектами. С помощью Simulink Coder генерируется и компилируется С-код, который выполняется в реальном времени на ПК в среде ОС Windows при обмене информацией с аппаратными платами ввода-вывода. Real-Time Windows Target добавляет в состав Simulink специальные

интерфейсные блоки для организации взаимодействия моделей с внешними устройствами. Библиотека предоставляет драйверы, которые поддерживают широкий набор плат ввода-вывода, обеспечивающих сопряжение с внешними устройствами. Все это позволяет достичь высокой частоты дискретизации информационно-управляющих сигналов, приближающейся к уровню 20 кГц.

Средства переключения конфигураций моделей в пакете Simulink позволяют использовать одну и ту же модель для имитационного моделирования и тестирования в связке “компьютерная модель — реальное устройство”. Кроме этого можно контролировать выполнение модели, осуществлять регистрацию данных, настройку параметров, просмотр сигналов и запуск или остановку выполнения, как в имитационном режиме, так и в режиме реального времени с помощью панели инструментов Simulink.

Таким образом, при использовании программного комплекса MATLAB совместно с библиотекой реального времени становится возможным быстро исследовать новые программные решения регуляторов без длительного написания и отладки кода разработчиком.

В качестве объекта управления был выбран мехатронный модуль на основе интегрированного сервопривода серии СПШ, содержащего встроенные регуляторы для подчиненного регулирования тока, скорости и положения, каждый из которых может подключаться независимо.

При использовании сервопривода в составе внешнего контура управления пользователю также доступны выход датчика углового перемещения типа энкодер с разрешением 2000 имп./об. и аналоговый вход ± 10 В для задания скорости двигателя.

Для создания внешнего гармонического возмущения на вал двигателя установлен механический эксцентрик. Он представляет собой металлический диск с радиально расположенными осевыми отверстиями для закрепления грузов. Меняя взаимное расположение и вес дополнительных грузов, т.е. конфигурацию эксцентрика, можно влиять как на амплитуды гармонических составляющих динамического момента нагрузки, так и на состав гармоник.

Согласующим устройством между реальным объектом и регулятором, реализованным на компьютере, является плата ввода-вывода.

Следуя техническим требованиям и рекомендациям производителя, среди доступных устройств была выбрана плата NI PCIe-6343 [83], имеющая интерфейс PCI Express, 32 аналоговых входа, четыре аналоговых выхода, 48 цифровых линий ввода-вывода, четыре 32-х битных таймера-счетчика.

Выбранная плата ввода-вывода была установлена в свободный разъем PCI Express персонального компьютера.

Рассмотренные элементы стенда соединяются между собой следующим образом.

Селективно-инвариантное управляющее устройство реализуется средствами программного комплекса MATLAB и представляется в виде блок-схемы. Его работоспособность предварительно проверяется при взаимодействии с моделью объекта.

Управляющий сигнал (напряжение) с регулятора посредством платы NI PCIe-6343 выводится на клеммы распределителя, откуда, в свою очередь, поступает на аналоговый вход сервопривода. Следует отметить, что аналоговый вход привода является дифференциальным, а плата NI PCIe-6343 не оснащена дифференциальными выходами. Поэтому дифференциальный выход был организован из двух однополярных, что позволяют возможности платы. Связь регулятора с платой ввода-вывода осуществляется с помощью блока “Analog Output” библиотеки реального времени программного комплекса MATLAB, настраиваемого на работу с выбранной платой NI PCIe-6343.

Сервопривод СПШ оснащен энкодером с дифференциальными выходами, а плата PCIe-6343 принимает однополярный сигнал. Поэтому решено использовать дополнительную плату согласования, преобразующую дифференциальный сигнал в однополярный вид. Таким образом, сигнал с энкодера привода, несущий информацию о текущей скорости вращения вала, преобразуется с помощью дополнительной платы, затем поступает на клеммы распределителя и далее анализируется платой NI PCIe-6343, счетчики которой

доступны для программного опроса средствами комплекса MATLAB. Для этих целей в библиотеке реального времени программного комплекса MATLAB используется специальный блок “Encoder Input”, настроенный в данном случае на работу в квадратурном режиме, что увеличивает в четыре раза точность определения положения вала ЭД. На выходе блока “Encoder Input” присутствует текущий угол поворота вала, измеренный в отсчетах энкодера. При этом текущая скорость вращения вала вычисляется программно средствами MATLAB.

Плата ввода-вывода NI PCIe-6343 используется совместно с распределителем, который не содержит активных элементов и служит лишь для удобного подключения к плате внешних проводников.

5.2. Экспериментальные исследования и оценка эффективности селективно-инвариантных ЭМС

Основной задачей экспериментальных исследований является оценка эффективности разработанных модификаций селективно-инвариантных ЭМС в условиях воздействия возмущений, характерных для реальных технологических объектов. Для проведения экспериментов использовалась ЭМС, включающая внутренние и внешний контуры управления структурная схема, которой представлена на рис. 5.2.

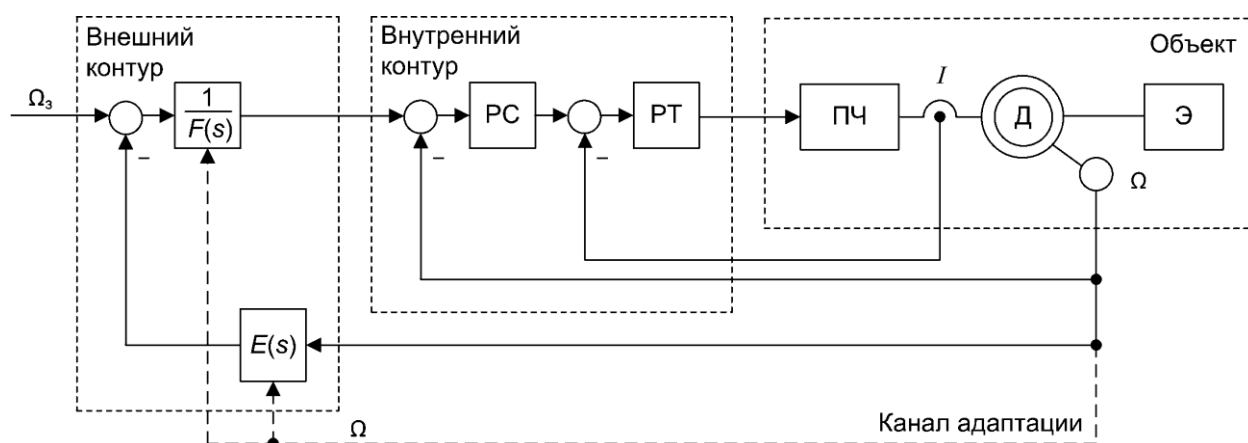


Рис. 5.2. Структурная схема исследуемой установки

Внутренние контуры построены по принципу подчиненного регулирования координат на базе регуляторов тока (РТ) и скорости (РС) и

настроены на быстродействие 30 мс и 100 мс соответственно. Управляющее устройство внешнего контура содержит математическую модель гармонической составляющей момента нагрузки и имеет структуру полиномиального регулятора входа-выхода. Согласно техническим требованиям внешний контур управления обеспечивает быстродействие в 200 мс.

Каскадный регулятор реализован в блоке управления мехатронного модуля и настроен с помощью программы “Мотомастер” посредством технологического USB-интерфейса. Настройка выполнялась при отсутствии эксцентрика на валу ЭД. После завершения настройки сервопривода на заданное быстродействие и качество переходного процесса на вал электродвигателя был установлен эксцентрик с конфигурацией, изображенной на рис. 5.1. Выявлено, что дополнительное гармоническое возмущение на валу двигателя оказывает существенное влияние на скорость его вращения (рис. 5.3, а).

Регулятор внешнего контура, включающий модель гармонического возмущения и имеющий следующий вид передаточных функций полиномов:

$$F(s) = s^2 + \omega_1^2; E(s) = 1,91s^2 + \left(84,68 - \frac{\omega_1^2}{30}\right) \cdot s + (821,4 - \omega_1^2) \quad (5.1)$$

выполнен в виде блок-схемы средствами Simulink программного комплекса MATLAB. Предварительно была проверена работоспособность регулятора при взаимодействии с моделью объекта управления. Проверка показала, что регулятор обеспечивает требуемые динамические и статические характеристики (рис. 5.3, б) и, следовательно, без каких-либо изменений может быть подвергнут стендовым испытаниям.

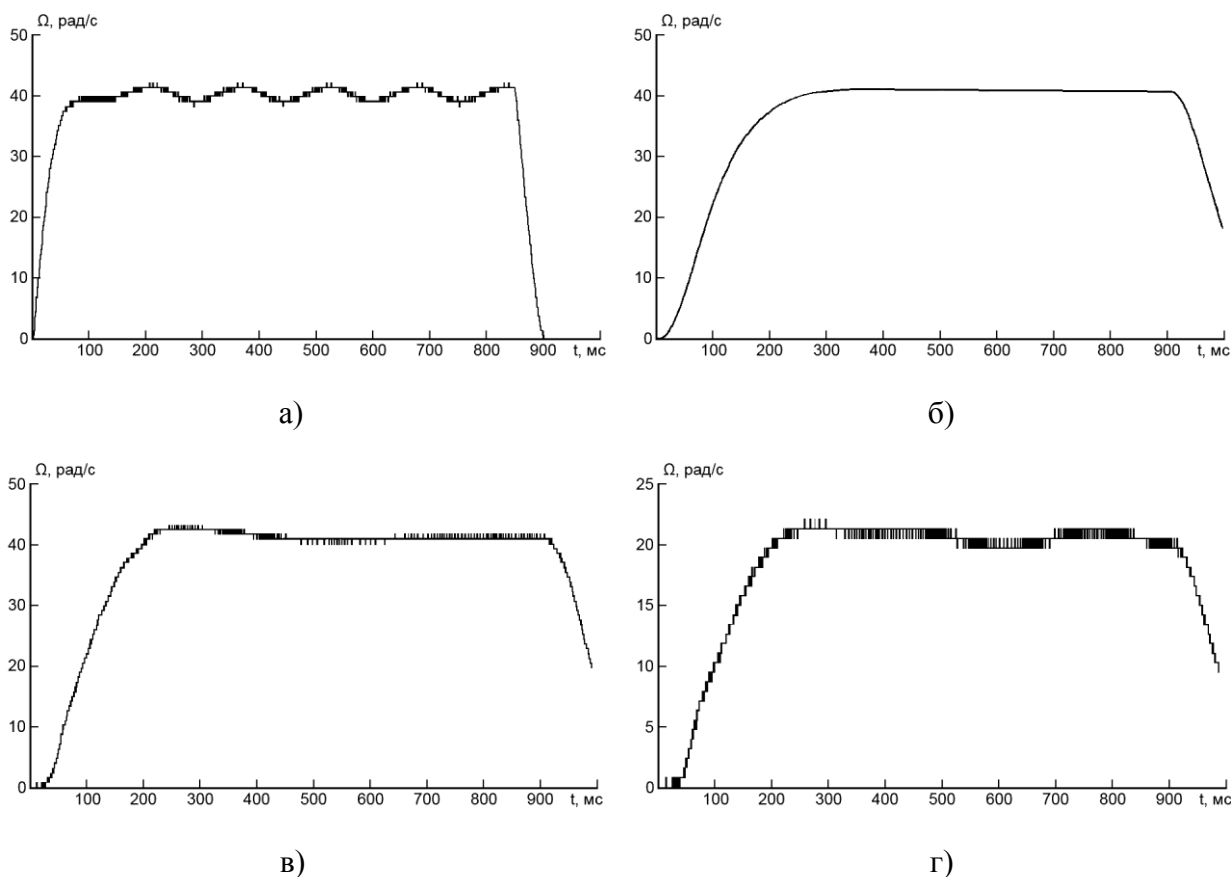


Рис. 5.3. Результаты экспериментальных исследований

Вначале исследование проводилось для неадаптивного варианта системы (рис. 5.2). Параметры модели возмущения соответствовали расчетной скорости 40 рад/с, период дискретизации информационно-управляющих сигналов составлял 1 мс. Гармоническое возмущение в ходе эксперимента действовало постоянно.

В качестве иллюстрации на рис. 5.3, в, г показаны графики переходных процессов в системе при пуске соответственно на расчетную скорость 40 рад/с и на пониженную скорость 20 рад/с, полученные при подключении к ПК мехатронного модуля с установленным на валу двигателя эксцентриком. Они наглядно демонстрируют снижение эффективности более простого варианта регулятора в отработке гармонического возмущения при изменении уровня рабочей скорости.

На следующем этапе стендовым испытаниям был подвергнут адаптивный вариант системы. Канал адаптации (рис. 5.2) при этом активизировался, а параметры модели возмущения автоматически перестраивались согласно (5.1)

при изменениях текущей скорости ЭП. Полный вариант структуры адаптивного регулятора скорости, реализованный программными средствами пакета Simulink, представлен на рис. 5.4.

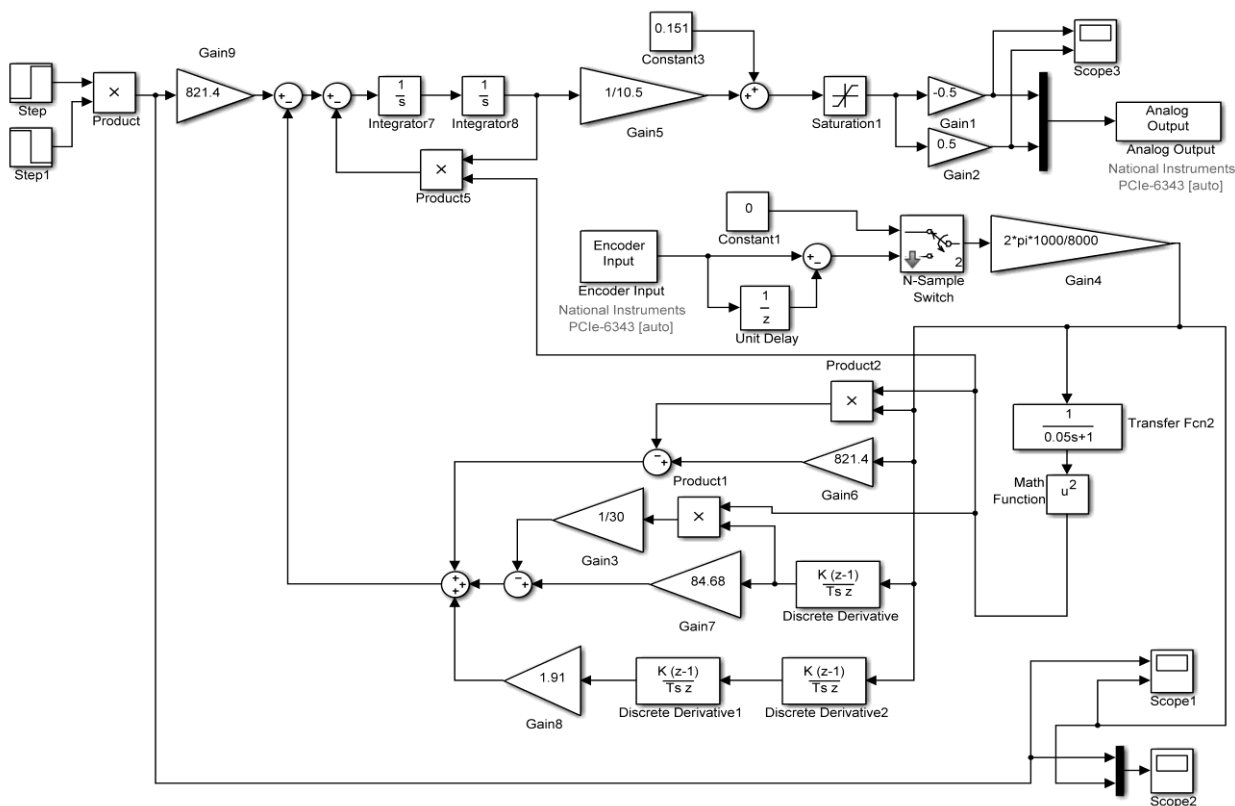


Рис. 5.4. Структура адаптивного регулятора скорости в ПК MATLAB

Графики переходных процессов (рис. 5.5, а, б), полученные при пуске ЭМС на те же уровни рабочих скоростей, показывают высокое качество отработки возмущений по моменту нагрузки и стабильные динамические показатели системы в широком скоростном диапазоне.

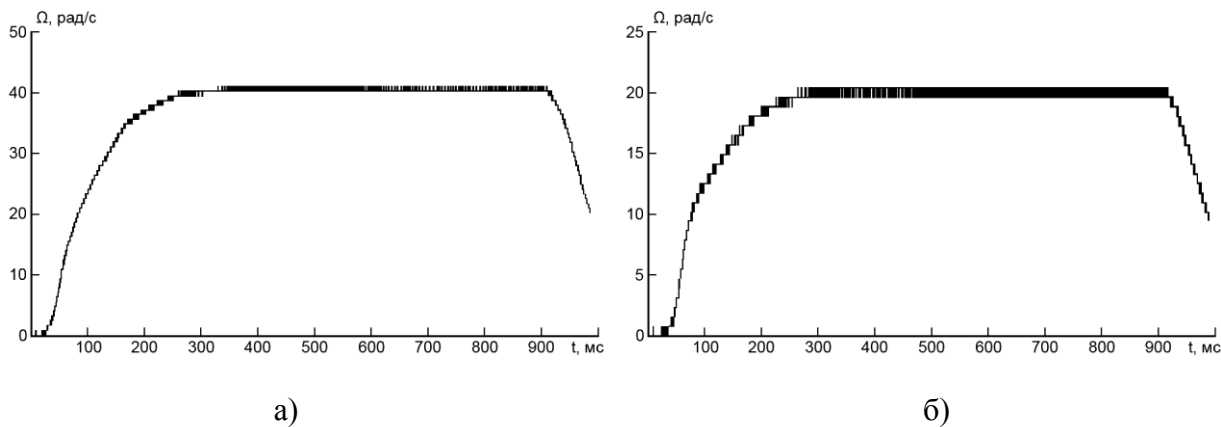


Рис. 5.5. Результаты экспериментальных исследований системы с каналом адаптации при пуске на рабочую скорость 40 рад/с (а) и 20 рад/с (б)

Аналогичным образом на экспериментальном стенде исследовались другие варианты селективно-инвариантных мехатронных систем различной степени сложности, разработанные в ходе выполнения диссертационных исследований [31-33, 57-59, 61, 88-90]. Они в значительной степени подтвердили полученные ранее результаты моделирования и вычислительных экспериментов, но позволили отразить специфику работы реальных физических элементов ЭМС (исполнительного двигателя, управляемого преобразователя, аналоговых и дискретных датчиков) в условиях воздействия на мехатронный модуль реальных возмущений. При этом затраты времени на переходы от одного типа регулятора к другому оказывались минимальными и определялись только сменой модели управляющего устройства в среде программного комплекса MATLAB.

При необходимости столь же оперативно на стенде может быть выполнена замена исполнительного электропривода при наличии у него стандартных входов и выходов для информационно-управляющих сигналов.

Выводы

1. Разработанный экспериментальный стенд:

– позволяет оперативно проводить комплексные практические исследования различных типов селективно-инвариантных ЭМС высокой сложности в условиях, приближенных к реальным. Реализует технологию быстрого прототипирования мехатронных систем на стадиях их проектирования и конструирования, что существенно сокращает затраты времени на формирование инновационных технических решений;

– создает возможности для быстрой модификации структуры и перестройки параметров управляющего устройства, изменений силовой и информационно-датчиковой части ЭМС. При этом исключаются трудоемкие и времязатратные процедуры ручного составления программы управления, снижается вероятность появления ошибок программирования при реализации сложных цифровых регуляторов.

2. Результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием разработанного оборудования и средств автоматизации, подтверждают высокую эффективность разработанных вариантов СИ ЭМС в отработке гармонических возмущений момента нагрузки ЭД и достижения высоких динамических показателей управления.

Заключение

1. Флуктуации моментов нагрузки и, как следствие, колебания угловых скоростей электродвигателей и рабочих органов технологических машин могут приводить к существенному ухудшению потребительских свойств выпускаемой продукции из-за снижения точности изготовления изделий, погрешностей формирования их геометрических и весовых параметров, нестабильности оптических, электротехнических и других показателей качества.

2. Наиболее высокими потенциальными возможностями в отработке внешних гармонических воздействий обладают ЭМС, построенные по принципу селективной (избирательной) инвариантности с использованием внутренней модели возмущения.

Однако в своих традиционных исполнениях СИ ЭМС имеют ряд существенных недостатков, к которым следует отнести: повышенную сложность управляющих устройств и чувствительность систем к вариациям внутренних параметров, пониженную помехоустойчивость, а также ограниченные возможности дальнейшего улучшения инвариантных свойств и их дополнения другими показателями качества по желанию проектировщика.

3. Сочетание принципа селективной инвариантности с такими принципами ТАУ, как разделение темпов движения локальных подсистем управления, регулирование состояния по внутренним координатам и по выходу САУ, каскадное и подчиненное регулирования координат, а также разделение модели возмущения на отдельные составляющие с их перемещением в контуры «быстрых» и «медленных» подсистем, позволяет получить новые структурные решения СИ ЭМС, более эффективные в достижении заданного качества управления.

При этом эффект компенсации гармонического возмущения достигается не только на частоте настройки его модели, но в значительной мере сохраняется и на других частотах в скоростном диапазоне ЭМС, подтверждая робастные свойства синтезированных систем.

4. Объединение модальных методов параметрического синтеза безынерционных и динамических регуляторов состояния и «входа-выхода» с методами синтеза каскадных регуляторов и подчиненного регулирования координат, а также применение метода редуцирования регуляторов на основе их структурного представления в канонической форме наблюдаемости позволяет реализовать оперативный автоматизированный расчет параметров управляющих устройств для всех разработанных структур СИ ЭМС.

5. Результаты проведенных компьютерных исследований разработанных вариантов СИ ЭМС по комплексу показателей качества отражают их достоинства, недостатки, определяют области предпочтительного использования, чем облегчают проектировщику выбор оптимального структурного решения по заданной схеме компромиссов в конкретных практических применениях электропривода.

6. Реализация принципа адаптации с использованием предложенного алгоритма перестройки параметров управляющих устройств с моделью возмущения в зависимости от уровня рабочей скорости электропривода позволяет обеспечить наиболее полную компенсацию гармонических колебаний момента нагрузки электродвигателя в широком скоростном диапазоне с сохранением условий устойчивости системы.

7. Разработанный экспериментальный стенд, содержащий реальные устройства силовой и информационно-управляющей электроники, исполнительные электродвигатели с источниками механических колебаний нагрузки, и полученные результаты проведенных натурных испытаний СИ ЭМС, подтверждают практическую реализуемость предложенных научно-технических решений и их высокую эффективность в достижении поставленной цели диссертационной работы.

Список литературы

1. Автоматизация технологических процессов в текстильной промышленности: Учеб. Пособие / Петелин Д.П., Козлов А.Б., Джелаянов А.Р., Шахнин В.Н. – М.: Легкая индустрия, 1980. – 320 с.
2. Автоматизация технологических процессов легкой промышленности – Учебн. пособие для вузов по спец. «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов» / Плужников Л.Н. Елин А.В., Кочеров А.В. и др.; Под ред. Плужникова Л.Н. – М.: Высш. шк., 1984. – 368 с.
3. Автоматизация типовых технологических процессов и установок: Учеб. для вузов/ А. М. Корытин, Н. К. Петров, С. Н. Радимов, Н. К. Шапарев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 432 с.
4. Андриевский Б.Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 1999.
5. Барышников В.Д., Куликов С.Н. Автоматизированные электроприводы машин бумагоделательного производства. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 144 с.
6. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учеб. для вузов / Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
7. Бобцов А.А. Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 8. – С. 25 – 32.
8. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия, 1979. – 160 с.
9. Борцов Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.

10. Быстров А.М., Глазунов В.Ф. Многодвигательные автоматизированные электроприводы поточных линий текстильной промышленности. – М.: Легкая индустрия, 1977. – 200 с.
11. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. – М.: Высш. шк., 1977. – 391 с.
12. Вара А.В., Змеу А.В. Малогабаритный аэродинамический стенд как объект для быстрого прототипирования систем управления в учебно-исследовательских целях // Вестник ДГТУ. 2010. № 2 (4).
13. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1985.
14. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчински Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 376 с.
15. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами: Пер. с англ. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 384 с.
16. Высокоскоростное формирование волокон / Под ред. А. Зябицкого и Х. Каваи; Пер. с англ. Под ред. К. Е. Перепалкина. – М.: Химия, 1988. – 488 с.
17. Гайдук А.Р. Основы теории систем автоматического управления: учеб. пособие / А.Р. Гайдук. – М.: Учебно-методический и издательский центр УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА, 2005.
18. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход) – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
19. Глазунов В.Ф., Прокушев С.В. Автоматизация оборудования для непрерывной обработки текстильных материалов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 348 с.
20. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.

21. Деруссо П. Пространство состояний в теории управления: для инженеров / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Коулз; пер. с англ. Р.Т. Янушевского; под ред. М.В. Меерова. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
22. Зайцева М.В. Робастное управление линейным объектом при наличии возмущений и помех / Зайцева М.В., Паршева Е.А. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. - №3.
23. Зорин И.Ф., Петров В.П., Рогольская С.А. Управление процессами целлюлозно-бумажного производства. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – 272 с.
24. Иванов Г.М., Левин Г.М., Хуторецкий В.М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.
25. Иванов Г.М., Никитин Б.К. Автоматизированный электропривод агрегатов непрерывного действия. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 224 с.
26. Интегрированный сервопривод СПШ. [Электронный ресурс] // Сервотехника. [Офис. сайт]. URL: <http://www.servotechnica.ru/catalog/type/brand/index.pl?id=18> (дата обращения: 18.02.2016).
27. Колесников А.А. и др. Синергетическое управление нелинейными электромеханическими системами. – М.: Испо-сервис, 2000. – 248 с.
28. Кондрашкова Г.А., Леонтьев В.Н., Шапоров О.М. Автоматизация технологических процессов производства бумаги. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 328 с.
29. Копылова Л. Г., Самаринский С. А., Тарарыкин С. В., Тихомирова И. А. Многофункциональный стенд для экспериментальных исследований прецизионных мехатронных систем // Приборы и техника эксперимента. – 2017. №1. – С. 158 – 160.
30. Копылова Л.Г., Тарарыкин С.В. Компенсация гармонических возмущений момента нагрузки в следящих электромеханических системах и элементы структурной оптимизации регуляторов. – Вестник ИГЭУ, 2012, Вып. 6.

31. Копылова Л. Г., Тарарыкин С. В., Тихомирова И. А. Структурно-параметрический синтез астатических систем управления электроприводами на основе разделения модели гармонического момента нагрузки // Труды IX Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (3-7 октября 2016 г.) – Пермь: Изд-во Пермского. ун-та, 2016. – С. 174-178.
32. Копылова Л. Г., Тихомирова И. А., Тарарыкин С. В. Структурно-параметрический синтез астатических систем управления электроприводами с гармоническими возмущениями момента нагрузки // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (7-9 октября 2014 г.): в 2 т. Т. 1 / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 46-51.
33. Копылова Л. Г., Тихомирова И. А., Тарарыкин С. В. Разделение модели гармонического возмущения при структурно-параметрическом синтезе астатических систем управления электроприводами // Материалы Международной науч.–техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 220-224.
34. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Кузовков Н.Т. - М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
35. Кулебакин В.С. Об основных задачах и методах повышения качества автоматики управляемых систем // Труды II Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования. Т. II. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 184–207.
36. Кулебакин В.С. Операторное $K(D)$ -изображение функций и его практическое применение // Труды ВВИА им. Н.Е. Жуковского. – 1958. – Вып. 695.

37. Кулебакин В.С. Об основных задачах и методах повышения качества автоматического регулирования систем / В.С. Кулебакин // Тр. II Всес. совещ. по теории автоматического регулирования. Т. II – М.: Наука, 1965.
38. Лебедев А.М., Орлова Р.Т., Пальцев А.В. Следящие электроприводы для станков с ЧПУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 223 с.
39. Лещенко В.Г., Мильман А.Я., Хавкин В.П. Автоматизированный электропривод оборудования для производства нетканых материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 142 с.
40. Литвинов Н.Д. Метод расположения корней характеристического полинома, обеспечивающий заданные степень устойчивости и колебательность системы / Литвинов Н.Д. // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1995. – №4. – С. 53 – 61.
41. Малышков М.М., Лещенко В.Г., Лапшинская В.И. Автоматизация красильно-отделочного производства. – М.: Легкая индустрия, 1976. – 280 с.
42. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: Учеб. для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
43. Новохатко С. М. Способы соединения оптических волокон для передачи информации / Электротехническая промышленность. Кабельная техника. – 1983. – №3.
44. Песьяков Г. Н., Шевчук В. А. Системы регулирования, управления и контроля бумагоделательного оборудования. – М.: Лесная промышленность, 1983. – 144 с.
45. Попов Е. П., Письменный Г. В. Основы робототехники: Введение в специальность: Учеб. для вузов по спец. «Робототехнические системы и комплексы». – М.: Высш. шк., 1990. – 224 с.
46. Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.X: в 2 т. / В. Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – Т. 1. – 1999. – 366 с.

47. Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.X: в 2 т. / В. Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – Т. 1. – 1999. – 304 с.
48. Рабкин Р. Л., Смагоринский А.Б., Фрадин А.Ш. Автоматизированные электроприводы машин для производства синтетических нитей. – Л.: Машиностроение, 1982. - 167 с.
49. Рывкин С.Е., Изосимов Д.Б., Байда С.В. Синтез цифрового управления электроприводом с упругими механическими связями // Электричество. – 2004. – № 11. – С. 46 – 55.
50. Соколовский Г.Г. Система управления электроприводом с упругостью // Электричество. – 1984. – № 1.
51. Севостьянов А.Г., Севостьянов П.А. Оптимизация механико-технологических процессов текстильной промышленности: Учеб. для вузов. – М.: Легпромиздат, 1991. – 256 с.
52. Селезнева В.В. Вибродиагностика станков по результатам обработки / Надежность и диагностирование технологического оборудования: Сб. статей ИНМАШ АН СССР. – М.: Наука, 1987.
53. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под. ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
54. Тарарыкин С.В. Принципы управляемой синхронизации машин в технологических агрегатах для производства ленточных и волоконных материалов: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13, 05.09.03. – Иваново, 1992.
55. Тарарыкин С.В., Софронов С.В. Автоматизация процессов производства полимерного оптического волокна / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 144 с.
56. Тарарыкин С. В., Копылова Л. Г., Тихомирова И. А. Структурно-параметрический синтез и оптимизация регуляторов селективно-инвариантных электромеханических систем с гармоническим моментом нагрузки // Электротехника. – 2015. №5. – С. 62 – 70.
57. Тарарыкин С. В., Тихомирова И. А., Копылова Л. Г. Применение принципа разделения модели гармонического возмущения в структурно-

- параметрическом синтезе селективно-инвариантных электромеханических систем // Электротехника. – 2016. №12. – С. 51 – 60.
58. Тарарыкин С. В., Тихомирова И. А., Копылова Л. Г. Сравнительный анализ эффективности селективно-инвариантных электромеханических систем // Электротехника. – 2017. №3. – С. 78 – 85.
59. Тарарыкин С. В., Тютиков В.В. Системное проектирование линейных регуляторов состояния: учеб. пособие / Министерство образования Российской Федерации, ИГЭУ; под ред. В.Н. Нуждина. – Изд. 2-е, стер. – Иваново, 2000. – 98 с.
60. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2000. – 212 с.: ил.
61. Тихомирова И. А., Копылова Л. Г., Тарарыкин С. В. Анализ структурных реализаций селективно-инвариантных электромеханических систем // Вестник ИГЭУ – 2015. №5. – С. 47 – 54.
62. Тихомирова И. А., Копылова Л. Г., Тарарыкин С. В. Частотный анализ инвариантных свойств электромеханических систем // Материалы Международной науч.–техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 224 – 229.
63. Трубицын Н.Ф. Синтез характеристического многочлена линейной системы // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1997. – № 1. – С. 28 – 30.
64. Тютиков В.В. Робастное модальное управление технологическими объектами / В.В. Тютиков, С.В. Тарарыкин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2006. – 256 с.
65. Тютиков В.В., Копылова Л.Г., Тихомирова И.А., Шляцкая Е.М. Сокращение порядка управляющего устройства при синтезе САУ полиномиальным методом // Вестник ИГЭУ – 2017. №5. – С. 44 – 52.

66. Управление электроприводом упругого механизма при использовании расширенной информации об объекте / Г.Г. Соколовский, Ю.В. Постников // Автоматизированный электропривод, 1990. – С. 65–76.
67. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики: Учеб. для вузов. – 2-изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 368 с.
68. Цыкунов А.М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 7. – С. 103 – 115.
69. Цыкунов А.М. Алгоритм управления нестационарным объектом с компенсацией возмущений // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 4. – С. 33 – 40.
70. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / И.В. Черных; под ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. – 496 с.
71. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов / Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
72. Шёнфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы / Пер. с нем.; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
73. Шестаков В.М. Регулируемые электроприводы отделочных агрегатов целлюлозно-бумажной промышленности. – М.: Лесная промышленность, 1982. – 160 с.
74. Шестаков В.М. Системы электропривода бумагоделательного производства. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 240 с.
75. Шмелев А.Н. Электрооборудование промышленных предприятий и установок текстильного производства / Шмелев А.Н., Шишло К.С. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 296 с.

76. Шмелев А.Н., Шишло К.С. Электрооборудование промышленных предприятий текстильного производства. – М.: Легкая индустрия, 1975. – 311 с.
77. Щипанов Г.В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. – 1939. – № 1. – С. 49 – 66.
78. Boldea I., Nasar S. A. Electric Drives. – CRC Press, Boca Raton London, New York, Washington, D. C., 1999. – 350 p.
79. Chee-Mun Ong. Dynamic Simulation of electric Machinery. – Prentice Hall PRT, 1997. – 626 p.
80. Control System Toolbox User's Guide – The Math Works, Ink., 1998. – 538 p.
81. Hölttä V., Palmroth L., Eriksson L. Rapid Control Prototyping Tutorial with Application Examples // Sim-Serv – Virtual Centre for Simulation, www.sim-serv.com, 2004.
82. Kaino T. e. a. // Rev. Electrical Communication laboratories, 1984, v. 32, №3. P. 478.
83. Kopylova L.G., Samarinskiy S.A., Tararykin S.V., Tikhomirova I.A. Development and practical application of a multifunctional test bench for experimental research of precise mechatronic systems // Indian Journal of Science and Technology – 2016. №9. – С. 162 – 169.
84. L. G. Kopylova, S. V. Tararykin, I. A. Tikhomirova Structural and parametric synthesis of astatic control systems for electric drives based on separation of harmonic load torque model // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017.
85. NI PCIe-6343. [Электронный ресурс] // National Instruments. [Офис. сайт]. URL: <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-890/lang/ru> (дата обращения: 18.02.2016).
86. Scherf H. Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme. Eine Sammlung von Simulink-Beispielen, 4. Aufl. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. München. 2010.

87. Simulink Desktop Real-Time. [Электронный ресурс] // MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing. [Офис. сайт]. URL: <http://www.mathworks.com/products/simulink-desktop-real-time/index.html> (дата обращения: 18.02.2016).
88. Tararykin S.V., Kopylova L.G., Tikhomirova I.A., Structural and parametric synthesis and optimization of controllers of selective-invariant electromechanical systems with harmonic load torque // Russian Electrical Engineering. – 2015. №5. – С. 296 – 303.
89. Tararykin S.V., Tikhomirova I.A., Kopylova L.G. Application of the principle of harmonic-disturbance model separation for structural-parametric construction of selectively invariant electromechanical systems // Russian Electrical Engineering. – 2016. №12. – С. 684 – 692.
90. Tararykin S.V., Tikhomirova I.A., Kopylova L.G. A comparative analysis of the efficiency of selectively invariant electromechanical systems // Russian Electrical Engineering. – 2017. Т. 88. №3. – С. 170 – 177.

Патент РФ на изобретение «Способ адаптивной компенсации влияния гармонических колебаний момента нагрузки в электромеханической системе и устройство для его осуществления»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2565490

СПОСОБ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МОМЕНТА НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014151064

Приоритет изобретения **16 декабря 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **17 сентября 2015 г.**

Срок действия патента истекает **16 декабря 2034 г.**

Заместитель руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Патент РФ на изобретение «Способ компенсации влияния гармонических колебаний момента нагрузки в электромеханической системе и устройство для его осуществления»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2608081

**СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ
ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МОМЕНТА
НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015125475

Приоритет изобретения 26 июня 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 13 января 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 26 июня 2035 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

Патент РФ на изобретение «Способ устранения влияния гармонических возмущений момента нагрузки в электромеханической системе»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2648930

СПОСОБ УСТРАНЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ МОМЕНТА НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Тарарыкин Сергей Вячеславович (RU), Копылова Лариса Геннадьевна (RU), Терехов Анатолий Иванович (RU), Тихомирова Ирина Александровна (RU)*

Заявка № 2016147807

Приоритет изобретения 06 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации в

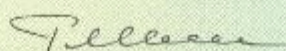
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 28 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 декабря 2036 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 Г.П. Иванев



Патент РФ на изобретение «Устройство для устранения влияния гармонических возмущений момента нагрузки в электромеханической системе»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2650341

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ВЛИЯНИЯ
ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ МОМЕНТА
НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Тарарыкин Сергей Вячеславович (RU), Копылова Лариса Геннадьевна (RU), Терехов Анатолий Иванович (RU), Тихомирова Ирина Александровна (RU)*

Заявка № 2016147809

Приоритет изобретения 06 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 апреля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 декабря 2036 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

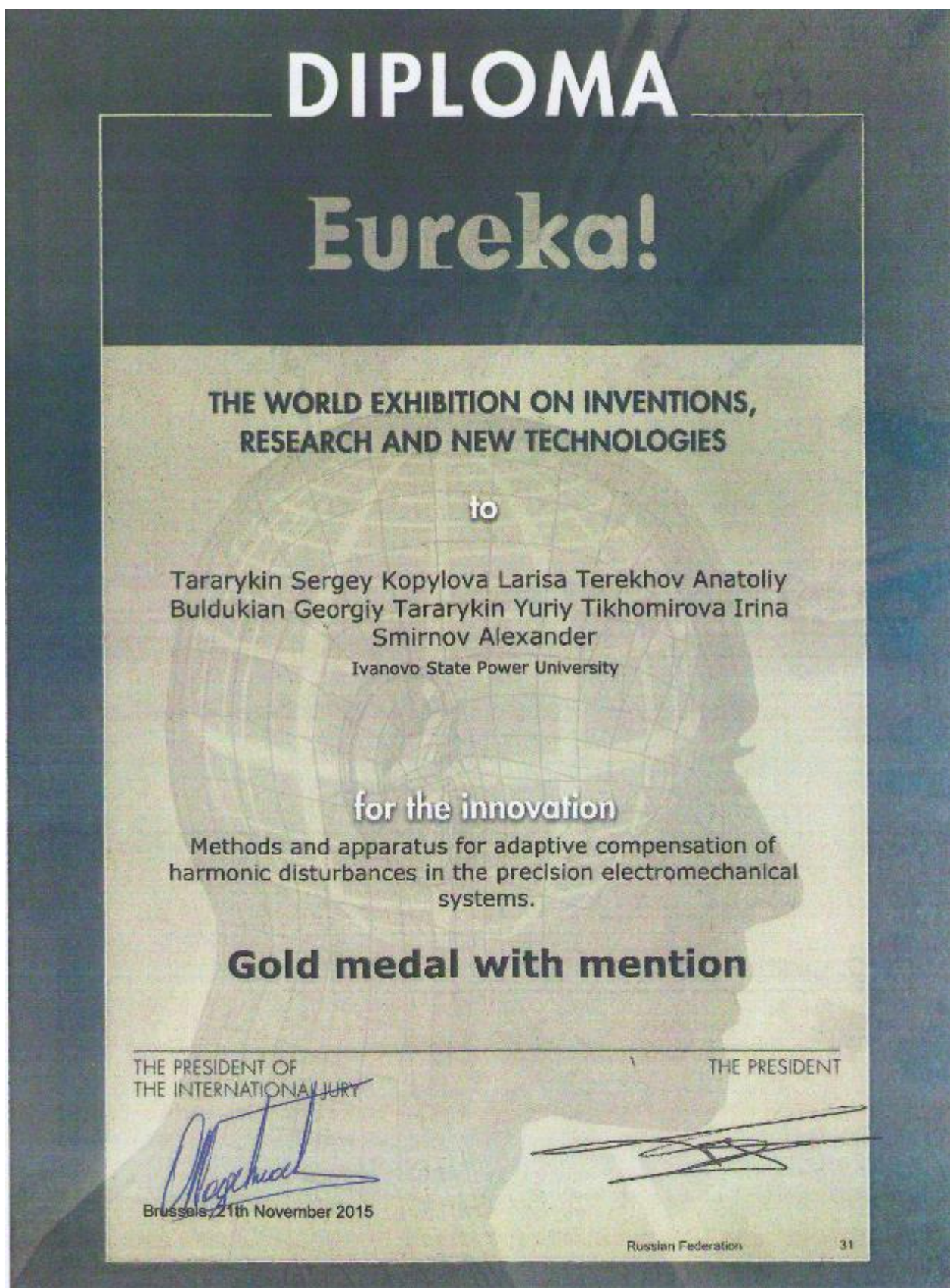
Г.П. Ивлиев

Приложение 5

Диплом федеральной службы по интеллектуальной собственности за разработку представленную на международном салоне инноваций



**Свидетельство о награждении разработки Золотой медалью с
Отличием салона инноваций, научных исследований и новых технологий
«Брюссель-Иннова/Эврика 2015»**



Приложение 7

Диплом федеральной службы по интеллектуальной собственности за разработку представленную на международном салоне инноваций



Акт о внедрении результатов НИР в учебный процесс



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ИГЭУ по учебной
работе к.т.н. доцент

А. В. Гусенков
А. В. Гусенков

2018 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов НИР в учебный процесс кафедры
«Электроника и микропроцессорные системы»

Настоящим актом подтверждается, что результаты кандидатской диссертационной работы Тихомировой И.А. на тему «Разработка и исследование электромеханических систем со свойствами селективной инвариантности к колебаниям момента нагрузки» используются на кафедре «Электроника и микропроцессорные системы» ИГЭУ в учебном процессе подготовки студентов по направлению 27.03.04 «Управление в технических системах» на уровнях бакалавриата и магистратуры.

Разработанные варианты селективно-инвариантных электромеханических систем и методы их автоматизированного синтеза применяются в лекционных, лабораторных и практических занятиях при изучении дисциплин «Мехатроника», «Современные проблемы теории управления», а также в научно-исследовательской работе студентов.

Заведующий кафедрой Э и МС,
д.т.н., профессор

Тарарыкин С.В.

Старший преподаватель кафедры
Э и МС

Тихомирова И.А.