

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (СПбГМТУ)

На правах рукописи



Мин Хеин

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ПОДЧИНЕННОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор
Туркин Игорь Иванович

Санкт-Петербург

2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1.....	18
СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	18
1.1. Анализ состояния и перспектив развития электропривода.....	18
1.2. Особенности современного автоматизированного электропривода как объекта управления.....	26
1.3. Постановка задачи.....	34
ГЛАВА 2.....	37
СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭП И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИХ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	37
2.1. Адаптивные системы и их классификация.....	37
2.2. Структурные схемы существующих адаптивных систем управления электроприводами	40
2.2.1. Адаптивная система с параметрической самонастройкой	43
2.2.2. Адаптивная система с сигнальной самонастройкой	44
2.2.3. Адаптивные системы с самонастройкой, принцип действия, структура	45
2.3. Общая характеристика технологии алгоритмического обеспечения [22]	47
2.3.1. Синтез алгоритмов (законов) управления на стадии проектирования системы	49
2.3.2. Синтез управления в реальном времени в процессе функционирования систем	50
2.4. Универсальные системы управления [24]	50
2.5. Алгоритмы адаптивных универсальных систем управления с текущей идентификацией	53

2.5.1. Система с обобщенным фильтром Калмана-Бьюси (ФКБ) и алгоритмом прогнозирующей модели.....	53
2.5.2. Система с автономной идентификацией и алгоритмом прогнозирующей модели	56
2.6. Выводы по главе 2.....	58
ГЛАВА 3.....	59
ПРИНЦИПЫ САМООРГАНИЗАЦИИ, ПОДЧИНЁННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ	59
3.1. Принцип самоорганизации и его применение	59
3.1.1. История разработки самоорганизующегося регулятора с экстраполяцией	59
3.1.2. Принцип действия самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией.....	64
3.1.3. Алгоритмическое обеспечение самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией.....	67
3.2. Принцип подчинённого регулирования и его применение	73
3.2.1. История развития принципа подчинённого регулирования.....	73
3.2.2. Принцип подчинённого регулирования, структура и содержание.....	74
3.2.3. Алгоритмическое обеспечение систем подчинённого регулирования ...	79
3.3. Методика совместного использования принципов самоорганизации, подчинённого регулирования для автоматизации электроприводов	88
3.4. Выводы по главе 3.....	91
ГЛАВА 4.....	92
АДАПТИВНЫЕ НА ПРИНЦИПАХ САМООРГАНИЗАЦИИ МНОГОЦЕЛЕВЫЕ С РАСШИРЕННЫМ КРУГОМ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ	92

4.1. Адаптивная двухконтурная скоростная систем управления ЭП	92
4.1.1. Выбор структурной схемы системы	93
4.1.2. Формирование обобщённой математической модели	94
4.1.3. Настройка СОРЭ-регулятора	97
4.1.4. Имитационное моделирование	115
4.2. Адаптивная одноконтурная скоростная система управления ЭП	116
4.3. Адаптивная система регулирования положения ЭП	120
4.4 Адаптивные многоцелевые с повышенной живучестью системы управления ЭП	123
4.5. Выводы по главе 4	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В современных условиях роль и значение автоматизированного электропривода как энергетической и интеллектуальной основы современного машинного производства постоянно возрастают. Проникновение микропроцессорной техники в область управления электроприводами оказывает большое влияние на их структуру и технические средства. Современное состояние вычислительной техники позволяет успешно реализовать сложные интеллектуальные алгоритмы обработки информации и формирования управлений. Потребности в автоматизации намного опережают разработку детального математического описания технологических процессов и возможную номенклатуру средств автоматизации узкого назначения. Успех в применении систем управления с микропроцессорными элементами зависит от нескольких факторов: достигнутого уровня развития теории управления, степени разработанности вычислительных методов для реализации алгоритмов управления, состояния и возможностей вычислительной техники, наличия прикладных методов проектирования. Устранение разрыва между уровнем развития теории управления, алгоритмов и методов их программного завершения, средств реализации, с одной стороны, и возможностями использования этих результатов для решения задач повышения эффективности автоматизации различных объектов в целом, с другой, является одной из задач первостепенного значения. При наличии такого разрыва современные системы управления объектами различного назначения с ЭВМ, в том числе электроприводами (ЭП), не могут быть использованы эффективно. Вследствие этого современная практика нуждается не только в оптимальных, но и в адаптивных оптимальных алгоритмах автоматического управления и обработки информации. В самые последние годы появились новые фундаментальные направления в теории и технике управления (теория самоорганизующихся регуляторов, универсальные системы управления с прогнозируемой моделью и др.), на основе которых созданы автоматизированные объекты различного назначения с принципиально новыми характеристиками

[5,22.24,33,35.38]. Их развитие и применение для автоматизации электроприводов может приобрести важное практическое значение. Указанные обстоятельства обуславливают очевидную актуальность создания на основе одного из этих направлений – теории самоорганизующихся регуляторов автоматизированных электроприводов с новыми возможностями по самоорганизации алгоритмов управления и расширению круга решаемых задач.

Цель и задачи работы. Целью диссертации работы является разработка нового типа адаптивных систем управления ЭП на основе совместного применения принципов подчинённого регулирования (ПР) и самоорганизации ЭП, отличающихся наличием структурно–параметрической адаптации и расширенным кругом решаемых задач при неопределённых внутренних и внешних возмущениях.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Выполнить анализ опыта автоматизации ЭП. Выявить особенности современного АЭП как объекта управления;
2. Выполнить анализ существующих подходов к построению адаптивных систем управления ЭП. Определить современные технологии их алгоритмического обеспечения;
3. Исследовать особенности применения принципа подчинённого регулирования для синтеза систем управления ЭП и принципа самоорганизации для синтеза систем управления динамическими объектами общего типа. Разработать общую методику синтеза адаптивных систем управления ЭП нового типа на основе совместного использования принципов самоорганизации и подчинённого регулирования.
4. Разработать конкретные адаптивные системы управления ЭП и адаптивные многоцелевые СУ электроприводами с повышенной живучестью.

Научная новизна диссертационной работы. Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснован подход к разработке АЭП с новыми возможностями по самоорганизации алгоритмов управления и расширению круга решаемых задач;
2. Обоснована и показана возможность развития принципа подчинённого регулирования для синтеза алгоритмов управления ЭП с нелинейными и нестационарными математическими моделями;
3. Обоснована и показана эффективность применения самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией для ЭП;
4. Разработана методика синтеза и моделирования нового типа адаптивных многоцелевых СУЭП на основе совместного использования принципов самоорганизации и подчинённого регулирования для автоматизации ЭП;
5. Разработаны конкретные нового типа адаптивные СУЭП - одноконтурная и двухконтурной скоростная система управления ЭП, системы регулирования положения ЭП;
6. Разработаны адаптивные многоцелевые СУЭП нового типа с повышенной живучестью.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации. Все результаты и положения, выносимые автором представленной диссертационной работы на защиту, получены им самостоятельно. Содержащиеся в библиографическом списке публикации автора (20 публикаций, 5 из которых входят в перечень, утвержденный ВАК), достаточно полно отражают его личный вклад в получении представленных в диссертационной работе выводов и положений.

Степень достоверности результатов, полученных соискателем ученой степени кандидата технических наук и представленных в диссертационной работе. Достоверность полученных результатов обеспечивается методами исследования обозначенной задачи — выводами, полученными строгими

аналитическими методами путём имитационного моделирования процессов в разработанных системах управления ЭП и их сравнения с процессами с традиционными алгоритмами. Результаты сравнения показали эффективность принятых решений.

Методология и методы исследования. Для выполнения поставленных задач использовались методы теории управления, аналитической механики, теории матриц, методы аналитического синтеза линейных позиционно–траекторных систем управления подвижными объектами, методы имитационного моделирования. Проверка эффективности полученных в ходе работы теоретических результатов осуществлялась средствами численного моделирования в среде MATLAB. При решении задач, поставленных в диссертации, использовались методы теории автоматического управления, методы цифровой обработки информации, теория идентификации, методы математического имитационного моделирования с использованием инструментальных средств автоматизации математических и инженерных вычислений MatLab (Simulink).

Теоретическая и практическая ценность. Теоретическая ценность работы заключается в разработке и реализации подхода к синтезу систем управления ЭП различного назначения нового типа, отличающимися наличием алгоритмов самоорганизации и расширенным кругом решаемых задач при неопределённых внутренних и внешних возмущениях. Практическая значимость работы определяется наличием разработанных конкретных систем управления нового типа –одно-, двух–, многоконтурных систем ЭП, а также систем управления нового типа с повышенной живучестью. Полученные в диссертационной работе теоретические положения и аналитические выражения доведены до конкретных алгоритмических решений и практических рекомендаций по применению самоорганизующихся регуляторов с экстраполятором (СОРЭ) для совершенствования ЭП. Результаты работы

используются при выполнении научно–исследовательских работ в СПбГМТУ и в учебном процессе на кафедре Судовой автоматики и измерений (САиИ).

Публикации. По теме диссертации осуществлено 20 публикаций, из них: а) 5 публикации – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень, установленный Минобрнауки России. б) 15 публикаций в прочих изданиях.

Перечень публикаций, в которых отражены основные положения диссертационной работы:

1) публикации, входящие в рекомендованный перечень ВАК:

1. Мин Хеин. Адаптивная с высоким уровнем искусственного интеллекта система управления судовым электроприводом / Мин Хеин // Вестник АГТУ. – Серия: Морская Техника и Технология. – 2016. – Майский сборник № 2. С 95–101.

2. Мин Хеин. Совершенствование систем управления электроприводами на основе принципов подчинённого регулирования и самоорганизации / И.И. Туркин, Мин Хеин // Вестник АГТУ. – Серия: Морская Техника и Технология. – 2016. – Августовский сборник № 3. С. 86–92.

3. Мин Хеин. Адаптивные многоцелевые системы управления судовыми техническими средствами / И.И. Туркин, Мин Хеин // Вестник АГТУ. – Серия: Морская Техника и Технология. – 2017. – Февральский сборник № 1. С. 59–67.

4. Мин Хеин. Методы применения адаптивных систем автоматического управления с высоким уровнем искусственного интеллекта для совершенствования сложных объектов морской инфраструктуры / Мин Хеин // МОРИНТЕХ. – № 2 (32) том 1. – 2016. С. 69–75.

5. Мин Хеин. Система автоматического оптимального управления пространственным движением автономного необитаемого подводного аппарата типа глайдер / И. И. Туркин., А. Ю. Крятов., Мин Хеин // МОРИНТЕХ. – № 2 (32) том 1. – 2016. С. 52–58.

2) прочие публикации:

6. Мин Хеин. Учет тепловых аккумуляторов в газатурбинных двигателях / А.И. Потапов, Мин Хеин // Материалы Всероссийской межотраслевой научно–технической конференции: «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ. – 2012. С. 224–226.

7. Мин Хеин. Интеллектуальные системы с самоорганизующимися активными алгоритмами управления корабельными техническими средствами / И.И. Туркин, Мин Хеин // Недели военной науки: Материалы конференции. – Петродворец. – Санкт-Петербург. – 2014. – Часть III. С.111–113.

8. Мин Хеин. Самоорганизующиеся системы управления с высоким уровнем искусственного интеллекта морскими сложными объектами / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы XIV Санкт–Петербургской международной конференции: «Региональная информатика». – СПб. – 2014. С. 477–478.

9. Мин Хеин. Автоматическое управление судном по курсу на основе самоорганизующегося регулятора с экстраполяцией / Мин Хеин // Материалы четвертой Всероссийской межотраслевой научно–технической конференции. Посвящается 125–летию профессора, д.т.н., заслуженного деятеля науки и техники В.А. Ваншейдта: «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ. – 2015. С.168–169.

10. Мин Хеин. Самоорганизующейся регулятор с экстраполяцией и его алгоритмическое обеспечение / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы четвертой Всероссийской межотраслевой научно–технической конференции. Посвящается 125–летию профессора, д.т.н., заслуженного деятеля науки и техники В.А. Ваншейдта: «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ. – 2015. С.182–184.

11. Мин Хеин. Особенности применения самоорганизующегося регулятора при управлении сложными морскими объектами / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы четвертой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. Посвящается 125–летию профессора, д.т.н., заслуженного деятеля

науки и техники В.А. Ваншейдта: «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ. – 2015. С.184–186.

12. Мин Хеин. Интеллектуальные технологии повышения живучести судовых автоматизированных технических средств / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы конференции Военно-морского политехнического института ВУНЦ ВМФ: «Военно–морская академия». – 2015. . – Часть III. С. 205–210.

13. Мин Хеин. Управление судовыми электроприводами на основе принципов самоорганизации / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы конференции Военно-морского политехнического института ВУНЦ ВМФ: «Военно–морская академия». – 2015. – Часть III. С. 211–216.

14. Мин Хеин. Система управления движением судна по курсу с повышенной живучестью / Мин Хеин // Материалы 9–ой Санкт–Петербургской межрегиональной конференции: «Информационная безопасность регионов россии – ИБРР 2015». – 2015. С. 280–281.

15. Мин Хеин. Особенности алгоритмического обеспечения систем управления для повышения живучести судовых технических средств / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы 9–ой Санкт–Петербургской межрегиональной конференции: «Информационная безопасность регионов россии – ИБРР 2015». – 2015. С. 296–297.

16. Мин Хеин. К вопросу обеспечения живучести автоматизированных судовых технических средств / И.И. Туркин, Мин Хеин, А.В. Алексеев // Материалы 9–ой Санкт–Петербургской межрегиональной конференции: «Информационная безопасность регионов россии – ИБРР 2015». – 2015. С. 297–298.

17. Мин Хеин. Управление движением судна по курсу с повышенной живучестью / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы 9–ой Санкт–Петербургской межрегиональной конференции: «Информационная безопасность регионов россии – ИБРР 2015». – 2015. С. 298–298.

18. Мин Хеин. Об одном подходе к разработке адаптивных системы управления электроприводами / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы пятой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции: «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ. – 2016. С. 302–304.

19. Мин Хеин. Системы управления для повышения работоспособности и живучести объектов морской техники / И.И. Туркин, Мин Хеин // Материалы конференции Военно-морского политехнического института ВУНЦ ВМФ: «Военно-морская академия». – 2016. – Часть IV. С. 273–279.

20. Мин Хеин. Адаптивные алгоритмы с расширенными задачами по управлению судовыми электроприводами / Мин Хеин // Материалы конференции Военно-морского политехнического института ВУНЦ ВМФ: «Военно-морская академия». – 2016. – Часть II. С. 375–378.

Основные положения диссертации также докладывались и широко обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. Межвузовская научно-техническая конференция «Неделя военной науки» 1–7 апреля 2014 г. ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Петродворец - Санкт-Петербург.

2. 3-я Всероссийская межотраслевая научно-техническая конференция «Актуальные проблемы морской энергетики». Санкт-Петербург, 13–14 февраля 2014 г. СПбГМТУ.

3. XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика - РИ-2014». Санкт-Петербург, 29–31 октября 2014 г.

4. 4-я Всероссийская межотраслевая научно-техническая конференция «Актуальные проблемы морской энергетики». Санкт-Петербург, 12–13 февраля 2015 г. СПбГМТУ.

5. 26-ая Межвузовская научно-техническая конференция «Неделя военной науки». Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Петродворец – Санкт-Петербург. 21–27 апреля 2015 г.

6. 9-ая Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России – ИБРР 2015». Васильевский остров, 5-я линия, д. 46Б, Кают-компания, Санкт-Петербург. 28–30 октября 2015 г.

7. 3-ая Научная практическая конференция «Современные технологии автоматизации борьбы за живучесть - АПБЖ 2015». Санкт-Петербургский клуб моряков-подводников и ветеранов ВМФ, Санкт-Петербург. 28–30 октября 2015 г.

8. 5-ая Всероссийская межотраслевая научно-техническая конференция «Актуальные проблемы морской энергетики». Санкт-Петербург, 18–19 февраля 2016 г. СбГМТУ.

9. 27-ая Межвузовская научно-техническая конференция «Неделя военной науки». Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Петродворец – Санкт-Петербург, 12–17 апреля 2016 г.

10. International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering, NAOE2016, June 6–8, 2016, Saint-Petersburg, Russia.

Основные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Подход к разработке автоматизированных ЭП с новыми возможностями по самоорганизации алгоритмов управления и расширению круга решаемых задач;
2. Развитие принципа подчинённого регулирования для синтеза алгоритмов управления ЭП с нелинейными и нестационарными математическими моделями;
3. Эффективность применения самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией для ЭП;
4. Методика синтеза и моделирования нового типа адаптивных многоцелевых СУЭП на основе совместного использования принципов самоорганизации и подчинённого регулирования для автоматизации ЭП;

5. Конкретные нового типа адаптивные СУЭП - одноконтурная и двухконтурной скоростная система управления ЭП, системы регулирования положения ЭП;
6. Адаптивные многоцелевые СУЭП нового типа с повышенной живучестью.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из настоящего введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 142 страницы основного текста (включая – 4 таблицы и – 72 рисунка), списка литературы из 101 наименований.

В первой главе анализируется современное состояние и перспективы применения систем управления ЭП на основе информации Всесоюзных конференций по электроприводу. Приведены характерные черты автоматизированных ЭП и направления их развития. Особое внимание обращается на интеллектуализацию автоматизированного ЭП, заключающуюся во все большем использовании сложных систем автоматического управления, в первую очередь, с адаптивными алгоритмами. ЭП как объекты управления относятся к классу сложных нестационарных объектов с нелинейными характеристиками различного вида, так как во время эксплуатации практически все элементы привода подвергаются внешним возмущающим воздействиям.

Алгоритмы для микропроцессорных систем управления должны обеспечивать одновременно решение как традиционных задач управления (снабжения этих систем адаптивными свойствами), так и задач повышения их работоспособности и живучести (предотвращение аварийных режимов или обеспечения безопасности в аварийных ситуациях). Именно развитие и применение для совершенствования систем управления ЭП этого подхода – многоцелевого управления, направленного на обеспечение его адаптивными свойствами и расширенным кругом решаемых задач является целью работы.

Вторая глава посвящена анализу существующих подходов к построению адаптивных систем управления ЭП. Рассмотрены классификация адаптивных систем, приведены структурные схемы основных типов адаптивных систем управления ЭП. Приведены общая характеристика технологии алгоритмического обеспечения адаптивных систем и структурная схема, а также содержание универсальных систем управления. Представлены алгоритмы адаптивных универсальных систем управления с текущей идентификацией. Сделаны выводы о современном состоянии и исследуемых путях построения адаптивных систем управления ЭП, включающие следующие утверждения:

1. В большинстве выполненных исследований в качестве моделей управляемого процесса принимаются линеаризованные математические модели ЭП;

2. Существующие подходы к построению адаптивных систем управления ЭП обеспечивают только параметрическую адаптацию и традиционные не расширенные задачи автоматизации;

3. Перспективными адаптивными системами управления являются системы с текущей идентификации, основанной на соединении процессов идентификации и собственно управления. Однако, системы с обобщенным фильтром Калмана-Бьюси (ФКБ) и алгоритмом прогнозирующей модели, а также с автономной идентификацией и прогнозирующей моделью не обладают самоорганизующимися функциями. Наиболее перспективной и эффективной является система с обобщенными ФКБ и адаптацией времени экстраполяции – самоорганизующаяся система.

В третьей главе рассмотрены особенности применения принципа подчинённого регулирования для синтеза систем управления ЭП и принципа самоорганизации для синтеза систем управления динамическими объектами общего типа, включающие историю развития принципов, алгоритмическое обеспечение, достоинства, ограничения, потенциальные возможности и области применения. Системы управления на основе принципа подчинённого

регулирования применяются практически на ЭП постоянного и переменного тока самого различного типа. В связи с этим его развитие позволит не только создавать АЭП нового типа, но и совершенствовать существующие при их модернизации. Представлена общая методика синтеза адаптивных систем управления ЭП нового типа на основе совместного использования принципов самоорганизации и подчинённого регулирования. Адаптивные системы управления ЭП на основе принципов подчинённого регулирования и самоорганизации приобретают отдельные свойства характерные как для систем подчинённого регулирования и самоорганизующихся, так и новые. Применение предлагаемого подхода, в частности, приводит к возможности разработки систем управления одновременно с алгоритмами структурной и параметрической адаптации, а также с ограничениями на конкретные отдельные переменные [85-87].

Четвёртая глава посвящена разработке адаптивных многоцелевых системы управления ЭП. Рассмотрены вопросы выбора структурных схем, формирования математических моделей ЭП, процедуры настройки самоорганизующихся регуляторов и имитационного моделирования. Для сравнительного анализа рассмотрены два варианта синтеза систем: системы управления ЭП с традиционными регуляторами на основе метода подчинённого управления и адаптивной системы с совместным применением регулятора на основе принципа подчинённого регулирования и самоорганизующегося регулятора (СОРЕ - регулятора) при наличии различных внутренних и внешних возмущений. Разработаны конкретные нового типа адаптивные СУЭП - одноконтурная и двухконтурной скоростная система управления, системы регулирования положения. Выделены отдельно разработанные адаптивные многоцелевые СУЭП, обеспечивающие одновременно решение традиционных задач управления (снабжения этих систем адаптивными свойствами), так и задач повышения их работоспособности и живучести (предотвращение аварийных режимов). Решение задачи адаптивного управления основано на концепции самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЕ)

академика РАН А.А. Красовского, решение задач повышения их работоспособности и живучести этих систем - на концепции многоцелевого управления. Показано, что одновременное решение указанных задач возможно только при использовании адаптивных алгоритмов управления, реализующих не только параметрическую, но и структурно – параметрическую адаптацию системы.

ГЛАВА 1

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ состояния и перспектив развития электропривода

В современных экономических условиях роль и значение автоматизированного электропривода как энергетической и интеллектуальной основы современного машинного производства, постоянно возрастают. В связи с быстрыми темпами развития базовых отраслей техники актуальной является задача оснащения электроприводов новейшими техническими средствами в целях более полного удовлетворения усложняющихся требований автоматизации производственных процессов. Электрический привод (ЭП) играет большую роль в реализации задач повышения производительности труда в разных отраслях народного хозяйства, автоматизации и комплексной механизации производственных процессов. Около 70 % вырабатываемой электроэнергии преобразуется в механическую энергию электродвигателями (ЭД), которые приводят в движение различные станки и механизмы.

Учитывая эту роль электропривода, начиная с 20-х годов прошлого века, и по сей день, отечественный электропривод развивался и продолжает развиваться как важнейшее направление электротехнической науки и электротехнического производства. Электротехническая отрасль глубоко научна по своему характеру, масштабна по объему научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ. Существует огромное количество статей, монографий, обзоров, посвящённых состоянию, перспективам и проблемам развития электропривода. Наиболее наглядно это отражено в наименованиях, содержаниях, списках участников и их количествах научно-технических конференций по проблемам электропривода. Постановка новых проблем в электроприводе, пути их решения, правильная организация работ по их выполнению и т.д. – вопросы, при решении которых нельзя обойтись без коллективного разума научно-технической общественности. Именно поэтому в решении научно-технических и

производственных задач в области электропривода Всесоюзные и международные конференции сыграли значительную роль [1]. С 1964 г. работу по организации и проведению конференций возглавила кафедра Автоматизированного электропривода Московского энергетического института в тесном сотрудничестве с институтом ВНИИЭЛЕКТРОПРИВОД и другими организациями. Конференции стали проводиться систематически, а их решения определяли основные задачи на период между очередными конференциями. В работе конференций принимали участие представители различных отраслей промышленности, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, высших учебных заведений.

За 80 лет было проведено 20 Всесоюзных (Всероссийских) конференций по электроприводу, данные о которых сведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Всесоюзные (Всероссийские, международные) конференции по автоматизированному электроприводу

Полное наименование конференции или совещания	Дата и место проведения	Число участников	Число докладов
Первая Всесоюзная конференция по электромоторным приводам	Апрель 1930г. Харьков	282	50
Вторая Всесоюзная конференция по электроприводу	1933г. Харьков	Данных нет	Данных нет
Третья Всесоюзная конференция по электроприводу	1938г. Москва	Данных нет	Данных нет
Четвертая Всесоюзная конференция по электроприводу	1939г. Ленинград	Данных нет	Данных нет
Научно-техническая сессия по электроприводу	1947г. Ленинград	127	70

Совещание по автоматизированному электроприводу переменного тока	1955г. Москва	370	30
Третье Всесоюзное объединенное совещание по автоматизации производственных процессов в машиностроении и автоматизированному электроприводу в промышленности	1959г. Москва	Ленинград	53 (по электроприводу)
IV Всесоюзная конференция по автоматизированному электроприводу	1964г. Ереван	400	230
V Всесоюзная конференция по автоматизированному электроприводу	1968г. Тбилиси	700	412
VI Всесоюзная научно- техническая конференция по автоматизированному электроприводу	1972г. Баку	442	148
VII Всесоюзная научно- техническая конференция по автоматизированному электроприводу	1975г. Таллинн	444	82
VIII Всесоюзная научно- техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода, силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе	1979г. Ташкент	604	238
IX Всесоюзная научно-			

техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1983г. Алма-Ата	410	158
X Всесоюзная научно- техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1987г. Воронеж	287	130
XI Всесоюзная научно- техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1991г. Суздаль	289	115
XII Всероссийская (I международная) научно- техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1995г. Санкт- Петербург	300	100
XIII Всероссийская (II международная) научно- техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	1998г. Ульяновск	150	124
XIV Всероссийская (III международная) научно- техническая конференция по проблемам автоматизированного электропривода	2001г. Нижний Новгород	200	178
XV Всероссийская (IV международная) научно-	2004г.	300	230

техническая конференция по автоматизированному электроприводу	Магнитогорск		
---	--------------	--	--

Основная тематика некоторых конференций приведена в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Основная тематика послевоенных конференций по электроприводу

Год проведения	Основные вопросы, рассматривавшиеся на конференции
1947	Теоретические вопросы электроприводов постоянного тока с применением электромашинных усилителей. Энергетика мощных электроприводов. Расширение областей применения индивидуального электропривода.
1955	Создание и перспективы развития электроприводов переменного тока. Электроприводы с дроссельным управлением. Применение каскадных схем. Частотно-регулируемый электропривод на базе электромашинных и статических преобразователей. Развитие электроприводов постоянного тока с применением магнитных усилителей.
1959	Электроприводы с управляемыми ртутными выпрямителями. Перспективы развития. Методы расчета статических и динамических режимов. Состояние развития электроприводов переменного тока.
1964	Теоретические вопросы применения электроприводов постоянного тока с управляемыми тиристорными выпрямителями. Проблемы регулируемого электропривода переменного тока. Задачи комплексной автоматизации технологических процессов.
1968	Электроприводы с тиристорными преобразователями. Оптимальные режимы работы электроприводов. Применение систем электропривода в различных отраслях народного хозяйства.
1972	Теория и практика электроприводов с подчиненным регулированием координат. Системы дискретного электропривода. Применение управляющих вычислительных машин.
1975	Вопросы развития общей теории электропривода. Теория и практическое использование линейных двигателей. Развитие теоретических основ и практики поставок комплектных электроприводов.

1979	Принципы оптимизации электроприводов. Адаптивное управление в электроприводе. Новые технические средства. Методы проектирования и рационального использования силовых преобразователей
1983	Научно-технические аспекты повышения эффективности электроприводов. Развитие микропроцессорных средств и их применение в электроприводе.
1987	Разработка методов автоматизированного проектирования электроприводов. Создание средств компенсации вредного влияния тиристорных электроприводов на питающую сеть
1991	Применение в системах электроприводов средств силовой преобразовательной техники. Состояние и перспективы развития электроприводов постоянного и переменного тока.
1995	Состояние и тенденции развития электроприводов. Развитие следящих электроприводов мощных антенных установок. Перспективы развития преобразователей частоты для частотно регулируемого электропривода на базе новых силовых полупроводниковых приборов.
1998	Проблемы электропривода на данном этапе развития. Энергосбережение средствами электропривода в различных технологиях и разработка технических средств для реализации энергосбережения
2001	Состояние и тенденции развития электроприводов. Совершенствование и создание новых моделей электрических двигателей для электроприводов. Развитие силовых полупроводниковых приборов и преобразовательной техники.
2004	Применение электропривода в различных отраслях промышленности, в энергетике, на транспорте, в коммунальном хозяйстве и др. Развитие электроприводов и их технических средств (двигателей, преобразователей, микропроцессорных средств).
2007	Проблемы электропривода на данном этапе. Развитие элементной базы электропривода. Микропроцессорные системы управления. Развитие теории автоматического управления и применение новых способов управления в электроприводе.
2010	Состояние и тенденции развития электроприводов. Высокоточные системы автоматического регулирования в электроприводе. Энергосбережение средствами электропривода в различных технологиях.

Примером типовой конференции может являться VII Международная конференция по автоматизированному электроприводу, которая проходила со 2 по 4 октября 2012 года в г. Иваново на базе Ивановского государственного энергетического университета. Конференция была организована Ассоциацией инженеров по электроприводу, Ивановским государственным энергетическим университетом, Национальным исследовательским университетом МЭИ. Конференция отличалась высокой представительностью: в ее работе приняли участие более 100 ученых и специалистов, работающих в области автоматизированного электропривода, электрических двигателей, силовых полупроводниковых преобразователей, микропроцессорных систем управления и других элементов электропривода и автоматики. На конференцию были представлены 175 докладов от всех регионов России. 75% докладов – от сферы образования, 25% - от сферы производства. Были также представлены доклады зарубежных авторов (Германия, Украина, Белоруссия, Казахстан, Узбекистан).

Всероссийской XX (IX Международная) конференция по автоматизированному электроприводу - АЭП-2016 проходила в Перми, 3-7 октября 2016. На последних конференциях 2012-2016 годов рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся анализа современного состояния техники электропривода и путей ее развития. Они включают анализ изменившихся условий производства, маркетинга и внедрения комплектных электроприводов и его средств, конкурентоспособности отечественной продукции, а также вопросы теории электропривода, теории автоматического управления, вопросы создания новых энергосберегающих электродвигателей, полупроводников преобразователей электрической энергии, микропроцессорных систем управления, вопросы применения автоматизированного электропривода в различных отраслях экономики страны: в промышленности, на транспорте и других отраслях, вопросы энерго и ресурсосбережения средствами автоматизированного электропривода, а также задачи, связанные с подготовкой специалистов и научных кадров по автоматизированному электроприводу.

Констатируется, что значение автоматизированного электропривода для модернизации экономики страны связано, прежде всего, с тремя обстоятельствами [2]:

- автоматизированный электропривод является неотъемлемой частью машиностроения и его развитие невозможно без адекватного (а то и опережающего) развития электропривода;
- создание большинства новых высоких технологий невозможно без обеспечения их высокоточными электроприводами и системами автоматизации;
- повышение энергоэффективности и энергосбережение во всех отраслях хозяйства в значительной степени базируется на использовании регулируемого автоматизированного электропривода.

Характерными чертами современного этапа развития техники электропривода являются:

- современный электропривод базируется на использовании новых электродвигателей: энергосберегающих асинхронных, синхронных с возбуждением от постоянных магнитов, вентильно-индукторных и других;
- глобальное использование регулируемых электроприводов с двигателями переменного тока во всем диапазоне мощностей и во всех сферах использования электропривода;
- построение регулируемых электроприводов на основе полупроводниковых преобразователей электрической энергии, построенных на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах: транзисторах или тиристорах с комбинированным управлением;
- широкое использование прямого цифрового управления на базе микропроцессорной техники;
- объединение систем управления координатами электропривода с управлением технологическим процессом, которое реализует данный электропривод.

С ростом степени интеграции в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам с встроенным набором специализированных периферийных устройств, значительные успехи силовой электроники, сделали необратимой тенденцию массовой замены аналоговых систем управления приводами на системы прямого цифрового управления. Подтверждено также реальным зарубежным и отечественным опытом, что наиболее эффективным и перспективным направлением развития электропривода, является использование регулируемого электропривода и развитие систем автоматизации, прежде всего, адаптивных систем управления ЭП [2,3].

1.2. Особенности современного автоматизированного электропривода как объекта управления

Электропривод представляет собой электромеханическую систему, электрическая часть которой состоит из электрических преобразователей, электромеханического преобразователя и системы управления, а механическая включает в себя все связанные движущиеся массы привода и механизма. Соответствующая этому определению функциональная схема современного автоматизированного электропривода представлена на рис. 1.1 [8,9].

На рис. 1.1. широкими линиями со стрелками обозначены потоки силовой энергии, а тонкими линиями – информационные потоки. Стрелки определяют направление передачи энергии или информации.

В состав автоматизированного электропривода входят следующие элементы:

- коммутационная и защитная аппаратура (КЗА);
- электрический преобразователь энергии;
- электромеханический преобразователь энергии – электрический двигатель;
- механический преобразователь энергии;
- система управления электропривода (СУЭП).

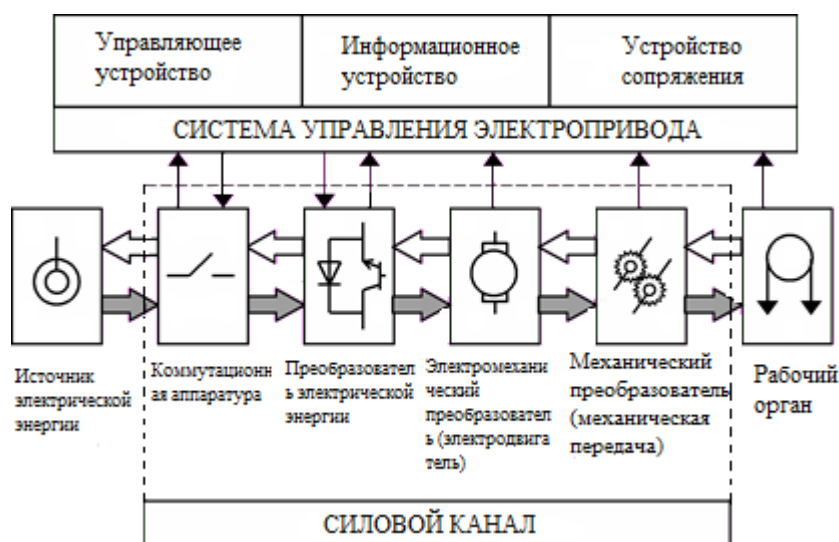


Рисунок 1.1 – Функциональная схема современного автоматизированного электропривода

Система автоматического управления электропривода содержит управляющее устройство, информационное устройство и устройство сопряжения.

Коммутационная и защитная аппаратура, электрический преобразователь энергии, электромеханический преобразователь энергии и механический преобразователь энергии образуют силовой канал электропривода.

Коммутационная и защитная аппаратура, электрический преобразователь энергии и электрическая система электродвигателя образуют электрическую систему электропривода (ЭС).

Вращающаяся часть электродвигателя (ротор, якорь), механическая передача производственного механизма с исполнительным (рабочим) органом (ИО) рабочей машины образуют механическую систему электропривода (МС).

Если в качестве электромеханического преобразователя используется электродвигатель постоянного тока, то такой привод является электроприводом постоянного тока, если же в качестве электромеханического преобразователя используется электродвигатель переменного тока, то такой привод является электроприводом переменного тока.

В случае простейшего электропривода, силовой преобразователь может отсутствовать. В таком случае электродвигатель получает энергию

непосредственно от сети. Но, как правило, упрощение или исключение электрических элементов привода приводит к усложнению механических элементов. И, наоборот, развитая система управления, быстродействующий силовой преобразователь позволяют упростить и удешевить систему механических передач.

Электропривод состоит из нескольких разнородных элементов, которые должны быть энергетически, динамически и информационно согласованы между собой в рис. 1.2. приведены электропривода все элементы взаимосвязаны. Внутренние обратные связи связывают электродвигатель с силовым преобразователем, а механические передачи с электродвигателем. Внешние обратные связи объединяют эти элементы между собой. Все это позволяет говорить об электромеханической системе привода, которую нужно анализировать только целиком, не расчленяя на части. Обычно все электрические элементы привода объединяют в один узел, который называют комплектным электроприводом или просто электроприводом. Электромеханическая система электропривода состоит из двух взаимосвязанных частей: электропривода и механической системы (передачи) [4].

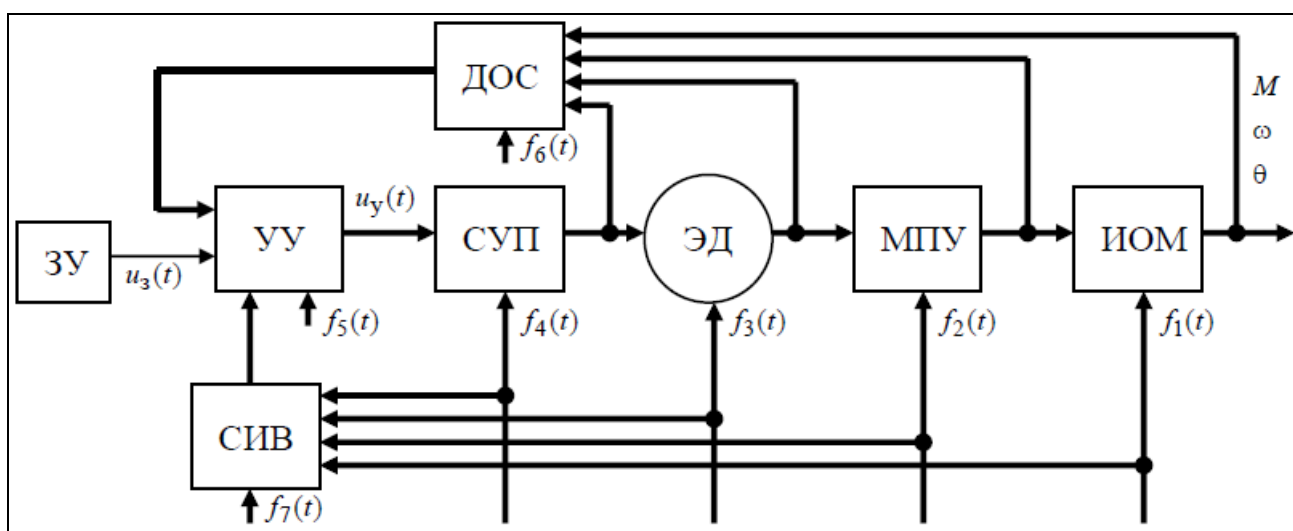


Рисунок 1.2 – Обобщенная структурная схема автоматизированного электропривода (АЭП)

Обобщенная структурная схема системы автоматизированного электропривода изображена на рис. 1.2. Здесь: ЭД – электрический двигатель; МПУ – механическое преобразовательное (передаточное) устройство; ИОМ – исполнительный орган рабочей машины (механизма); СУП – силовой управляемый преобразователь электрической энергии; ДОС – система датчиков обратных связей; СИВ – система измерения возмущений; УУ – управляющее устройство; ЗУ – внешнее задающее устройство (к ЭП не относится); $u_3(t)$ – задающее воздействие; $u_y(t)$ – управляющее воздействие СУЭП; $f_i(t)$ – внешние и внутренние возмущающие воздействия; жирными линиями показаны векторные связи.

Как следует из рис. 1.2., на каждый элемент ЭП действуют возмущения. Разумеется, главным из них, ради преодоления которого и совершения таким образом полезной работы функционирует ЭП, является момент сопротивления нагрузки, входящий в вектор возмущений $f_1(t)$, действующих на исполнительный орган механизма. Кроме момента сопротивления, в вектор $f_1(t)$ входят и возможные параметрические возмущения, в частности, при одномассовой кинематической схеме ЭП – вариации момента инерции ИОМ. В вектор возмущающих воздействий на МПУ $f_2(t)$ входят потери энергии, вызванные моментом трения, и зазоры (люфты) в передаче. Вектор $f_3(t)$ возмущений на двигатель включает в себя момент трения и изменения параметров машины – тепловой дрейф активных сопротивлений, изменения индуктивностей при смене магнитного состояния и нагрузки, падения напряжения в щеточно-коллекторном узле и т.д. В вектор $f_4(t)$, действующий на СУП, включены возмущения со стороны питающей ЭП электрической сети – дрейф напряжения и частоты, искажения формы напряжения и прочее. Вектор $f_5(t)$ содержит параметрические возмущения, возникающие вследствие неидеальности и старения элементов УУ. Векторы $f_6(t)$ и $f_7(t)$ состоят, главным образом, из ошибок измерения и помех.

Компенсации в СУЭП с помощью СИВ принципиально доступны лишь компоненты векторов $f_1(t) \dots f_4(t)$.

Выходными переменными МПУ и ИОМ являются координаты их механического движения – ускорение, пропорциональное вращающему моменту, угловая скорость (частота вращения), угол поворота. Структурный выход ЭД, кроме механических переменных, может включать токи и потокосцепления обмоток, выход СУП – напряжения или токи (для ЭП переменного тока дополнительно – частоту и фазу электрических величин).

Одним из основных требований к работе автоматических систем является высокая точность или высокие требования к обеспечению качества выходных процессов. При этом полагается решаемой задача устойчивости. Расчёт управляющих устройств классическими методами обеспечивает требуемую точность, если модель объекта управления и условие функционирования системы абсолютно известны.

Основные источники неопределённостей следующие [10,11,12]:

- неопределённость математической модели ОУ,
- неопределённость характеристик среды функционирования системы,
- неопределённость целевого условия (неопределённость цели функционирования).

Неопределённость математической модели порождается линеаризацией нелинейных уравнений динамической системы, а также параметрической неопределённостью. Отметим, что регулятор, обеспечивающий устойчивость системы, может обеспечить заданную точность только при ограниченном диапазоне вариаций характеристик ОУ и условий его функционирования.

Параметрическая неопределённость – это зависимость свойств ОУ от неизвестных параметров. Параметры могут быть неизвестными и переменными. Темп их изменения сравним с темпом процессов в объекте управления или темпом изменения внешних воздействий. Параметрическая неопределённость может быть априорной или текущей. Динамические системы с таким видом параметрической неопределённости называются **нестационарными**. Значительное влияние на поведение реальных систем управления оказывает

окружающая среда. **Неопределённость внешних условий** учитывается в математической модели в виде возмущающих воздействий и сигналов задания. В большинстве практических случаев точная форма (характер поведения) внешних воздействий остаётся неизвестным вплоть до начала работы системы управления.

Неопределённость целевого условия (неопределенность цели функционирования) заключается в формулировании требований к задачам, которые должны решаться системой, и качеству их решения.

Автоматизированные электроприводы и следящие системы в различных отраслях промышленности представляют собой нелинейные динамические системы высокого порядка с изменяемыми параметрами. К изменяемым параметрам электропривода могут быть отнесены [13]:

- момент инерции из-за изменения массы груза в подъемно-транспортных установках, взаимосвязи механических координат в многокоординатных манипуляторах и роботах;
- индуктивность в цепях возбуждения с насыщением магнитной системы; коэффициент усиления в управляемых преобразователях из-за изменения энергетического уровня источника питания;
- активное сопротивление в силовых цепях из-за изменения температурного режима.

Кроме отмеченных изменяемых параметров на показатели качества электропривода может оказывать влияние и изменяемое возмущающее воздействие, к которому может быть отнесен труднодоступный измерению момент нагрузки.

Другим существенным фактором, определяющим качество САУ, является нестабильность параметров, т. е. нестационарность ее параметров и нелинейности «сквозных» характеристик отдельных звеньев и блоков. Применительно к электроприводам влияние нестабильности параметров отражено в табл. 1.3 [14].

Наконец, немаловажным фактором является неясная перспектива, связанная с возможными изменениями параметров электроприводов на стадиях наладки,

эксплуатации и ремонта (модернизации). Наладчики, стремясь обеспечить устойчивую работу САУ при любых, даже непредвиденных заранее, изменениях в системе или условиях ее работы, вынуждены «загружать» систему, при этом существенно недоиспользуются возможности современной полупроводниковой и микропроцессорной техники, снижается производительность установок и ухудшается качество выпускаемой продукции. Отметим сразу же, что стоимость наладки современного автоматизированного электропривода составляет около 10% его общей стоимости, а потери, связанные с выходными показателями качества производимой продукции, обычно во много раз превышают стоимость электрооборудования.

Таблица 1.3 – Причины нестационарности электроприводов

Причины Нестационарности	Характерный пример	Изменяющиеся параметры системы	Характер изменения	Скорость изменения	Кратность изменения
Изменение конфигурации и взаимного расположения частей исполнительного механизма	Изменение геометрии рабочих органов промышленного робота	Электромеханическая постоянная времени	Непрерывный	Быстро, медленно	1,5 – 5
	Движение зеркала антенной установки	То же	Непрерывный	Медленно	1,5–2,5
Изменение присоединенных масс	Изменение толщины проката	Добротность, постоянные времени внутренних контуров	Непрерывный	Медленно	1,1 – 2
	Изменение массы переносимого груза	Добротность, постоянные времени	Скачкообразный	Быстро	2 – 1

Нестационарность упруговязкой механической передачи	Изменение длины каната подъемника или буровой колонны	Частота собственных колебаний	Непрерывный	Медленно	1,1 – 10
	Движение робота-манипулятора	Соотношение масс	Скачкообразный	Быстро	2 – 5
Изменение параметров объекта и системы управления под влиянием управляющих воздействий	Режимы непрерывного и прерывистого токов	Коэффициент усиления и постоянная времени токового контура	Скачкообразный	Быстро	1,5 – 3
	Изменение потока возбуждения	Электрохимическая постоянная времени	Непрерывный	Медленно	4 – 16
Температурные изменения и старение	Дрейф нуля ОУ, изменение сопротивления и емкости радиоэлементов	Коэффициент усиления, постоянные времени	Непрерывный	Медленно	1,1 – 2
	Перегрузки электрохимического узла намотки	Постоянные времени	Непрерывный	Медленно	1,1–2,5

Электроприводы, следовательно, как объекты управления относятся к классу сложных нестационарных объектов с нелинейными характеристиками различного вида, так как во время эксплуатации практически все элементы привода подвергаются внешним возмущающим воздействиям. При этом диапазоны изменения ряда параметров достигают больших значений. Решение задачи кибернетического управления (оптимизации, идентификации и адаптации) на исполнительном уровне является возможным лишь на основе сочетания лучших мировых и отечественных научных результатов в области теории

автоматического управления с современными достижениями микроэлектроники и микропроцессорной техники.

Таким образом, основными факторами, обусловившими актуальность адаптивного подхода к развитию электроприводов на современном этапе, являются:

- необходимость длительной (на весь период работы в промышленных условиях) оптимизации электроприводов с целью обеспечения проектных показателей производительности установок и качества выпускаемой ими продукции;
- стремление к облегчению комплектации электрооборудования;
- сокращение сроков наладки и переналадки электроприводов, т. е. «заводская» готовность после его ремонта и модернизации
- необходимость сокращения затрат на дефицитные электротехнические материалы, черные металлы, снижения трудоемкости изготовления и стоимости механоконструкций;
- повышение функциональной надежности электроприводов, определяющей способность объекта управления выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях.

1.3. Постановка задачи

Развитие и внедрение электронной вычислительной техники оказывает революционизирующее влияние на процессы управления. Это касается управления на всех уровнях, начиная от локальных систем автоматического регулирования и кончая высшими контурами управления в больших системах. То, что в прошлом было неосуществимым становится реализуемым посредством современных ЭВМ. Несомненно, это один из важнейших факторов, стимулирующих развитие теории оптимального управления и обработки информации [5]. Другим фактором, вызывающим это развитие, является неуклонное усложнение задач автоматического управления и повышение

требований к качеству управления. Современное развитие происходит в условиях непрерывного роста масштабов автоматизации, когда сотни и тысячи разнородных технологических процессов и объектов нуждаются в автоматизации, а многие вновь создаваемые процессы и объекты принципиально неосуществимы без высокосовершенного автоматического управления. Потребности в автоматизации намного опережают разработку детального математического описания технологических процессов и возможную номенклатуру средств автоматизации узкого назначения. Вследствие этого современная практика нуждается не только в оптимальных, но и в адаптивных оптимальных алгоритмах автоматического управления и обработки информации.

Современный этап развития науки и техники также характеризуется интеграцией результатов различных школ и направлений. На этой основе создаётся принципиально новая техника, отличающаяся чрезвычайной сложностью, расширением круга решаемых задач и диапазоном эксплуатационного использования. Концепция активного управления является одним из примеров такой интеграции, базирующейся на гармоническом сочетании сложившихся методов проектирования как сложных объектов, так и современных систем управления. В соответствии с этой концепцией активная система должна обеспечивать управление не только некоторыми выходными - технологическими переменными, характерное для традиционных систем, но и иными, которые определяют общее состояние сложного объекта и его характеристики. Другими словами, характеристики и облик сложных объектов можно формировать как с помощью конструктивных и технологических методов, присущих сложившимся традиционным методам проектирования сложных объектов, так и управлением. Такой подход получил название «активного управления объектами» или многоцелевого [6,7]. Сущность такого управления, следовательно, заключается прежде всего в значительном расширении задач, решаемых системой управления, которая становится многоцелевой. При этом конкретизируются не только частные цели автоматизации, но и общие цели

функционирования комплекса. Алгоритмы для микропроцессорных систем управления должны обеспечивать одновременно решение как традиционных задач управления (снабжения этих систем адаптивными свойствами), так и задач, например, повышения их работоспособности и живучести (предотвращение аварийных режимов или обеспечения безопасности в аварийных ситуациях).

Именно развитие и применение для совершенствования систем управления ЭП этого подхода – многоцелевого управления, направленного на обеспечение его адаптивными свойствами и расширенным кругом решаемых задач является целью работы.

ГЛАВА 2

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭП И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИХ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

2.1. Адаптивные системы и их классификация

Адаптивное управление – совокупность методов теории управления, позволяющих синтезировать системы управления, которые имеют возможность изменять параметры регулятора или структуру регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних возмущений, действующих на объект управления. Подобные системы управления называются адаптивными. Адаптивное управление широко используется во многих приложениях теории управления, в том числе при автоматизации электроприводов. Возникновение теории адаптивных систем относят ко второй половине 50-х годов [16,17,30,91,92], хотя отдельные адаптивные системы и посвященные им теоретические разработки появились значительно раньше.

Область адаптивного управления и предмет теории адаптивных систем могут быть определены на основе следующего анализа. Процесс проектирования системы управления всегда предполагает наличие, во-первых, четко сформулированной цели управления, а во-вторых, априорной информации об объекте управления и о характере действующих на него возмущений. Объем априорной информации при этом может быть различным и, за редким исключением не является исчерпывающим. Однако в данном случае принципиальным является вопрос о достаточности или недостаточности располагаемой априорной информации об объекте для достижения сформулированной цели управления. Все системы управления, построенные с использованием априорной информации, достаточной для достижения цели управления, относятся к неадаптивным, или традиционным, системам управления независимо от реализуемого принципа управления, наличия обратной связи,

случайности или детерминированности возмущений, используемых вычислительных средств и т.д. Если же объём располагаемой априорной информации о свойствах объекта не может обеспечить достижения сформулированной цели управления, то речь должна идти об адаптивных системах управления. Таким образом, к адаптивным следует относить лишь такие системы управления, которые предназначены для функционирования в условиях априорной неопределенности и которые в процессе функционирования автоматически приспосабливаются к непредвиденным изменениям свойств объекта управления и внешней среды [91,93,94,95].

Современный период развития теории и практики адаптивного управления тесно связан с быстро развивающимися средствами вычислений, в том числе и с БЦВС, способными решать достаточно сложные задачи в реальном масштабе времени. Для этого периода характерны интенсивное увеличение количества публикаций по адаптивному управлению, быстрое развитие теоретических основ адаптации и возрастание числа попыток решения прикладных задач управления на основе принципов адаптивных систем [18].

Адаптивным оптимальным алгоритмом называют алгоритм, который обеспечивает наилучший в смысле некоторого критерия качества результат в условиях неполного знания свойств объекта (процесса) и воздействия окружающей среды. Возможность автоматического приспособления к непредвиденным изменениям условий является наиболее характерной чертой адаптивных алгоритмов. Адаптивные и особенно адаптивные оптимальные алгоритмы управления имеют в современных условиях весьма большое значение. Они позволяют снизить требования к точности математического описания управляемых процессов, упростить процесс проектирования систем управления, уменьшить сроки наладки и испытаний, снизить требования к допускам на некоторую часть аппаратуры, сократить необходимую номенклатуру средств автоматизации [24,94,96,97].

Адаптивными обычно называют системы, в которых недостаток априорной информации восполняется за счет более полного (в сравнения с неадаптивными системами) использования текущей информации. Адаптивные системы более универсальны, чем неадаптивные. Они позволяют сократить сроки проектирования, наладки и испытаний, обеспечить управление новыми, мало изученными технологическими процессами и объектами. Адаптивные алгоритмы оптимального управления могут воплощать разные принципы адаптации и иметь разную структуру [25].

Классификация адаптивных систем. По способу изучения объекта системы делятся на [23]:

- поисковые;
- беспоисковые.

В первой группе особенно известны экстремальные системы, целью управления которых является поддержание системы в точке экстремума статических характеристик объекта. В таких системах для определения управляющих воздействий, обеспечивающих движение к экстремуму, к управляющему сигналу добавляется **поисковый сигнал**.

Беспоисковые адаптивные системы управления по способу получения информации для подстройки параметров регулятора делятся на:

- системы с эталонной моделью (ЭМ);
- системы с идентификатором, в литературе иногда называют, как системы с настраиваемой моделью (НМ).

Адаптивные системы с эталонной моделью содержат динамическую модель системы, обладающую требуемым качеством.

Адаптивные системы с идентификатором делятся по способу управления на:

- прямой;
- косвенный (непрямой).

При косвенном адаптивном управлении сначала делается оценка параметров объекта, после чего на основании полученных оценок определяются требуемые значения параметров регулятора и производится их подстройка. *При прямом адаптивном* управлении благодаря учёту взаимосвязи параметров объекта и регулятора производится непосредственная оценка и подстройка параметров регулятора, чем исключается этап идентификации параметров объекта.

По способу достижения эффекта самонастройки системы с моделью делятся на:

- системы с сигнальной (пассивной);
- системы с параметрической (активной) адаптацией.

В системах с сигнальной адаптацией эффект самонастройки достигается без изменения параметров управляющего устройства с помощью компенсирующих сигналов. Системы, сочетающие в себе оба вида адаптации называют комбинированными.

По характеру изменений в управляющем устройстве адаптивные системы делят на две большие группы:

- *самонастраивающиеся* (изменяются только значения параметров регулятора)
- *самоорганизующиеся* (изменяется структура и параметры самого регулятора).

2.2. Структурные схемы существующих адаптивных систем управления электроприводами

Нестационарность работы СУЭП зависит от способов управления двигателями и свойств механизмов. В процессе эксплуатации изменение параметров СУЭП происходит в следствии изменения [19,97]:

- параметров электромагнитного контура преобразователь – двигатель;
- коэффициента передачи преобразователя;

- потока возбуждения;
 - момента инерции;
 - частоты упругих колебаний механической системы;
 - взаимное изменение механических параметров взаимосвязанных систем
- много двигательного СУЭП.

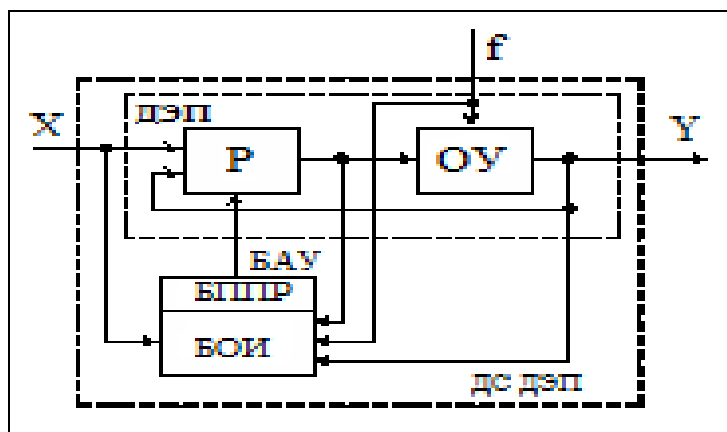


Рисунок 2.1 – Общая схема адаптивной системы: БОИ – блок обработки информации; БППР – блок перестройки регулятора.

Задачи адаптивного управления:

1. При изменении параметров системы выполнить такие изменения в СУ при которых статические и динамические свойства системы при заданных воздействиях сохраняются.
2. При отсутствии информации о СУЭП и возможных воздействиях выполнить автоматический поиск оптимальных условий работы.

Решение второй задачи связано с поиском оптимальных режимов работы системы. – перенастройка параметров системы. Решение первой задачи может быть в ряде случаев может быть выполнено применением простых методов компенсации неизменяющихся параметров систем ЭП. К примеру применить внутренние обратные связи, охватывающие часть структуры ОУ с нестационарными параметрами и обеспечит определённую избыточность по быстродействию контуров. Наряду с этим могут быть применены разнообразные

системы адаптации: идентификация системы – путём её возбуждения и автоматической перенастройкой параметров или структуры управляющей части, а

Адаптивные СУЭП делятся также, как и в общем случае, на:

- беспоисковые;
- поисковые (до работы задают пробные движения или воздействия).

Типовые структуры СУЭП следующие:

Беспоисковые. В датчиковых системах может оцениваться только поток, в бездатчиковых потокоцепление ротора и скорость.

Типовые структуры систем с эталонными моделями. Важное место среди беспоисковых самонастраивающихся систем занимают системы с эталонной моделью.

Применение моделей решить ряд важных задач: осуществить более простыми средствами желаемую оптимизацию управляемого процесса, в том числе реализацию нелинейного закона управления; обеспечить быстроедействие самонастройки при линейном и нелинейном объектах и нестационарности их параметров; обеспечить более простую реализацию за счет подстройки модели вместо подстройки основной системы при существенно изменяющихся характеристиках входных сигналов.

Разновидности беспоисковых систем, в которых эталонные модели присутствуют в явном виде, получили название систем с эталонными моделями [26].

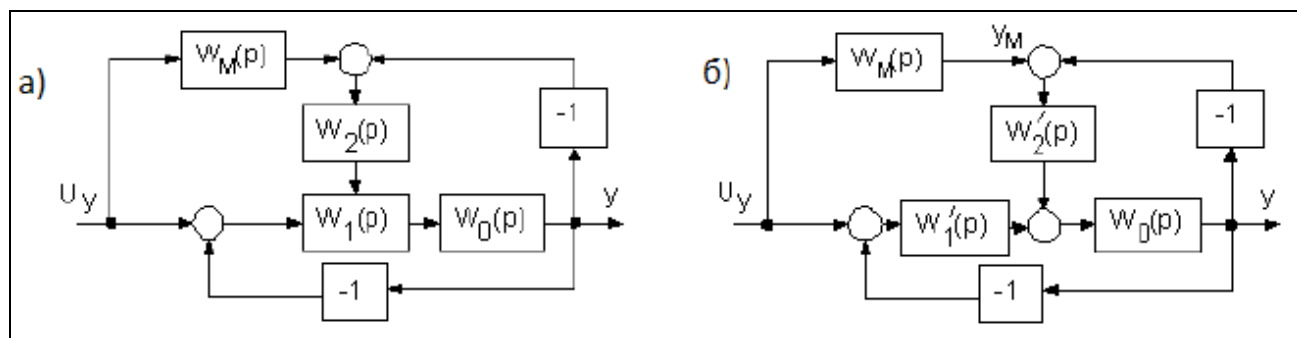


Рисунок 2.2 – Беспоисковая система с эталонными моделями

Простейшие структурные схемы таких систем показаны на рисунке. Сигнал u_m на входе эталонной модели, имеющей передаточную функцию $W_M(p)$, сравнивается с сигналом y на выходе системы. По разности этих сигналов выбирается корректирующее воздействие на систему. В первом случае (рис.а) вслед за измерением параметров объекта $W_0(p)$ изменяются параметры корректирующего звена $W_1(p)$. Во втором случае (рис.б) формируется добавочный сигнал, параметры звена $W_1(p)$ остаются неизменными. Синтез звеньев $W_2(p)$, $W_{12}(p)$ производится в соответствии с требуемым качеством работы самонастраивающейся системы.

В процессе функционирования системы параметры эталонной модели не изменяются и соответствуют значениям, при которых ПП в модели близки к желаемым ПП в системе управления.

В техническом выполнении такая система довольно проста, однако основным условием работы системы является условие малых отклонений параметров объекта от начальных значений. Это условие не является определяющим при выполнении системы по схеме рис. 2.2, а.

Системы с эталонами весьма чувствительны к возмущающим воздействиям и помехам. Это объясняется тем, что модель выполняется ориентированной на определённое воздействие, например на управляющее, и все иные воздействия могут искажать процесс самонастройки. Возникает в таком случае необходимость сигнальной избирательности в работе системы либо необходимость использования весьма сложных эталонных моделей.

2.2.1. Адаптивная система с параметрической самонастройкой

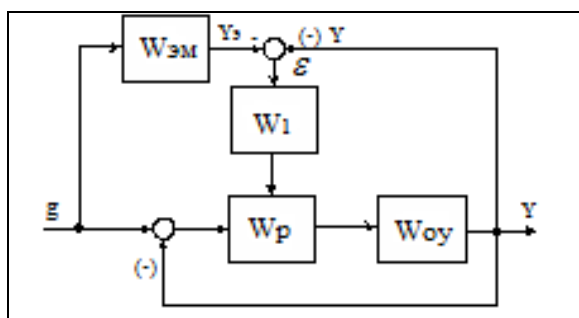


Рисунок 2.3 – Адаптивная система с параметрической самонастройкой

Сигнал с выхода эталонной модели Y_m сравнивается с фактическим сигналом Y . Разница подаётся на вход корректирующего устройства W_k изменяющего параметры регулятора W_p .

2.2.2. Адаптивная система с сигнальной самонастройкой

Если фактический сигнал Y и эталон Y_m совпадают, то сигнал на выходе корректирующего устройства $W_k=0$.

При изменении параметров объекта фактический сигнал отличается от желаемого, что приводит к появлению сигнала на выходе корректирующего звена W_k , который алгебраически суммируется с сигналом регулятора формирует такое воздействие на объект, при котором фактический сигнал будет равен желаемому.

Адаптивные системы с внутренними обратными связями (примеры)

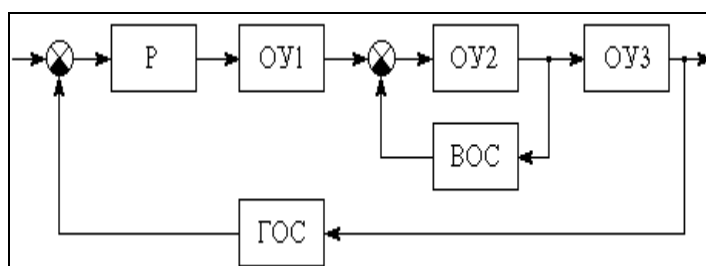


Рисунок 2.4 – Беспорисковые адаптивные системы

Беспорисковые адаптивные системы решают первую задачу сохранения оптимальности настройки системы. Система АЭП с внутренними обратными связями тех элементов, параметры которых меняются (см. рисунок 2.4). На рисунке 2.4 приняты обозначения: Р – регулятор; ГОС – главная обратная связь; ВОС – внутренняя обратная связь.

Обязательным условием работоспособности этой системы является более высокое быстродействие контура внутренней обратной связи по отношению контуру главной обратной связи.

Примером применения внутренних обратных связей в тиристорном приводе постоянного тока является адаптация в режиме прерывистого тока.

Поисковые СУЭП. Поисковые адаптивные системы выполняют автоматическую оптимизацию СУЭП в соответствии с принятыми критериями качества. Это делается путём специально организованного режима поисковых изменений параметров регуляторов системы. Основным отличием от поисковых является наличие пробных движений и оценка на каждом шаге нужных направлений.

Таким образом СУЭП стремятся обеспечить постоянство показателей качества системы в не зависимости от из-ий самой системы или внешних воздействий. Блоки оценки показателей качества включают в себя контрольно измерительную аппаратуру и функциональные блоки, состав которых зависит от принятого показателя качества. Блок организации движений к экстремуму показателей качества включает в себя устройство, выполняющее пробные изменения параметров системы и устройство оценки изменений показателей качества и устройство выработки управляющего сигнала.

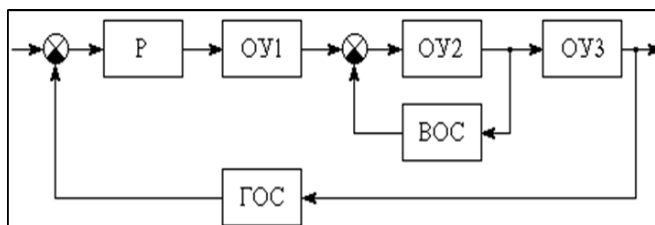


Рисунок 2.5 – Адаптивные системы управления с внутренними обратными связями (Р – регулятор; ГОС – главная обратная связь; ВОС – внутренняя обратная связь).

2.2.3. Адаптивные системы с самонастройкой, принцип действия, структура

Системы с самонастройкой параметров являются в настоящее время основным видом адаптивных систем управления, в которых автоматически, не заданным заранее образом изменяются какие-либо параметры системы управления при изменении параметров объекта регулирования и элементов регулятора, а также характеристик возмущающих воздействий [20].

Схема идентификации представлена на рис. 2.6.

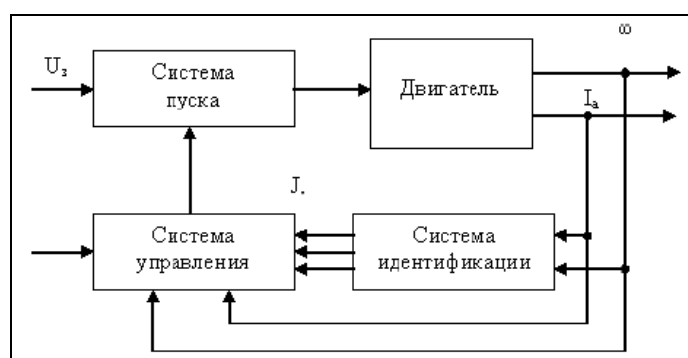


Рисунок 2.6 – Обобщенная схема самонастраивающейся системы

Система управления имеет сложную структуру, которая занимается вычислением коэффициентов регуляторов по данным от системы идентификации, занимающейся определением параметров двигателя.

Система пуска является системой с переменной структурой, которая может работать в нескольких режимах, которые выбираются с помощью системы управления:

- режим первого пуска (первичная настройка);
- режим нормальной работы.

Для реализации инвариантности контура к изменению сопротивления и индуктивности якоря целесообразно использовать адаптивную систему с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой [21]. При применении сигнальной самонастройки применяется блок адаптивного управления (БАУ), который включает в себя эталонную модель W_M , а также корректирующее звено W_K . (рис. 2.7).

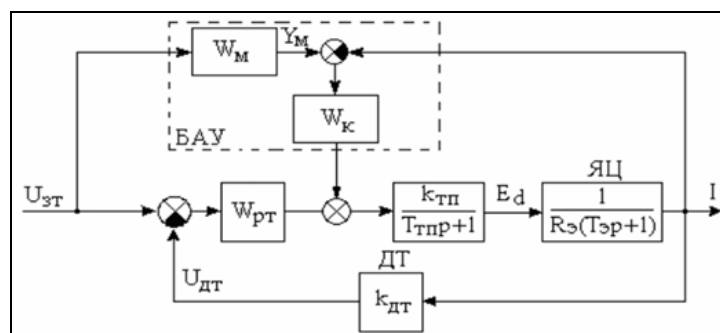


Рисунок 2.7 – Адаптация с сигнальной самонастройкой регулятора тока

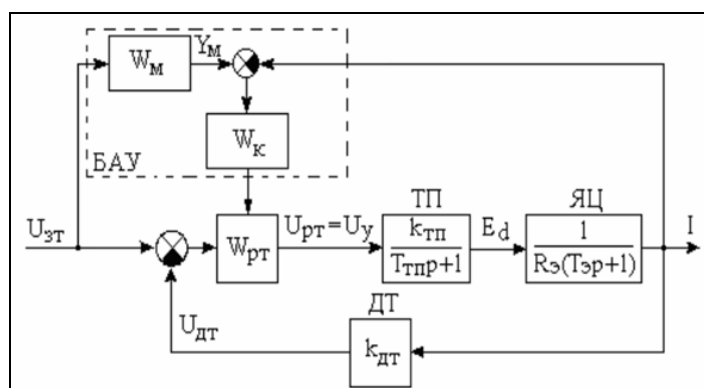


Рисунок 2.8 – Адаптация самонастройки регулятора тока с использованием эталонной модели

В схеме на рис. 2.8. использование блока адаптации аналогично предыдущему за тем исключением, что здесь значения коэффициентов ПИ-регулятора можно не рассчитывать вручную, поскольку БАУ сам подстроит значения регулятора тока и при этом сохранит его. При этом, первый запуск системы будет достаточно продолжительным (пока БАУ выйдет на нужный коэффициент усиления), а затем уже как в обычной системе подчиненного управления. В системе, представленной на рис. 2.8, корректирующее звено имеет.

2.3. Общая характеристика технологии алгоритмического обеспечения [22]

В период классической ТАР синтез алгоритмов или законов управления осуществлялся на стадии проектирования, а доводка, коррекция законов – на стадии испытаний объекта и системы.

Это касалось и задающих воздействий, программных значений параметров, проектирование которых в рамки классической ТАР не входило, но которые обязательно разрабатывались конструкторами объекта. Подобное положение сохраняется в значительной мере и в настоящее время. Ясно, что такая технология алгоритмического обеспечения весьма критична к объему и достоверности априорной информации. Это в свою очередь затягивает сроки проектирования и испытаний. Для создания систем оптимального управления «в большом» многофункциональными объектами подобная технология вообще во многих

случаях оказывается непригодной. Тенденции развития алгоритмического обеспечения систем автоматического управления показаны на рисунке 2.9 [22,27].

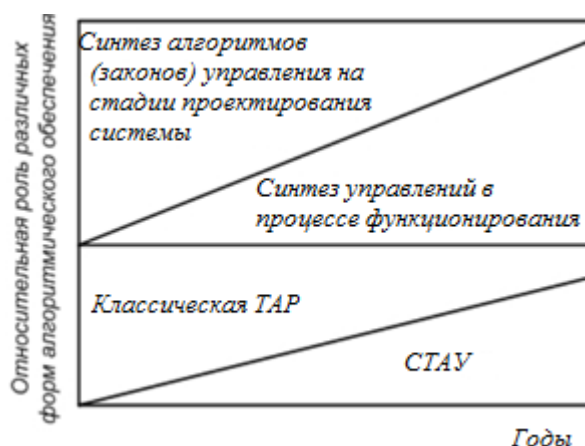


Рисунок 2.9 – Тенденция развития алгоритмического обеспечения систем автоматического управления

Аналитическая теория автоматического управления играет и будет играть возрастающую роль в создании алгоритмического обеспечения. При этом классическая ТАУ все в большей степени будет уступать место СТАУ.

Высокая роль прикладной СТАУ не только в создании методов и структур систем автоматического управления, но непосредственно в алгоритмическом обеспечении, определяется следующим. Главной трудностью решения основной современной проблемы автоматического управления – оптимального управления «в большом» весьма сложными процессами – остается необходимая вычислительная производительность. Преодоление этой трудности возможно только на пути сочетания развитой аналитической прикладной СТАУ как фундамента алгоритмического обеспечения с численными методами как формой реализации алгоритмов.

Существенные различия существуют между двумя фазами алгоритмического обеспечения: синтезом алгоритмов (законов) управления на стадии проектирования и синтезом управлений в процессе функционирования системы (совмещенный синтез).

2.3.1. Синтез алгоритмов (законов) управления на стадии проектирования системы

Эта форма синтеза в классической ТАУ была единственной, причем собственно ТАУ решала задачи отработки задающих воздействий, устойчивости и качества переходных процессов в контурах стабилизации. Технология алгоритмического обеспечения сводилась здесь в общих чертах к следующему.

На основе инженерной ТАУ и располагаемой (как правило, значительной) априорной информации об управляемом объекте, а также номенклатуре измерительных преобразователей (датчиков), производился предварительный синтез контуров. Далее следовало математическое и (во многих случаях) полунатуральное моделирование. На этом этапе выполнялся основной объем анализа и синтеза алгоритмов (законов) управления. Завершающей стадией была отладка при натурных испытаниях [27].

В общих чертах эти фазы технологии алгоритмического обеспечения сохраняются и при СТАУ, однако появляются и принципиальные отличия. Прежде всего резко расширяются задачи оптимизации и в связи с этим коренным образом изменяется математический аппарат. Синтез алгоритмов регулирования на стадии проектирования получил в СТАУ даже новое название – аналитическое конструирование оптимальных регуляторов (АКОР). Роль прикладной СТАУ в алгоритмическом обеспечении современных и перспективных систем автоматического управления непрерывно расширяется (см. рисунок 2.9). За аналитической фазой синтеза следует численная фаза.

Она сопровождается разработкой или использованием программного обеспечения. Далее следует весьма сложная технология редактирования или создания необходимого программного обеспечения для управляющих или специализированных вычислительных средств. Несмотря на все возрастающее оснащение научно-исследовательских организаций вычислительной техникой, трудности алгоритмического обеспечения на базе СТАУ в процессе проектирования еще весьма значительны.

В связи с этим особое место уделяется вопросам оценивания и идентификации, оптимизации при функционалах типа обобщенной работы, адаптивным алгоритмам управления. Эти методы СТАУ позволяют при уже достигнутой вычислительной производительности значительную часть синтеза оптимальных управлений выполнять в реальном времени в процессе функционирования системы.

2.3.2. Синтез управления в реальном времени в процессе функционирования систем

В любой реально функционирующей системе управления формирование управляющих воздействий происходит в реальном времени. Однако в традиционных системах это формирование производится на основе строго детерминированных законов (формул), записанных в памяти систем управления или устройствах аналогового типа. В лучшем случае в «классических» САУ происходит смена фиксированных законов управления при изменении некоторых параметров режима работы объекта.

Под синтезом управлений в реальном времени понимается синтез законов или алгоритмов управления, осуществляемый на основе оптимизации практически одновременно с формированием самих управляющих воздействий. Это понятие не отличается четкостью, и трудно провести границы между обычным формированием управляющих воздействий и «совмещенным синтезом», а также формированием управляющих воздействий в реальном времени на основе «проб и ошибок». Тем не менее именно этот подход является решающим в главной проблеме СТАУ – оптимизации управления «в большом» с достижением наилучшего конечного результата [27].

2.4. Универсальные системы управления [24]

Адаптивные алгоритмы оптимального управления могут воплощать разные принципы адаптации и иметь разную структуру. Адаптивные алгоритмы,

основанные на текущей идентификации, назовем универсальными. Это название в некоторой мере условно, так как любой адаптивный алгоритм управления в той или иной мере универсален в смысле возможности применения к расширенному классу процессов и внешних условий. Однако алгоритмы использующие высокоточную текущую идентификацию, способны обеспечить адаптацию в весьма широких диапазонах изменения свойств управляемых процессов. В этом смысле название «универсальные» алгоритмы вполне оправдано.

Универсальный алгоритм представляет собой комплекс взаимосвязанных алгоритмов оценивания (фильтрации), идентификации и собственно управления (регулирования), рис. 2.10. Все эти алгоритмы могут создаваться на различной основе, включая чисто интуитивную, эвристическую. И действительно, первые алгоритмы идентификации, предложенные еще в пятидесятых годах, имели эвристическое происхождение. В последующем для синтеза алгоритмов идентификации с так называемой настраиваемой моделью стали применяться полуэвристические методы типа метода градиента, функций Ляпунова и др.

Для синтеза алгоритмов оценивания и собственно управления уже давно используются методы оптимизации по строго заданным критериям. В задаче оценивания они приводят к широко известному фильтру Калмана. В задаче собственно оптимального управления традиционные методы оптимизации приводят к нелинейному уравнению в частных производных первого порядка, часто именуемому уравнением Беллмана. Однако во многих практических многомерных задачах эти алгоритмы оказываются трудно реализуемыми. Трудности усугубляются именно для универсальных оптимальных алгоритмов, связанных с текущей идентификацией [22,28,29].

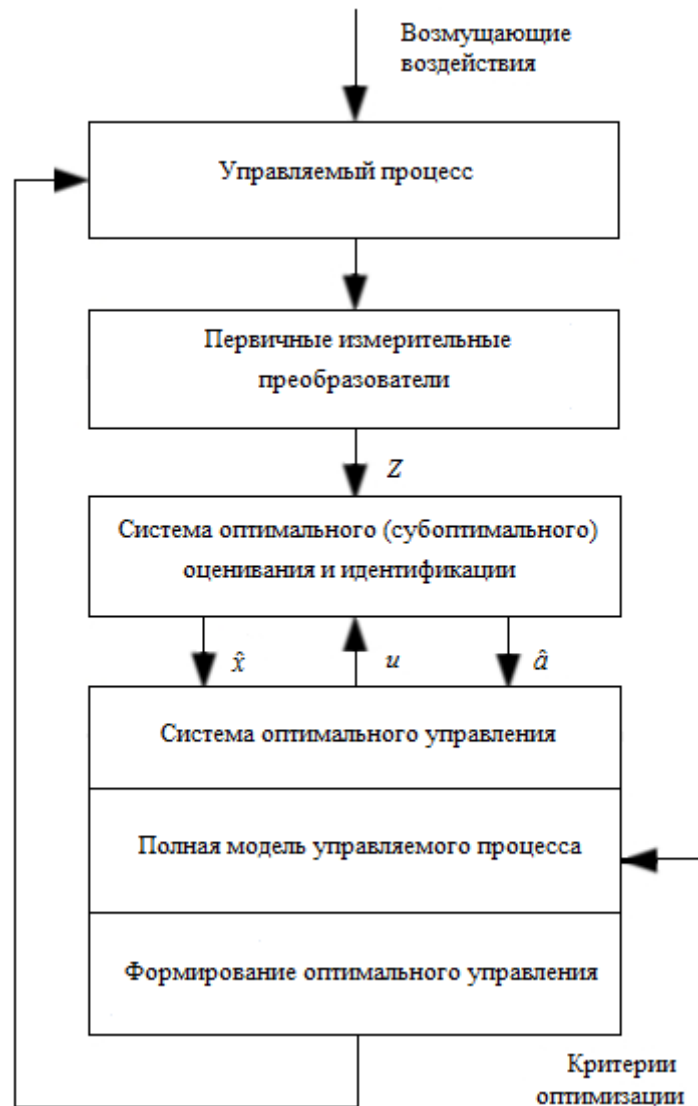


Рисунок 2.10 – Структурная схема универсальной системы автоматического управления

Эта схема отличается от схемы традиционной системы управления, которая, как правило, содержит только измерительные устройства (датчики) и блок с алгоритмами управления, наличием дополнительных блоков с алгоритмами оптимального оценивания и идентификации. Оптимальное управление возможно лишь при оптимальной обработке информации.

Управляемый процесс контролируется (наблюдается) посредством первичных измерительных преобразователей (датчиков). Вектор сигналов наблюдения поступает в систему (модуль) оптимального (субоптимального) оценивания и идентификации. На выходе этой системы формируется оценка \hat{x}

вектора состояния и оценка вектора параметров \hat{a} принятой достаточно полной математической модели управляемого процесса (имеется в виду параметрическая идентификация). Система оценивания и идентификации, помимо формирования оценок \hat{x} , \hat{a} , может выявлять отказавшие датчики и каналы и выдавать сигналы реконфигурации. Функции реконфигурации на схеме не отражены.

Система (модуль) оптимального управления (нижний блок) на основе указанной модели управляемого процесса, текущей оценки вектора состояния и критерия оптимизации (целевой функции), поступающей от системы старшего уровня, формирует оптимальное управление. Это управление воздействует на управляемый процесс и используется в модуле оценивания и идентификации.

В зависимости от алгоритмического обеспечения подсистем возможно выделение значительного числа вариантов АОСАУ данного класса. Рассмотрим основные из них, апробированные в конкретных системах управления [22] – с обобщённым фильтром Калмана-Бьюси (ФКБ) и алгоритмом прогнозирующей модели, с автономной идентификацией и алгоритмом прогнозирующей модели, а также с обобщёнными ФКБ и адаптацией времени прогнозирования. Для последнего варианта будет разработано его программно-алгоритмическое обеспечение, которое может быть типовым, т.е. применимым при некоторых изменениях к другим указанным АОСАУ.

2.5. Алгоритмы адаптивных универсальных систем управления с текущей идентификацией

2.5.1. Система с обобщенным фильтром Калмана-Бьюси (ФКБ) и алгоритмом прогнозирующей модели

Среди беспойсковых алгоритмов идентификации основанных на теории оценивания (АИТО) первого порядка наиболее общим является алгоритм одновременного оценивания и идентификации в виде обобщенного ФКБ [22].

Для управляемого процесса, описываемого в расширенном пространстве состояний

$$\dot{x}_p = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{a} \end{bmatrix} = f_p(x_p, u, t) + \xi_p = \begin{bmatrix} f(x, u, t) \\ u \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi(t) \\ 0 \\ \xi_p(t) \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

этот субоптимальный алгоритм в непрерывной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_p &= f_p(\hat{x}_p, u, t) + P_p h_{x_p}^T(\hat{x}_p, u, t) R^{-1} [z - h(\hat{x}_p, u, t)], \\ \dot{P}_p &= f_{px_p}(\hat{x}_p, u, t) P_p + P_p h_{x_p}^T(\hat{x}_p, u, t) - P_p h_{x_p}^T(\hat{x}_p, u, t) R^{-1} h_{x_p}(\hat{x}_p, u, t) P_p + Q_p. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Модель свободного прогнозируемого движения, соответствующая модели управляемого процесса имеет вид:

$$\dot{x}^M = f(x^M, y^M, a^M, \tau), \dot{a}^M = 0, \dot{y}^M = 0. \quad (2.3)$$

Пусть общее решение уравнений на цикле прогнозирования при начальных условиях:

$$x^M(t) = \hat{x}(t), y^M(t) = \hat{y}(t), a^M(t) = \hat{a}(t). \quad (2.4)$$

обозначено через $X_p[x_p^M(t), t, \theta]$. Тогда в соответствии с принципом разделения оптимальное (субоптимальное) в смысле минимума функционала обобщённой работы (ФОР).

$$J_y = E_y \left\{ V_3[x_p(t_2)] + \int_t^{t_2} Q_3[x_p(\theta), \theta] d\theta + \int_t^{t_2} U_3[u(\theta), \theta] + U_3^*[u_{оп}(\theta), \theta] d\theta \right\}. \quad (2.5)$$

управление на очередном цикле в непрерывной форме выражается формулой:

$$\frac{\partial}{\partial u_{оп}} U_3(u_{оп}, t) = - \frac{\partial}{\partial \hat{y}} \left\{ V_3[X_p(\hat{x}_p(t), t, t_2)] + \int_t^{t_2} Q_3[X_p(\hat{x}_p(t), t, \theta)] d\theta \right\}. \quad (2.6)$$

Структуру соответствующего алгоритмического обеспечения (в непрерывной форме) поясняет рисунок 2.11.

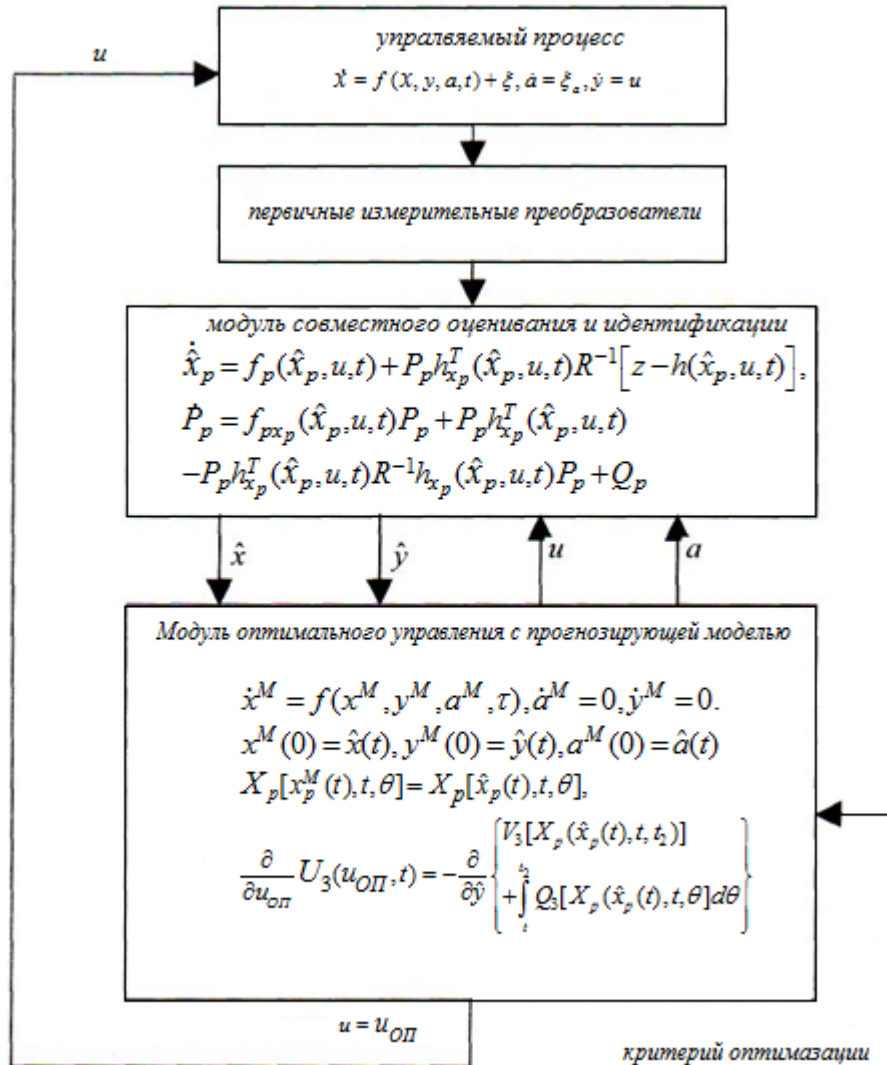


Рисунок 2.11 – Алгоритм (непрерывная форма) АОСАУ с обобщенным ФКБ и прогнозирующей моделью

Построение дискретных аналогов алгоритмов может осуществляться посредством методов численного интегрирования дифференциальных уравнений или использования алгоритмов с дискретным временем для исходных разностных схем модели управляемого процесса.

Этот алгоритм обеспечивает управление объектами с априорно неизвестными параметрами, причем управление «в большом» с оптимальным (субоптимальным) достижением конечной цели. Однако для сложных нелинейных объектов с моделями высокой размерности, содержащими большое число идентифицируемых параметров, требования к вычислительной

производительности вычислительных средств получаются высокими. Наиболее жесткие требования к быстродействию предъявляет решение в реальном времени ковариационного уравнения совместного оценивания и идентификации, а также многократное прогнозирование в ускоренном времени свободного движения объекта. Для сокращения требуемой вычислительной производительности при сохранении в основном полной адаптивной модели управляемого процесса можно применять разделение задач оценивания и идентификации, приближенное прогнозирование свободного движения.

2.5.2. Система с автономной идентификацией и алгоритмом прогнозирующей модели

При реализации алгоритма совместного оценивания и идентификации для многомерных процессов с большим числом идентифицируемых параметров наибольшие вычислительные затраты приходится на ковариационное, матричное уравнение. Если размерность обобщенного вектора состояния равна $n+N$ (n – размерность вектора (x,y) , N – общее число идентифицируемых параметров), то размер матрицы P_p равен $(n+N) \times (n+N)$. Вычислительные затраты растут по крайней мере как $(n+N)^3$. Одним из путей сокращения необходимой вычислительной производительности является применение алгоритмов раздельного (автономного) контроля вектора состояния и вектора параметров. Эти алгоритмы предполагают непосредственное наблюдение вектора состояния x и непосредственное наблюдение (или вычисление) его производной \dot{x} . Последнее означает измерение (или вычисление) величины $z=f(x,y,a,t)+\eta$.

Алгоритм идентификации (при точном измерении x, y) в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{\hat{a}} &= Pf_a^T(x, y, \hat{a}, t)R^{-1}[z - f(x, y, \hat{a}, t)], \\ \dot{P} &= Pf_a^T(x, y, \hat{a}, t)R^{-1}f_a(x, y, \hat{a}, t)P + Q.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Основное сокращенно вычислительных затрат получается за счет декомпозиции ковариационного уравнения. Эта декомпозиция получается вследствие того, что каждая компонента вектора z обычно зависит от автономной группы параметров. Структура АОСАУ с автономной идентификацией параметров (типа АИТО) и алгоритмом прогнозирующей модели представлена на рис. 2.12 [22].

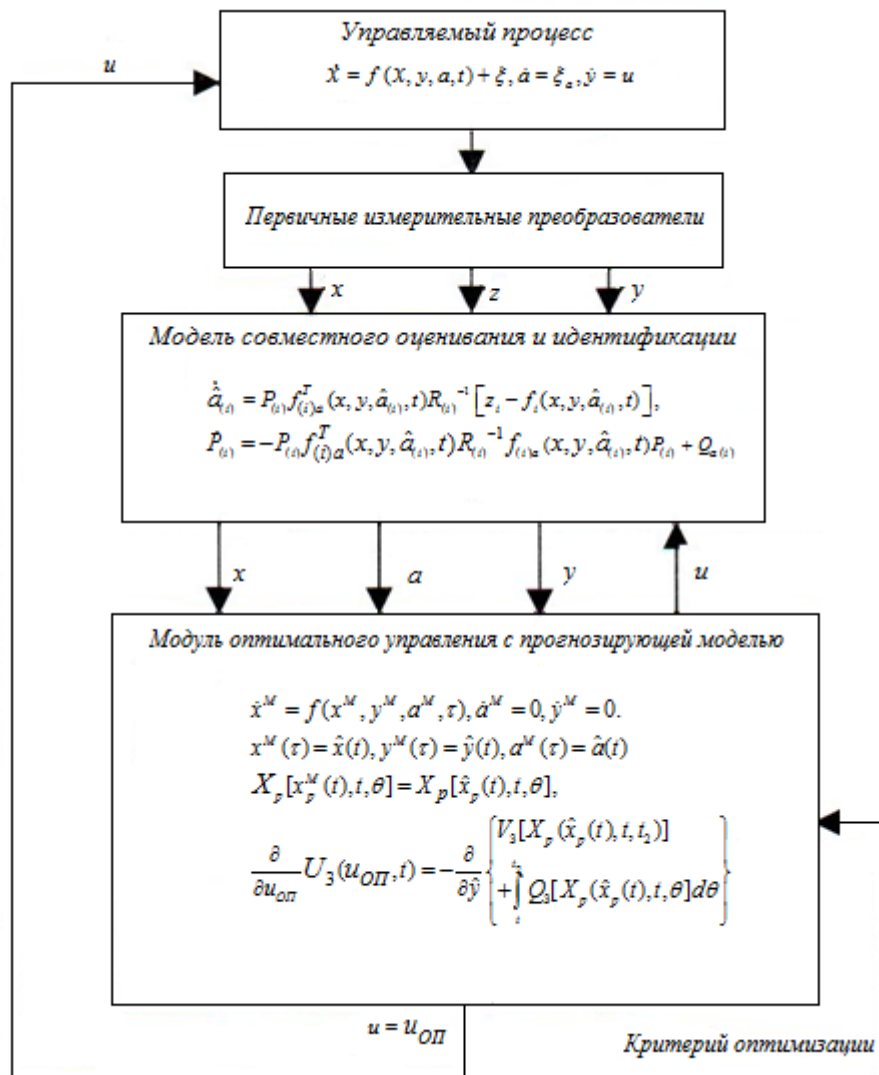


Рисунок 2.12 – Алгоритм (непрерывная форма) АОСАУ с автономной идентификацией и прогнозирующей моделью.

2.6. Выводы по главе 2

Таким образом, среди современных подходов к построению адаптивных систем управления ЭП встречаются самые разнообразные теоретические посылки и технические приемы. Анализ приведённых публикаций позволяет сделать некоторые выводы о современном состоянии и исследуемых путях построения адаптивных систем управления ЭП:

1. В большинстве выполненных исследований в качестве моделей управляемого процесса принимаются линеаризованные математические модели ЭП;

2. Существующие подходы к построению адаптивных систем управления ЭП обеспечивают только параметрическую адаптацию;

3. Перспективными адаптивными системами управления являются системы с текущей идентификации, основанной на соединении процессов идентификации и собственно управления. Однако, системы с обобщенным фильтром Калмана-Бьюси (ФКБ) и алгоритмом прогнозирующей модели, а также с автономной идентификацией и прогнозирующей моделью не обладают самоорганизующимися функциями. Наиболее перспективной и эффективной является система с обобщенными ФКБ и адаптацией времени экстраполяции – самоорганизующаяся система.

ГЛАВА 3

ПРИНЦИПЫ САМООРГАНИЗАЦИИ, ПОДЧИНЁННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

3.1. Принцип самоорганизации и его применение

3.1.1. История разработки самоорганизующегося регулятора с экстраполяцией

Электроэнергетика и аэрокосмическая техника явились первыми областями, затребовавшими создания самонастраивающихся, адаптивных, самоорганизующихся систем управления. Поисковые и беспоисковые самонастраивающиеся системы эвристического происхождения появились более полувека назад, почти сразу после Второй мировой войны, но проблема адаптивного управления по мнению инженеров и ученых, имеющих отношение к практике, до последнего времени не была решена на уровне современных требований к системам управления [31].

Эти требования в сжатом виде включают [32, 33]:

- удовлетворительное функционирование системы управления при минимуме необходимой априорной информации не только о параметрах, но и о структуре модели управляемого объекта, процесса, среды, ситуации;
- минимальное вмешательство в естественное течение процесса, энергосберегающее управление, минимальные негативные экологические последствия;
- экстраполяцию, прогнозирование, органическую общность с психофизиологическими механизмами профессиональной деятельности лица принимающего оперативное решение (высококвалифицированного оператора, дежурного диспетчера);

- оптимальность по изменяемому комплексному критерию и ограничениям, обеспечивающую на всех этапах и режимах работы объекта управления, мобилизацию ресурсов на достижение ближайшей намеченной цели управления при соблюдении переменного множества многомерных ограничений;
- высокую робастную устойчивость даже при управлении многосвязными нелинейными объектами в штатных и ряде нештатных экстремальных ситуациях;
- вычислительную экономичность, допускающую распределенную встроенную микропроцессорную реализацию на дешевых цифровых или даже гибридных микросхемах.

Выполнение этих требований оказалось трудной проблемой. Такие, казавшиеся в прошлом столбовыми направления адаптивных систем, как контроль параметров окружающей среды, контроль частотных, временных и спектральных характеристик, беспойсковые системы с заданной или настраиваемой эталонной моделью, идентификацией в реальном времени, градиентные системы с априори назначаемым функционалом и др. взятые раздельно и даже в комплексе, не смогли решить этой проблемы.

Не дают решения и робастные системы, поскольку они сохраняют работоспособность только при достаточно малых неопределенностях. На практике неопределенности, особенно в аварийных режимах объектов управления, как правило, большие. При этом одним из основных недостатков указанных традиционных подходов является предположение об известном априори и неизменном в процессе функционирования системы порядке модели. Это предположение вызывалось, несомненно, недостаточной «интеллектуальностью» традиционных адаптивных регуляторов. Однако современное состояние вычислительной техники позволяет успешно реализовать сложные интеллектуальные алгоритмы обработки информации и формирования управлений.

Проблема адаптивного автоматического регулятора относится к числу фундаментальных проблем, не получивших пока исчерпывающего решения,

несмотря на огромное число публикаций в этой области. Некоторое расширение практического применения адаптивного управления в последний период связано не столько с разработкой высокосоввершенных принципов и алгоритмов, сколько с всеобщей компьютеризацией управления, внедрением микропроцессоров. В современных условиях актуальность создания высокосоввершенных адаптивных регуляторов не только не уменьшается, но возрастает. Это связано с тем, что при быстрых изменениях технологических процессов и объектов окружающей среды, росте требований к комплексности автоматизации разработка адекватных математических моделей, идентификация на стадии проектирования и при эксплуатации становятся во многих случаях реальными из-за чрезмерной наукоемкости. С другой стороны, модульная архитектура средств автоматизации требует унификации регуляторов. Все это указывает на необходимость новых подходов к принципам построения оптимальных адаптивных регуляторов, расширения арсенала этих принципов в направлении сочетания адаптации с оптимальностью и минимальным априорным информационным обеспечением. Такие системы управления СТС, созданные с использованием алгоритмов оптимального оценивания, идентификации и управления объектом в штатных и аварийных режимах, являются более высококачественными по сравнению с традиционными, позволяют более обоснованно использовать контроллеры для реализации достаточно сложных алгоритмов, но не расширяют круг решаемых задач.

Решение, насколько можно судить по начальному этапу развития теории, алгоритмического обеспечения и внедрения, может быть достигнуто на основе самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией (СОРЕ) [34,35]. Термин «самоорганизующаяся система управления с функциональной (структурной) и параметрической адаптацией» был введен профессором университета Падью (США) Дж. Саридисом в монографии [36] вместо «адаптивной системы управления» применявшейся в США, как и у нас до 1978 г. (время выхода монографии в США).

В связи с этим весьма перспективным представляется подход к построению адаптивных самоорганизующихся систем управления, предложенный академиком РАН А.А. Красовским в 1994г. на основе самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЕ) [37, 38].

Идея СОРЕ (точнее одноконтурного СОРЕ) возникла в 1981г. при разработке алгоритмов оперативного управления каскада Сулакских ГЭС (Дагестан) в составе АСУ ТП каскада. В составе этого каскада работают четыре ГЭС: Чиркейская ГЭС (ЧГЭС) мощностью 1100 МВт. Миатлинская ГЭС (МГЭС) мощностью 220 МВт. Чирюртская ГЭС-1 (ЧюГЭС-1) мощностью 72 МВт и Чирюртская ГЭС-2 (ЧюГЭС-2) мощностью 9 МВт. Если для ЧГЭС и МГЭС математические модели были известны с “высокой точностью”, то для двух остальных ГЭС подбор математической модели оказался сложной проблемой.

Более приемлемые решения можно было получить для ЧюГЭС-1, если подстраивать структуру модели (структурная адаптация). В темпе процесса, в зависимости от состояния бьефов и мощности ГЭС в предшествующих режимах, необходимо было определять количество ОДУ в системе уравнений. Было принято решение подстраивать структуру модели ЧюГЭС-1 на основе информации о состоянии канала ГЭС.

С учетом взаимосвязанных алгоритмов оценки состояния системы, фильтрации входной информации, структурной и параметрической адаптации прогнозирующей модели, экстраполяции внешних возмущений и, наконец, определением управляющих воздействий по принципу ФОР тогда была реализована первая версия одноконтурного СОРЕ (первоначально такой регулятор назывался кратко “СОРП” - самонастраивающийся оптимальный регулятор с прогнозированием) Эта версия впервые была доложена на “Школе-семинаре по адаптивным системам” в апреле 1982г. При обсуждении доклада по предложению академика Я.З. Цыпкина, слово “самонастраивающийся” было заменено на слово “самоорганизующийся”. Параллельно с работами по созданию АСУ ТП каскада ГЭС велись работы по созданию АСУ ТП ГЭС и регуляторов

скорости гидротурбин (АРСГТ) и регуляторов возбуждения гидрогенераторов (АРВГГ). Было решено использовать при синтезе АРСГТ и АРВГГ принцип СОРП. При синтезе этих регуляторов разработчики также столкнулись со сложностью и размерностью модели. Для гидрогенератора линейная модель на основе уравнений Парка-Горева состояла из семи ОДУ, а для гидротурбины из двенадцати ОДУ [39,40]. Кроме того, в этих работах появилась проблема быстроедействия всех алгоритмов. В [41] был изложен подход к синтезу систем управления с использованием двух временных шкал и прогнозирования (ДШС). Там была высказана идея упрощения решения задачи синтеза управления с помощью ДШС реализующих метод упреждающей периодической коррекции за счет упрощений модели объекта и критерия оптимальности. Эта идея легла в основу дальнейших работ по созданию АРСГТ и АРВГГ [42,43].

В 1988г. был разработан универсальный двухшкальный СОРП для управления оперативными режимами соответственно ЧюГЭС-1 и ЧюГЭС-2 в составе АСУ ТП каскада Сулакских ГЭС [33]. Технически же реализовать эту идею “в металле” для АРСГТ и АРВГГ удалось только в 1990 г., когда по программе ветроэнергетики Минэнерго СССР удалось приобрести промышленные микропроцессоры.

В 1992г. были получены в завершенном виде все алгоритмы двухшкального СОРП и такой регулятор был назван “локальным регулятором СОРП с глубокой интеграцией”. Этот регулятор был в принципе первым вариантом двухконтурного СОРЭ. В том же году при исследовании прогнозирующей модели для моделирования в ускоренном времени свободного движения и определения приемлемого времени прогнозирования пришли к выводу, что время прогнозирования можно сокращать и такое сокращение открывает возможность применения алгоритмов, в которых прогнозирование на основе неформальных моделей (с относительно высокой степенью адекватности) заменяется экстраполяцией. После замены алгоритма прогнозирования на алгоритм экстраполяции было решено поменять название СОРП на СОРЭ.

Период времени с 1992 по 1997гг. был периодом активного внедрения СОРЕ в системы управления различными объектами. В 1992г. идеи и алгоритмы СОРЕ были использованы при создании “Концепции оптимального инструктора и автоматизации обучения на тренажерах летного состава” и получили хорошие отзывы от заказчиков [31]. В том же году были выполнены исследования по созданию, на базе СОРЕ, системы сверхточного инерциально-дальномерного управления сложными механическими системами (робототехнические системы, станки с ЧПУ, роботов минеров (саперов) для антитеррористических целей и т.д.) [34,35].

В 1994г. на базе идеологии двухконтурного СОРЕ был создан первый вариант аварийного регулятора мощности гидротурбины для повышения устойчивости электроэнергетических систем при больших возмущениях и в аварийных режимах в энергосистеме [33,39,40,44]. В том же году начались работы по реализации на промышленных микропроцессорах автоматических регуляторов возбуждения гидро- и турбогенераторов на основе теории СОРЕ. Вся идеология СОРЕ и все его версии наиболее подробно и системно были опубликованы в книгах [31,34,35,40].

3.1.2. Принцип действия самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией

СОРЕ является периодическим динамическим блоком, основу которого составляет набор N параллельно работающих полиномиальных фильтров Калмана-Бьюси (ФКБ) различных порядков $\nu = 1, 2, \dots, N$. Структурная схема одноконтурного СОРЕ, предложенного А. А. Красовским, приведена на рис. 3.1. В дальнейшем эта схема была развита за счет введения второго контура [37, 45], однако мы ограничимся рассмотрением одноконтурной версии СОРЕ.

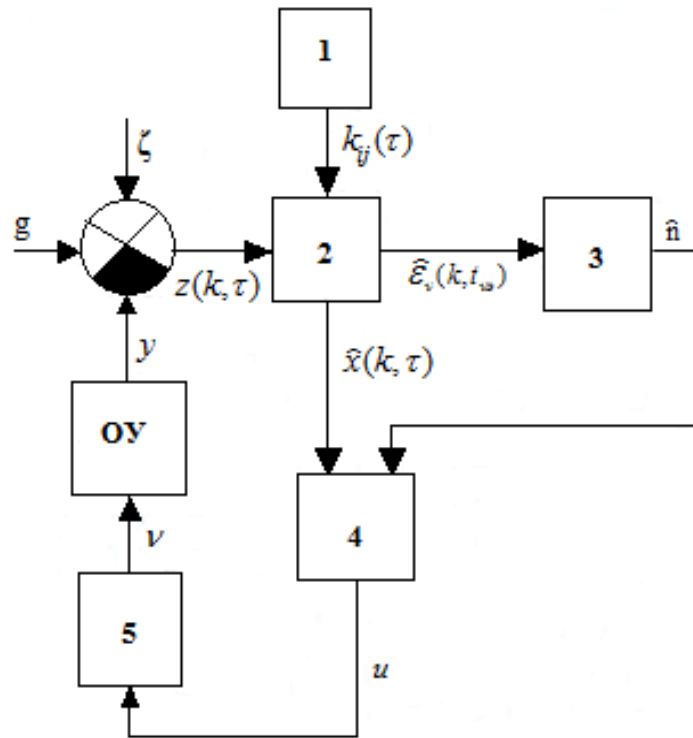


Рисунок 3.1 – Схема одноконтурного СОРАЗ

где, 1 – блок памяти, где хранятся различные параметры СОРАЗ, в частности функции $k_{ij}(\tau)$ полиномиальных фильтров Калмана-Бьюси (ФКБ); 2 – блок циклических ФКБ различных порядков ν ; 3 – блок, в котором выполняются логические, «интеллектуальные» операции по обработке информации и принятию решений; 4 – устройство управления, предназначенное для формирования управление u ; 5 – исполнительный механизм интегрирующего типа; ОУ – непрерывный объект управления.

На рис. 3.1. показаны: g – задающее воздействие системы (схемы) управления; $z(k, \tau)$ – результат измерения на k -м периоде рассогласования $\varepsilon = g - y$ системы, т.е. $z(k, \tau) = \varepsilon(k, \tau) + \zeta$; ζ – случайная ошибка измерения рассогласования – практически белый шум. Фактически это, конечно, «цветной» шум, но с очень малым временем корреляции, так что в полосе частот системы управления его можно считать белым.

В процессе работы СОРАЗ в блоке 2 на каждом интервале управления (периоде, такте) осуществляется оценка рассогласования e и его производных по

времени. Формирование этих оценок осуществляется каждым ФКБ порядка ν , $\nu=1,2,\dots,N$ в отдельности. Кроме того, на основе полученных оценок производных каждый ФКБ осуществляет экстраполяцию изменения рассогласования s на некоторый интервал времени в будущем и вычисляет оценку $\hat{\varepsilon}_\nu(k, t_{\nu\dot{y}})$, где $t_{\nu\dot{y}}$ – время, на которое экстраполируется рассогласование ФКБ ν -го порядка.

Эти оценки, а также измеренные значения рассогласования $\varepsilon(k, t_{\nu\dot{y}}) + \zeta$ в следующем такте поступают в блок 3, где сравниваются. Сравнение может осуществляться в одном периоде или в течение нескольких последующих периодов в целях накопления и усреднения информации. По результатам сравнения в блоке 3 определяется тот ФКБ, который дает минимальное значение СКО разности $\varepsilon_\nu - \hat{\varepsilon}_\nu$. Порядок ν^* этого фильтра принимается в качестве оценки \hat{n} порядка объекта управления ОУ, т.е. $\hat{n} = \nu^*$, а формируемые им оценки переменных состояния $\hat{x}_{\hat{n}i}(k+1, \tau)$, $i = \overline{1, \hat{n}}$, принимаются в качестве текущих оценок переменных состояния ОУ.

Эти значения передаются в блок 4, где по ним формируется оптимальное управление на следующем $k+1$ периоде или ряде последующих периодов. Формально управление и может формироваться на основе любого известного подхода, например, как модальное или как оптимальное в смысле минимума квадратичного функционала. Однако А.А. Красовский считал наиболее целесообразным применение в СОРЭ оптимального по функционалу обобщенной работы управления.

Регулятор, схема которого приведена на рис. 3.1., назван А.А. Красовским самоорганизующимся, так как организация его структуры и определение оптимальных параметров, необходимых для достижения цели управления, происходит самостоятельно (автоматически) в соответствии со структурой, порядком и параметрами неопределенного объекта. Фактически СОРЭ представляет собой самоорганизующийся адаптивный алгоритм (СОА) и

позволяет реализовать адаптивные системы управления с оперативной идентификацией объекта управления на коротких интервалах времени.

СОРЕ промышленностью пока не выпускается. Его алгоритм функционирования (в плане формирования управления) может создаваться для каждого конкретного случая разработчиком. Основной отличительной особенностью СОРЕ является необходимость обработки большого объема информации за короткое время, меньшее времени переходного процесса системы управления. Поэтому для его реализации требуется достаточно мощный вычислитель. Наличие такого вычислителя обуславливает интеллектуальные возможности СОРЕ и придает ему свойства самоорганизующихся систем [46,47,48,49,50].

3.1.3. Алгоритмическое обеспечение самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией

В алгоритме рассматривается задача управления скалярным объектом (один вход – один выход), свойства которого неизвестны. Наблюдается разность x_1 между текущим значением x тек и заданным значением x зад выходного сигнала объекта [51,52,53,54,55,56]. Основной контур управления состоит из объекта управления, наблюдателя в виде ФКБ разных порядков с порядком $n = \overline{2, n_m}$, модуля управления, оптимального по критерию обобщенной работы, и органа управления. Под управлением u понимается скорость перемещения управляющего органа ($u = \dot{y}$). Непрерывное время разбивается на циклы длительностью t_u . На малом интервале времени выходной сигнал практически любого объекта может быть представлен в виде выходной величина последовательного соединения интегрирующих звеньев

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \dots, \dot{x}_{n-1} = x_n, \dot{x}_n = 0 \quad (3.1)$$

точками обозначены производные по времени. При таком представлении свободного изменения x_1 в течение цикла подразумевается, что $x_n = y, \dot{x}_n = u$.

Таким образом, x_1 приближенно описывается полиномом $(n-1)$ -й степени:

$$x_1(\theta) = x_1(0) + x_2(0)\theta + x_n(0) \frac{1}{(n-1)!} \theta^{n-1} \quad (3.2)$$

где θ – внутреннее время цикла, $\theta \in [0, t_u]$. Погрешности такого представления описываются белым шумом $\eta(\theta)$ с дисперсией σ , а измеряемый сигнал считается состоящим из шума $\eta(\theta)$ и выходного сигнала цепочек σ_s^2 интеграторов

$$z_1 = x_1 + \eta(\theta) \quad (3.3)$$

Переход к дискретному времени выражается в разбиении цикла на целое число шагов с шагом Δt_u , изменяемых по длительности вместе с изменением t_u ;

$$t = vt_u + \mu \Delta t_u$$

где $v = 1, 2, \dots$ – номер цикла, $\mu = 0, \dots, q-1$ – номер шага в цикле.

Отличительной особенностью рассматриваемого алгоритма служит автоматический выбор порядка модели оцениваемого процесса на каждом цикле. Степень адекватности принятой модели по отношению к фактическому процессу обычно определяет качество, точность оптимального управления. Поэтому выбор порядка модели в процессе функционирования контура регулирования можно рассматривать как процедуру распознавания. Для распознавания порядка полиномиальной модели используется невязка между экстраполированным (предсказанным) значением сигнала рассогласования в конце следующего цикла и фактически измеренным значением этого сигнала в тот же момент времени.

Сигнал z_1 на каждом шаге обрабатывается набором ФКБ порядка $n = \overline{2, n_m}$.

Каждый фильтр проводит идентификацию процесса x_1 в классе полиномиальных моделей $(n-1)$ -го порядка вида (3.1), т.е. выдает оценки производных процесса x_1 до $(n-1)$ -го порядка включительно.

В векторной форме (3.1) выглядит следующим образом:

$$\dot{x} = Ax \quad (3.4)$$

$$\text{Где } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Выражение (3.3) в векторной форме:

$$z_1 = Hx_1 + \eta(\theta) \quad (3.6)$$

где $H = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$.

Модель (3.4) – (3.6) не содержит неизвестных или приближенно известных параметров и является в этом отношении универсальной. Однако по отношению к реальным процессам такие модели сохраняют достаточную степень адекватности лишь в течение короткого времени. Отсюда потребность в автоматической смене порядка модели в ходе процесса управления реальном времени и соответствующей адаптации структуры наблюдателя.

Для модели (3.4) – (3.6) в предположении, что $\eta(\theta)$ можно считать практически белым шумом со спектральной плотностью мощности $R_\theta = 2\sigma_\theta^2\tau_\theta\sigma_\theta^2$ – дисперсия шума, τ_θ – малое время корреляции), непрерывный ФКБ имеет вид:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + PH^T R_\theta^{-1} (z - H\hat{x}) \quad (3.7)$$

$$\dot{P} = AP + PA^T - PH^T R_\theta^{-1} HP \quad (3.8)$$

здесь $\hat{x} = x(\theta)$ - оценка вектора состояния $x(\theta)$, $P = P(\theta)$ - ковариационная матрица.

После выбора порядка ФКБ производится экстраполяция или прогнозирование изменения x_1 на интервал $\theta_{\text{эк}}$ по формуле:

$$\dot{\hat{x}}(\theta_{\text{эк}}) = \hat{x}_1[v, 0] + \hat{x}_2[v, 0]\theta_{\text{эк}} + \dots + \frac{\hat{x}_{n_0}[v, 0]}{(n_0 - 1)!} \theta_{\text{эк}}^{n_0-1} \quad (3.9)$$

где $\hat{x}[\nu, 0]$ - оценки, к началу ν -го цикла полученные от ФКБ порядка $n_0, i = \overline{1, n_0}$.

Исполнительная часть адаптивного регулятора имеет алгоритм, синтезированный на основе функционала обобщенной работы (ФОР). Это предполагает постоянство управления в течение цикла. Поэтому на выходе адаптивного регулятора устанавливается экстраполятор нулевого порядка, обеспечивающий кусочно-постоянную экстраполяцию.

Для непрерывного на каждом цикле варианта главная часть квадратичного ФОР имеет вид

$$I_r = \hat{x}_1^2(\theta_s) + \beta_1 \int_0^{\theta_s} \hat{x}_1^2(\theta) d\theta \quad (3.10)$$

Здесь I_r – главная часть ФОР, вычисленная на экстраполированной по результатам измерений на предыдущем цикле оценке процесса:

$$x_1(\theta) = x_1(0) + x_2(0)\theta + x_n(0) \frac{1}{(n-1)!} \theta^{n-1} \quad (3.11)$$

β_1 – заданный весовой коэффициент.

В аналитическом виде оптимальное управление на очередной цикл имеет вид:

$$u = -k_1 \frac{\partial I_r}{\partial \hat{x}_{n-1}(0)} = -\frac{2k_1 \theta_{\text{эк}}^{n-1}}{(n-1)!} \cdot \left[\left(1 + \frac{\beta_1 \theta_{\text{эк}}}{n}\right) \hat{x}_1(-0) + \left(1 + \frac{\beta_1 \theta_{\text{эк}}}{n+1}\right) \hat{x}_2(-0) \theta_{\text{эк}} \right. \\ \left. + \dots + \left(1 + \frac{\beta_1 \theta_{\text{эк}}}{2n-1}\right) \frac{\hat{x}_n(-0)}{(n-1)!} \theta_{\text{эк}}^{n-1} \right] \quad (3.12)$$

где k_1 – коэффициент, обратный по отношению в квадратичных «затратах на управление» полного ФОР.

Для цели автоматического определения длительности цикла обратимся к формуле (3.1), записанной в виде

$$t_{\text{ц}}^n = \frac{n! \sigma_{n\text{э}}}{\sqrt{M[x_1^{(n)}(\xi)]^2}},$$

где $\sigma_{nэ}$ – допустимая ошибка экстраполяции стационарного процесса посредством полинома n -й степени. На выходах набора ФКБ формируются оценки производных разных порядков. Поэтому дисперсии этих производных $M[x_1^{(n)}]^2$ могут быть приближенно определены в ходе функционирования контура. Для этого вычисляются средние значения квадратов оценок для цикла или ряда циклов.

Во втором случае принимается, что смена порядка наблюдателя происходит одновременно с изменением длительности цикла. Эта длительность в обоих случаях определяется по формуле

$$t_{ц}^n = \frac{n! \sigma_{nэ}}{\sqrt{[x_1^{(n)}]^2}}. \quad (3.13)$$

Начальное значение $t_{ц}$ задается по априорным данным.

Самоорганизующаяся оптимальная система удовлетворяет требованию минимальной необходимой априорной информации о структуре, параметрах регулируемого объекта, возмущениях и окружающей среде, так как не требуется их математического описания. Сам принцип действия системы способствует быстрой адаптации к изменению режима и структуры регулируемого объекта. Другое из основных современных требований, предъявляемых к большинству систем автоматического и автоматизированного управления технологическими процессами и подвижными объектами, заключается в минимальном вмешательстве в естественное протекание процессов в объекте, по крайней мере, в штатных режимах последнего. Это обеспечивается использованием алгоритма формирования оптимального управления в соответствии с интегральным квадратичным критерием. Минимизация интегрального квадратичного критерия неразрывно связана с прогнозированием, экстраполяцией. Система имеет возможность быстрой самоорганизации контуров управления в условиях аварийных нештатных ситуаций. Эта возможность и поддержка операторов при принятии решения и их временная замена контуром автоматического управления

системы может играть очень важную роль в предотвращении аварий и катастроф. Используемые алгоритмы способствуют относительной простоте программного обеспечения системы и возможности его микропроцессорной реализации на промышленных контроллерах [38,54]. Однако каждая версия фактически является отдельным вариантом СОРЭ. Поэтому для конкретных объектов требуется разработка специального алгоритмического обеспечения с учётом особенностей определённых версий. В диссертации рассмотрен вариант одноконтурного СОРЭ и разработано его алгоритмическое обеспечение. Разрабатываемый вариант самоорганизующейся системы управления по принципу действия относится к системам с дискретным временем (цифровым или импульсным).

Таким образом, подход с использованием СОРЭ выгодно отличается от многих других подходов к построению интеллектуальных автоматических регуляторов. В этом классе регуляторов не нужно знать математическую модель объекта управления ни на стадии проектирования СУ, ни после при её эксплуатации. Происходит так называемое «безмодельное управление». Известно, например, что в робототехнических комплексах (подводных и надводных аппаратах различного применения), особенно автономных, работающих в недетерминированном пространстве координат и состояний, часто возникают ситуации, когда робот должен самостоятельно приспособиться к сложившейся ситуации. Здесь как нельзя лучше применить высокоэффективное самоорганизующееся адаптивное управление, с оптимизацией по функционалу обобщенной работы (ФОР). Именно по такому функционалу происходит вычисление управляющего воздействия в СОРЭ. Регулятор назван самоорганизующимся, так как организация его структуры и определение оптимальных параметров, необходимых для достижения цели управления, происходят самостоятельно (автоматически) в соответствии со структурой, порядком и параметрами неопределённого объекта [44,45,54].

3.2. Принцип подчинённого регулирования и его применение

3.2.1. История развития принципа подчинённого регулирования

Применение принципа ПР в системах управления ЭП различного типа.

Системы управления на основе принципа подчинённого регулирования применяются практически на электроприводах различного типа постоянного и переменного тока [4,26,58-59,61-70,74,76].

В частности, применение этого принципа для синтеза систем управления электроприводами постоянного тока приведено в работах [57,4].

В работах[26], [58] рассматривается система управления с подчинённым регулированием координат асинхронным электроприводом ТПН-АД. В работе [59] исследуется также система управления асинхронным электроприводом. В работе [60] показано, что асинхронные и синхронные двигатели в выбранных системах отсчета являются соответственно двух- и трехмерными объектами, которые характеризуются нелинейными связями между каналами управления и нелинейными зависимостями между регулируемыми переменными. Предлагаются подходы к синтезу систем управления на основе метода подчинённого регулирования.

В этих работах и других представлены реализации и варианты применения принципа.

Последовательно - подчиненное регулирование координат – это блестящий методологический принцип, давший мощный толчок развитию и усовершенствованию систем управления электроприводами постоянного и переменного тока в самых различных сферах применения.

Метод подчинённого регулирования имеет определённые ограничения, связанные, прежде всего, с использованием линеаризованных моделей объектов, видом структурных схем и применяемой их декомпозицией, используемыми стандартными настройками. Вследствие этого современная практика нуждается не только в алгоритмах систем управления электроприводами с настройками на

модульный (технический) и симметричный оптимумы, но и в адаптивных оптимальных алгоритмах автоматического управления и обработки информации.

3.2.2. Принцип подчинённого регулирования, структура и содержание

Методы разработки систем управления объектами морской энергетики и электроэнергетики в значительной степени определяются особенностями протекающих в них физических процессов. Ярким примером такого положения являются метод подчиненного регулирования синтеза многоконтурных систем автоматического управления электроприводов. Этот метод имеет большое значение для теории и практики электроприводов постоянного и переменного тока. Разработанный еще в 50-х годах двадцатого века сотрудником фирмы «Siemens» С. Kessler [77,78], этот метод в том или ином виде до сих пор применяется в большинстве реальных систем управления электроприводами различного типа. Широкое распространение систем подчиненного регулирования в электроприводах обусловлено следующими их преимуществами. Структурная схема многоконтурной системы подчинённого регулирования представлена на рис. 3.2 Структура многоконтурной системы, как известно, формируется по следующим правилам [4,57]. Объект регулирования разбивается на ряд динамических звеньев таким образом, чтобы выходными переменными всех звеньев были физические величины, представляющие интерес с позиций автоматического регулирования. Для каждого звена формируется свой регулятор.

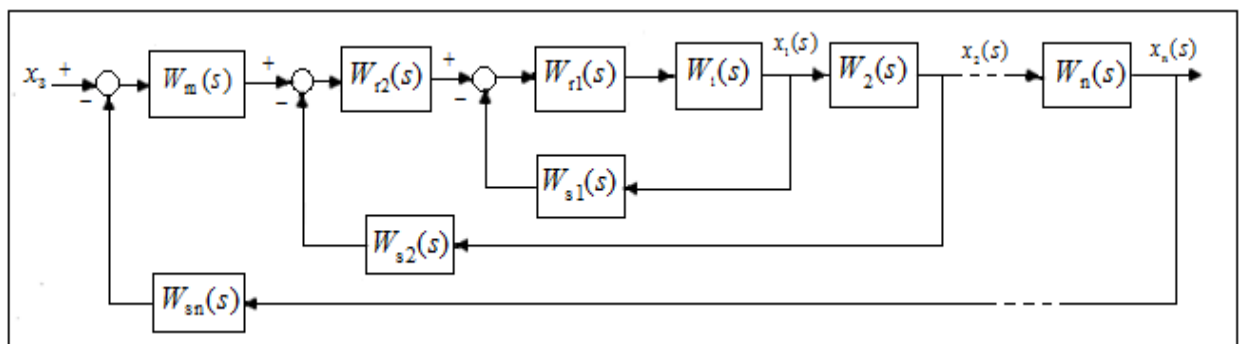


Рисунок 3.2 – Структурная схема многоконтурной системы подчинённого регулирования

где $W_n(s)$ = передаточная функция (ПФ) n -объекта, $W_1(s)$ = ПФ 1ого-объекта, $W_2(s)$ = ПФ 2ого-объекта, $W_n(s)$ = ПФ n ого-объекта, $W_{r1}(s)$ = ПФ 1ого регулятора, $W_2(s)$ = ПФ 2ого-регулятора, $W_{s1}(s)$ = ПФ 1ого-датчика, $W_{s2}(s)$ = ПФ 2ого-датчика, $W_{sn}(s)$ = ПФ n ого-датчика.

Построение структурной схемы системы начинается с самого внутреннего контура, включающего в себя некомпенсируемую часть объекта и следующее за ним типовое звено компенсируемой части. Для выходной переменной первого компенсируемого звена строится замкнутый контур регулирования с последовательным корректирующим звеном – регулятором. Затем по порядку замыкаются контуры регулирования для выходных переменных всех последующих звеньев компенсируемой части объекта – каждый со своим регулятором. При этом обратные связи не перекрещиваются, а регуляторы соединяются последовательно так, что выходной сигнал регулятора каждого внешнего контура является задающим воздействием для внутреннего. Определение типа и расчет параметров регулятора в каждом из контуров осуществляется также последовательно, начиная с самого внутреннего, в соответствии со стандартными настройками. Для синтеза последовательных корректирующих звеньев в простейших линеаризованных контурах регулирования, где компенсируемая часть объекта управления представляет собой одно из перечисленных выше инерционных типовых звеньев, используются хорошо себя зарекомендовавшие на практике модели желаемой динамики, называемые «стандартными настройками- модульный и симметричный оптимум». Основной особенностью подчиненного регулирования является то, что каждый контур имеет помимо обратной связи еще и регулятор – получается комбинированная коррекция (последовательная (регулятор) и параллельная (обратная связь)). Т.е. несколько одноконтурных систем регулирования и внутренние контура подчиняются внешним (отсюда и название метода).

Следовательно, метод подчинённого регулирования, естественно, имеет определённые ограничения, связанные прежде всего с использованием

линеаризованных моделей объектов, видом структурных схем и применяемой их декомпозицией, используемыми стандартными настройками. Вследствие этого современная практика нуждается не только в алгоритмах систем управления электроприводами с настройках на модульный (технический) и симметричный оптимумы, но и в адаптивных оптимальных алгоритмах автоматического управления и обработки информации. Автоматизированные электроприводы с адаптивными свойствами позволяют существенно расширить диапазоны условий применения электроприводов и повысить их эффективность.

Синтез системы управления сложным объектом высокого порядка сводится к последовательному решению нескольких значительно более простых задач второго – третьего порядка (декомпозиция задачи синтеза). При этом всегда имеется возможность расширять структуру САР и наращивать количество регулируемых координат. Процедуры структурно-параметрического синтеза, технической или алгоритмической реализации корректирующих звеньев унифицированы за счет использования типовых регуляторов. Заранее известны показатели качества переходных процессов (стандартные настройки контуров регулирования). Простое ограничение значений регулируемых координат в установившихся и переходных режимах. Удобство проектирования, комплектации и наладки системы электроприводов. Структура многоконтурной системы, как известно, формируется по следующим правилам. Построение структурной схемы системы начинается с самого внутреннего контура, включающего в себя некомпенсируемую часть объекта и следующее за ним типовое звено компенсируемой части. Для выходной переменной первого компенсируемого звена строится замкнутый контур регулирования с последовательным корректирующим звеном – регулятором. Затем по порядку замыкаются контуры регулирования для выходных переменных всех последующих звеньев компенсируемой части объекта – каждый со своим регулятором. При этом обратные связи не перекрещиваются, а регуляторы соединяются последовательно так, что выходной сигнал регулятора каждого

внешнего контура является задающим воздействием для внутреннего. Определение типа и расчет параметров регулятора в каждом из контуров осуществляется также последовательно, начиная с самого внутреннего, в соответствии с рассматриваемыми в следующем разделе пособия стандартными настройками.

Для синтеза последовательных корректирующих звеньев в простейших линеаризованных контурах регулирования, где компенсируемая часть объекта управления представляет собой одно из перечисленных выше инерционных типовых звеньев, используются хорошо себя зарекомендовавшие на практике модели желаемой динамики, называемые «стандартными настройками». Для последующего синтеза системы следует выполнить это разбиение таким образом, чтобы выходными переменными всех звеньев были физические величины, представляющие интерес с позиций автоматического регулирования. Обычно это получается само собой, если математическое описание объекта составлять последовательно в направлении распространения управляющего воздействия на основе фундаментальных законов электротехники и механики.

Примерная схема многоконтурного электропривода показана на рис. 3.3.

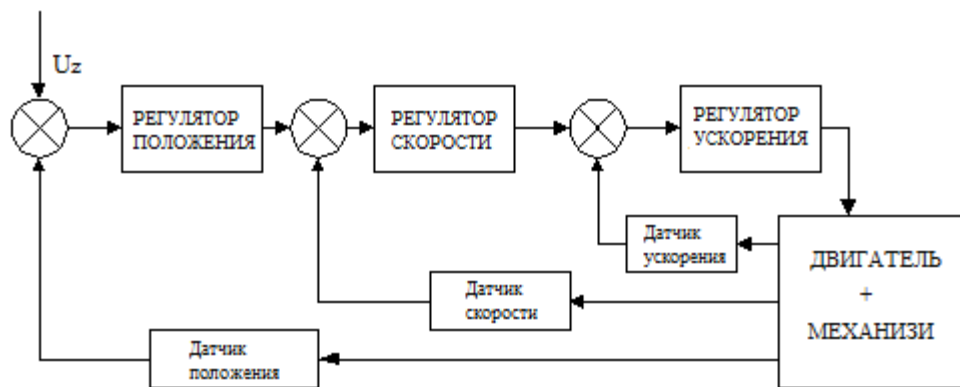


Рисунок 3.3 – Блок-схема многоконтурной системы управления

В основу построения подобных систем положены следующие принципы:

1. Синтез системы управления электроприводом как сложным объектом высокого порядка сводится к последовательному решению нескольких значительно более простых задач второго – третьего порядка (декомпозиция

задачи синтеза). При этом всегда имеется возможность расширять структуру САР и наращивать количество регулируемых координат.

2. Процедуры структурно-параметрического синтеза, технической или алгоритмической реализации корректирующих звеньев унифицированы за счет использования типовых регуляторов.

3. Заранее известны показатели качества переходных процессов (стандартные настройки контуров регулирования).

4. Простое ограничение значений регулируемых координат в установившихся и переходных режимах.

5. Удобство проектирования, комплектации и наладки системы ЭП.

Так как длительность переходных процессов «в малом» синтезированной по «стандартной» методике СПР в геометрической прогрессии увеличивается с ростом числа соподчиненных контуров регулирования (а быстродействие, соответственно, снижается), как правило, на практике в одном канале управления используется не более двух или трех контуров, что вполне достаточно для решения основных задач автоматизированного электропривода [4].

К ним прежде всего относятся:

- глубокая внутренняя логика последовательного решения сложной задачи по частям;
- возможность наращивания структуры системы и количества контролируемых координат состояния объекта;
- упорядоченность и простота процедур синтеза регуляторов многоконтурной системы;
- унификация методов расчета, алгоритмов и технических средств управления;
- стандартизация показателей качества процессов регулирования и ограничения координат;
- удобство проектирования, комплектации, наладки и эксплуатации электроприводов [79].

3.2.3. Алгоритмическое обеспечение систем подчинённого регулирования

Стандартные настройки контуров регулирования. Для синтеза последовательных корректирующих звеньев в простейших линеаризованных контурах регулирования, где компенсируемая часть ОУ представляет собой одно из перечисленных выше инерционных типовых динамических звеньев, используются хорошо себя зарекомендовавшие на практике модели желаемой динамики, называемые «стандартными настройками».

Настройка на модульный оптимум. Стандартная настройка контура регулирования на модульный оптимум (от нем. *das Betragsoptimum*) или оптимум по модулю [80] соответствует фильтру Баттерворта второго порядка [81]. Эта настройка обеспечивает компромисс между высоким быстродействием и низкой колебательностью переходных процессов синтезируемого контура по задающему воздействию благодаря тому, что амплитудно-частотная характеристика САР в замкнутом состоянии максимально приближается к характеристике идеального фильтра нижних частот, т.е. имеет во всей полосе пропускания почти постоянное значение (модуль). В отечественной литературе эту настройку часто называют техническим оптимумом [4, 79, 82, 83].

В разомкнутом состоянии контур, настроенный на модульный оптимум (МО), описывается передаточной функцией:

$$W_{\text{МО}}^{\text{раз}}(p) = \frac{1}{a\tau_{\mu}p(\tau_{\mu}p + 1)} \quad (3.14)$$

где τ_{μ} – малая некомпенсируемая постоянная времени объекта управления; a – настроечный параметр, причем для стандартной настройки принимается $a = 2$. Этой передаточной функции соответствует асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ), приведенная на рис. 3.4. Желаемый разомкнутый контур содержит два динамических звена – интегрирующее и апериодическое. Наклон среднечастотной асимптоты желаемой ЛАЧХ, как того требует известная методика синтеза последовательных и

параллельных корректирующих звеньев (методика В.В. Солодовникова), равен - 20 дБ/дек.

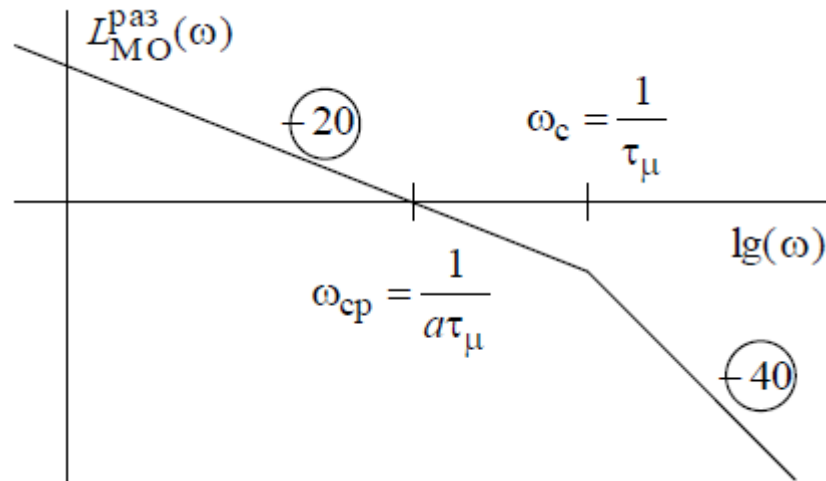


Рисунок 3.4 – ЛАЧХ разомкнутого контура, настроенного на МО (ω_{cp} – частота среза; ω_c – частота сопряжения среднечастотной и высокочастотной асимптот)

В замкнутом состоянии контур, настроенный на МО, имеет передаточную функцию (ПФ)

$$W_{MO}^{зам}(p) = \frac{1/k_0}{a\tau_\mu^2 p^2 + a\tau_\mu p + 1} \quad (3.15)$$

где k_0 – коэффициент главной обратной связи в данном контуре, что при $a=2$ соответствует колебательному звену с коэффициентом демпфирования $\xi=1/\sqrt{2}=0,707$.

Переходные характеристики системы (3.15) по выходу для различных значений настроечного параметра a и $k_0=1$ изображены на рис. 3.5. Стандартной величине $a=2$ соответствуют следующие прямые показатели качества:

- время регулирования $t_{рег}$ (по вхождению переходной характеристики в 5%-ную зону установившегося значения) – $4,1\tau_\mu$;
- время первого согласования $t_{согл}$ – $4,7\tau_\mu$;
- время достижения первого максимума t_{max} – $6,28\tau_\mu$;

- перерегулирование $\sigma_{\max}, \% - 4,3\%$.

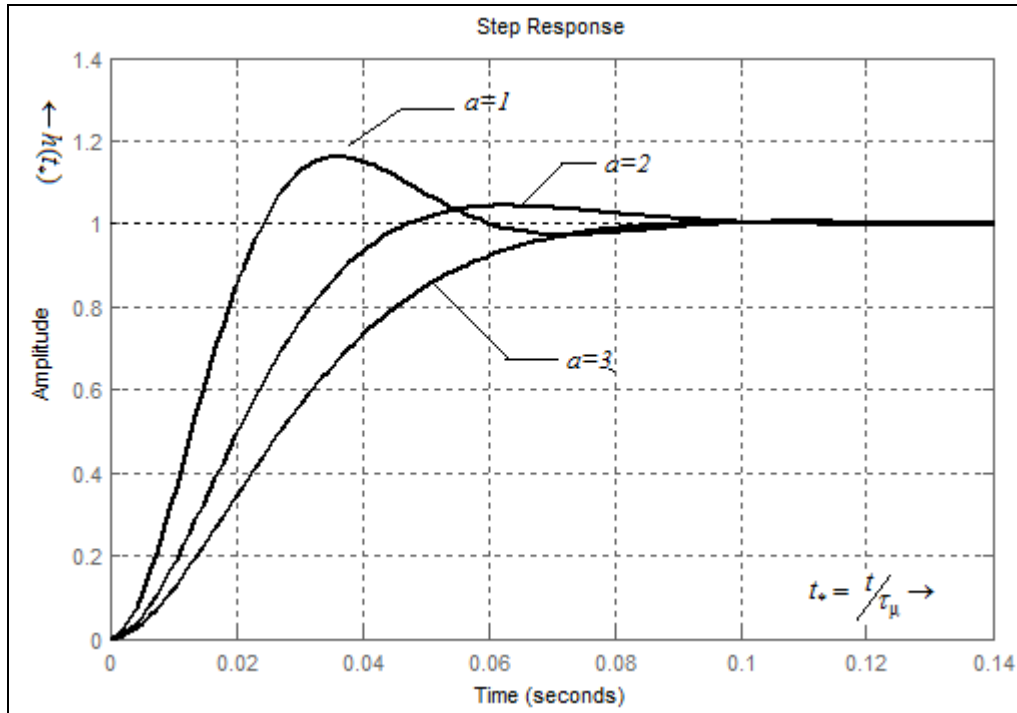


Рисунок 3.5 – Переходные характеристики системы с ПФ (2.2)

Имея в виду самый внутренний контур регулирования в структуре САР, изображенной на рис. 3.2, и отбрасывая нижний индекс «1», кратко проанализируем, какие регуляторы порождает настройка контура на МО для различных типовых динамических звеньев в компенсируемой части объекта управления. Структурная схема рассматриваемого контура приведена на рис. 3.6.

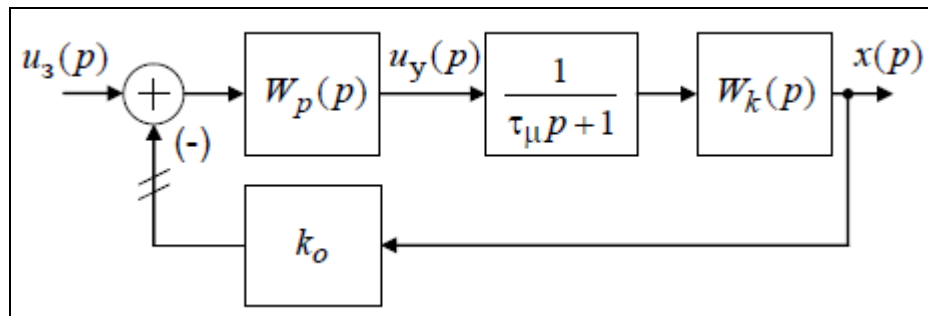


Рисунок 3.6 – Структурная схема внутреннего контура СПР

Сначала получим общую формулу для определения передаточной функции регулятора. Для этого приравняем ПФ контура в разомкнутом состоянии (место

размыкания показано на рис. 3.6 двумя косыми линиями) к ПФ системы, настроенной на МО (3.14):

$$W_{\text{МО}}^{\text{раз}}(p) = W_p(p) \frac{1}{\tau_\mu p + 1} W_k(p) k_0 = \frac{1}{a \tau_\mu p (\tau_\mu p + 1)} \quad (3.16)$$

Отсюда следует, что

$$W_p(p) = \frac{1}{\tau_\mu p + 1} \cdot \frac{1}{W_k(p) k_0}.$$

Таким образом, регулятор компенсирует действие $W_k(p)$ благодаря наличию в его модели обратной ПФ $W_k^{-1}(p)$. Физически компенсация инерционности $W_k(p)$ осуществляется автоматической форсировкой переходного процесса путем динамического увеличения управляющего воздействия $u_y(t)$ относительно его установившегося значения и поясняется ниже)

Перейдем к примерам.

1. Пусть $W_k = \frac{k}{Tp + 1}$, т.е. компенсируемая часть объекта представляет собой апериодическое звено. Тогда $W_p(p) = \frac{1}{a \tau_\mu p} \cdot \frac{Tp + 1}{k k_0} = K_n + \frac{K_n}{p}$

Звено данного типа называется изодромным, а регулятор с такой ПФ – **пропорционально-интегральным** (ПИ). Благодаря наличию в структуре ПИ-регулятора интегрирующего звена, не охваченного внутренней обратной связью, достигается астатизм первого порядка (отсутствие статической ошибки регулирования) синтезируемого контура как по задающему, так и по возможному возмущающему воздействию (на рис. 3.6. не показано). Для иллюстрации механизма форсировки переходного процесса на рис. 3.7. качественно изображены переходные характеристики рассматриваемого контура при $T/\tau_\mu = 5; k_0 = 1; k = 1; a = 2$.

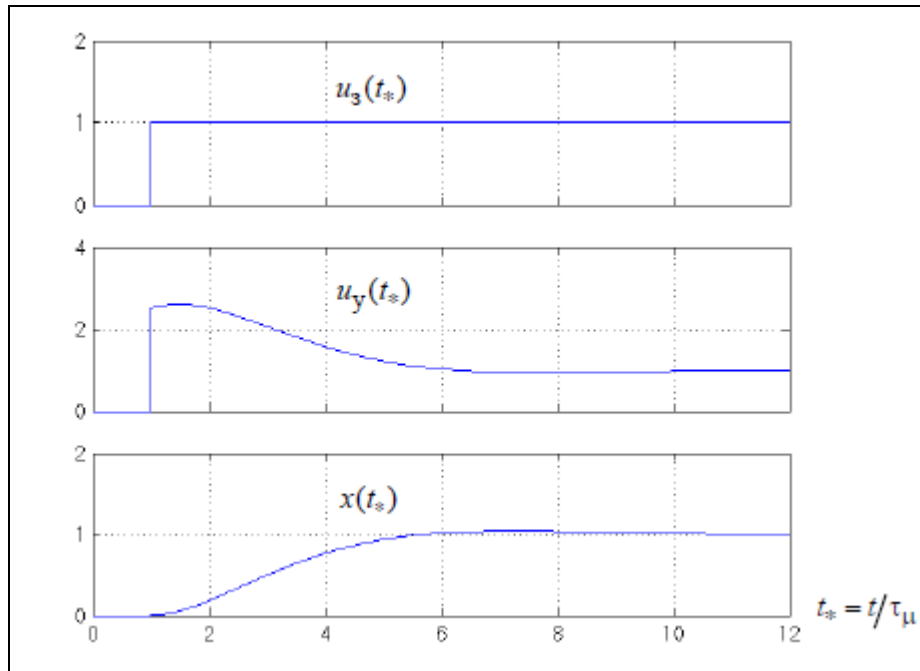


Рисунок 3.7 – Переходные характеристики контура с компенсируемым аperiodическим звеном по управляющему воздействию и выходу

2. Если компенсируемая часть ОУ описывается колебательным звеном, и

$$W_k(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + ATp + 1}, \quad (3.17)$$

То

$$W_p(p) = \frac{1}{a\tau_\mu p} \cdot \frac{T^2 p^2 + Tp + 1}{kk_0} = K_n + \frac{K_u}{p} + pK_d.$$

Эта ПФ соответствует **пропорционально-интегрально-дифференциальному** (ПИД) регулятору. Он также содержит интегрирующее звено, в связи с чем контур с ПИД-регулятором является астатическим.

3. В некоторых системах компенсируемая часть ОУ может быть безынерционной, а регулятор применяется лишь для подавления действия внешнего возмущения. Тогда $W_k(p) = k$, и в результате синтеза получаем **интегральный** (И) регулятор с ПФ

$$W_p(p) = \frac{1}{a\tau_\mu p} \cdot \frac{1}{kk_0} = \frac{K_u}{p}, \quad (3.18)$$

который, естественно, также обеспечивает астатизм контура. Такой И- регулятор, в частности, можно встретить в контуре регулирования ЭДС двухзонной САР скорости с зависимым ослаблением потока и безынерционным датчиком.

4. Как будет ясно из последующих разделов пособия, на практике довольно часто встречается компенсируемая часть объекта, которая сама описывается интегрирующим звеном, $W_k(p) = k / p$. В этом случае регулятор контура, настроенного на МО, оказывается **пропорциональным** (П):

$$W_p(p) = \frac{1}{a\tau_\mu} \cdot \frac{1}{kk_0} = K_n, \quad (3.19)$$

что подразумевает наличие в контуре статической ошибки регулирования по любому постоянно действующему возмущению, точка приложения которого структурно предшествует компенсируемой части ОУ. По задающему воздействию контур остается астатическим. В частности, так происходит при настройке на МО контура регулирования скорости электропривода, построенного по структуре СПР с подчиненным контуром регулирования тока якоря (момента), что препятствует достижению широкого диапазона регулирования.

Последовательно - подчиненное регулирование координат – это блестящий методологический принцип, давший мощный толчок развитию и усовершенствованию систем управления электроприводами постоянного и переменного тока в самых различных сферах применения. Широкое распространение систем подчиненного регулирования с последовательной коррекцией обусловлено рядом важных положительных качеств этих систем.

Настройка на симметричный оптимум. Стандартная настройка контура регулирования на симметричный оптимум (нем. das symmetrische Optimum) предложена С. Kessler [88,89] и соответствует фильтру Баттерворта третьего порядка [80]. Она характеризуется значительно худшими по сравнению с МО показателями качества переходных процессов, но позволяет обеспечить астатизм

первого порядка по возмущению в контурах с интегрирующей компенсируемой частью.

В разомкнутом состоянии контур, настроенный на симметричный оптимум (СО), описывается передаточной функцией

$$W_{\text{CO}}^{\text{раз}}(p) = W_{\text{МО}}^{\text{раз}}(p) \frac{a^2 \tau_{\mu}^2 p + 1}{a^2 \tau_{\mu}^2 p} = \frac{a^2 \tau_{\mu}^2 p + 1}{a^3 \tau_{\mu}^2 p^2 (\tau_{\mu} p + 1)}, \quad (3.20)$$

т.е. с целью повышения порядка астатизма в желаемую разомкнутую систему вносится еще одно интегрирующее звено, причем для обеспечения устойчивости и необходимого качества переходных процессов по возмущению контур также дополняется форсирующим звеном.

Соответствующая передаточной функции (3.20) асимптотическая ЛАЧХ изображена на рис. 3.8. Она симметрична относительно точки пересечения с осью ординат, чем, по-видимому, и обусловлено название стандартной настройки.

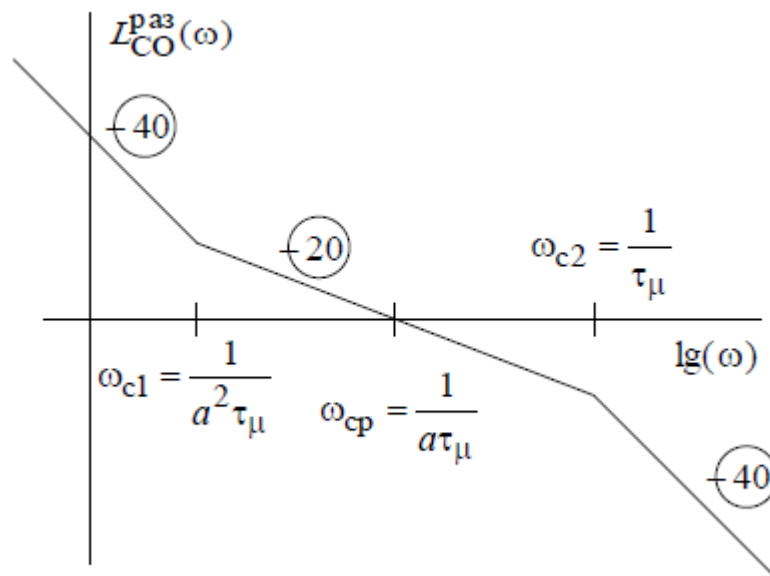


Рисунок 3.8 – ЛАЧХ разомкнутого контура, настроенного на СО

В замкнутом состоянии контур, настроенный на СО, имеет передаточную функцию

$$W_{\text{CO}}^{\text{зам}}(p) = \frac{(a^2 \tau_{\mu}^2 p + 1) / k_o}{a^3 \tau_{\mu}^3 p^3 + a^3 \tau_{\mu}^2 p^2 + a^2 \tau_{\mu} p + 1}, \quad (3.21)$$

где k_o – по-прежнему коэффициент главной обратной связи.

Внесенное в контур с целью динамической коррекции форсирующее звено повышает порядок числителя (3.21) и неблагоприятно сказывается на перерегулировании САР по задающему воздействию, которое при $a=2$ составляет $\sigma_{\text{max}} = 43,4\%$ ($t_{\text{рег}} = 14,7\tau_{\mu}$). Для уменьшения перерегулирования до приемлемых значений на задающий вход контура, настраиваемого на СО, устанавливают апериодический фильтр (зататчик интенсивности) с ПФ

$$W_{\Phi}(p) = (a^2 \tau_{\mu} p + 1)^{-1}. \quad (3.22)$$

В результате структурная схема контура принимает вид, изображенный на рис. 3.9, а ПФ контура с фильтром по задающему воздействию записывается как

$$W_{\text{CO}}^{\text{зам}}(p) = \frac{1/k_o}{a^3 \tau_{\mu}^3 p^3 + a^3 \tau_{\mu}^2 p^2 + a^2 \tau_{\mu} p + 1}. \quad (3.23)$$

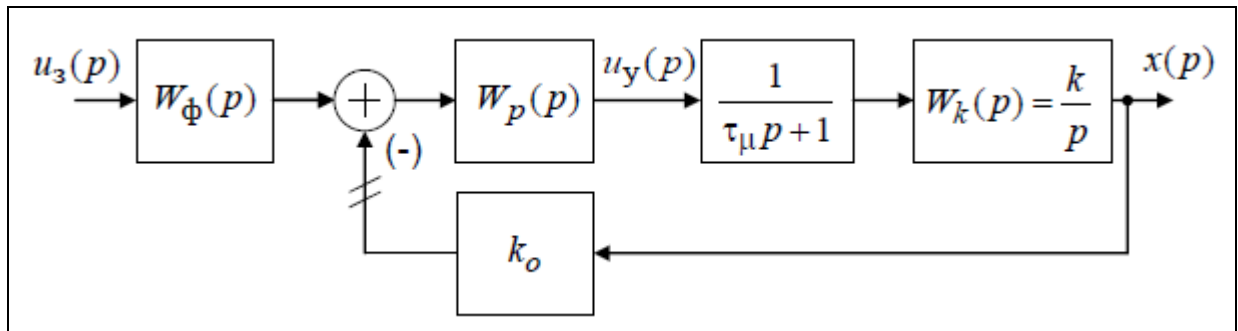


Рисунок 3.9 – Структурная схема контура, настроенного на СО

Переходная характеристика системы (3.21), соответствующая стандартной настройке ($a=2$), и переходные характеристики системы (3.23) по выходу для различных значений настроечного параметра a при $k_o=1$ изображены на рис. 3.10. Стандартная величина $a=2$ в контуре с фильтром (3.22) дает следующие прямые показатели качества:

- время регулирования $t_{\text{рег}}$ (по вхождению переходной характеристики в 5%-ную зону установившегося значения) – $11,93\tau_\mu$;
- время первого согласования $t_{\text{согл}} - 7,02\tau_\mu$;
- время достижения первого максимума $t_{\text{max}} - 9,84\tau_\mu$;
- число колебаний $l - 1$;
- перерегулирование $\sigma_{\text{max}}, \% - 8,15\%$.

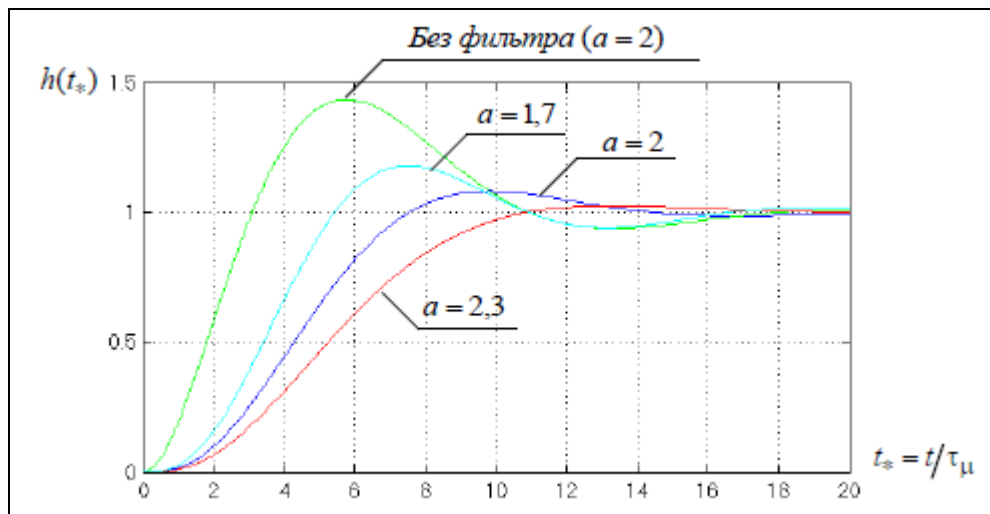


Рисунок 3.10 – Переходные характеристики систем с ПФ (3.21) и (3.23)

Приравняем ПФ контура в разомкнутом состоянии (место размыкания вновь показано на рис. 3.10 двумя косыми линиями) к ПФ системы, настроенной на СО (3.20):

$$W_{\text{раз}}(p) = W_p(p) \frac{1}{\tau_\mu p + 1} W_k(p) k_o = W_{\text{CO}}^{\text{раз}}(p) = \frac{a^2 \tau_\mu p + 1}{a^3 \tau_\mu^2 p^2 (\tau_\mu p + 1)}.$$

Отсюда

$$W_p(p) = \frac{a^2 \tau_\mu p + 1}{a^3 \tau_\mu^2 p^2} \cdot \frac{1}{W_k(p) k_o},$$

или для интегрирующей компенсируемой части ОУ ($W_k(p) = k/p$):

$$W_p(p) = \frac{a^2 \tau_\mu p + 1}{a^3 \tau_\mu^2 p^2} \cdot \frac{1}{k k_o}.$$

Таким образом, настройка на СО в этом случае порождает ПИ-регулятор, а следовательно, обеспечивает астатизм контура регулирования по возмущению.

3.3. Методика совместного использования принципов самоорганизации, подчинённого регулирования для автоматизации электроприводов

Таким образом, синтезы систем управления различными динамическими объектами осуществляются достаточно успешно при автономном применении каждого из рассмотренных принципов. Однако целесообразно рассмотреть возможности их совместного использования.

Сущность подхода в этом случае заключается в следующем.

Автоматизированные электроприводы с адаптивными свойствами позволяют существенно расширить диапазоны условий применения электроприводов и повысить их эффективность.

Из всех известных методов синтеза адаптивных оптимальных управлений, наиболее эффективными в практическом применении к сложным нелинейным системам является методы теории самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией [37,53].

Самоорганизующийся АР приспосабливается достаточно быстро к самым различным объектам, включая нестационарные и нелинейные. Для адаптивных регуляторов традиционных классов это недоступно. Главное отличие новых АР от традиционных заключается в том, что осуществляется оптимизация на коротком интервале времени (оптимизация на очередной малый цикл или несколько таких циклов). Такая оптимизация "в коротком" делает поведение объекта предсказуемым посредством универсального способа экстраполяции. Границы применимости нового класса АР еще не определены, но есть основание считать, что они широкие. Экстраполяция наиболее важных сигналов и оценивание производных позволит применять самоорганизующиеся наблюдатели для

диагностики, реконфигурации, сигнализации, идентификации, а также поддержки принятия решений операторами.

В работе [84] предложены подход и методика синтеза адаптивной на принципах самоорганизации одноконтурной системы управления судовым электроприводом. Показано также, что такая адаптивная система имеет возможность быстрой самоорганизации контуров управления в условиях аварийных нештатных ситуаций. Эта возможность и поддержка операторов при принятии решения и их временная замена контуром автоматического управления системы может играть очень важную роль в предотвращении аварий и катастроф. Используемые алгоритмы способствуют относительной простоте программного обеспечения системы и возможности его микропроцессорной реализации на промышленных контроллерах.

Распространение на многоконтурные системы управления электроприводами с подчинённым регулированием этого подхода следует считать его развитием. Таким образом, основной особенностью правила формирования структуры системы подчиненного регулирования, как указано, является то, что каждый контур имеет помимо обратной связи еще и регулятор.

Учитывая это правило формирования структуры многоконтурной системы методом подчинённого регулирования, и возможности СОРЭ, возможно следующие их совместное использование для синтеза системы управления с новыми адаптивными свойствами:

- регулятор последнего контура необходимо использовать только с самоорганизующимися алгоритмами, т.е. СОРЭ. При этом все предыдущие внутренние контура образуют обобщённый объект, при этом внутренние контура могут быть трёх типов;
- первый тип, контура с регуляторами и их стандартными настройками, а также другими возможностями настройки подчинённого регулирования;
- второй тип, контура с произвольными нелинейными, нестационарными элементами и структурой;

– третий тип, с отдельными контурами как с регуляторами и их стандартными настройками, так и с произвольными нелинейными, нестационарными элементами и структурой;

Например, структурные схемы адаптивных двухконтурных и трёхконтурных систем управления первого типа имеют вид:

– для синтеза адаптивного двухконтурного регулятора скорости регулятор первого контура может настраиваться традиционным способом, как для подчинённого регулирования, но регулятор второго контура должен быть СОРЭ, рис. 3.11.

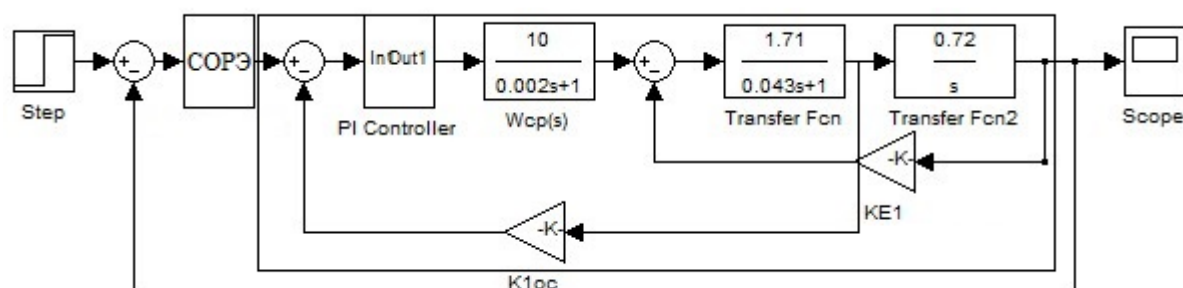


Рисунок 3.11 – Структурная схема адаптивной двухконтурной системы управления скоростью электроприводом с СОРЭ регулятором

– для синтеза адаптивного трёхконтурного регулятора положения регуляторы первого и второго контура могут настраиваться традиционным способом, как для подчинённого регулирования, но регулятор третьего контура должен быть СОРЭ, рис. 3.12.

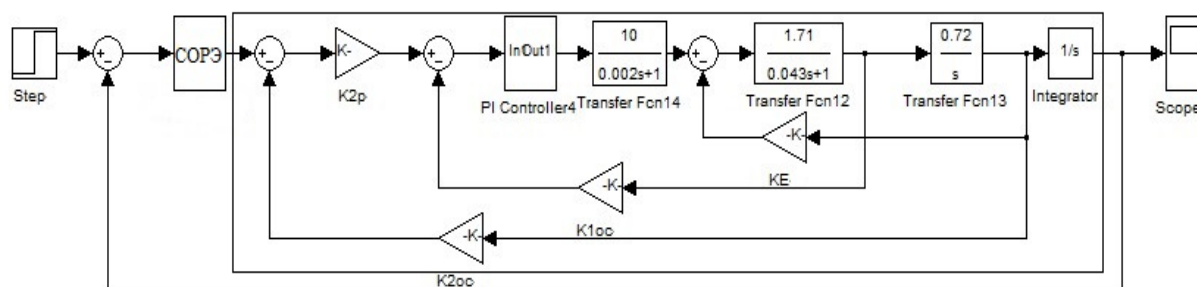


Рисунок 3.12 – Структурная схема адаптивной трёхконтурной системы управления положением электроприводом с СОРЭ регулятором

3.4. Выводы по главе 3

Итак, системы управления электроприводами на основе принципов подчинённого регулирования и самоорганизации приобретают отдельные свойства, характерные как для систем подчинённого регулирования и самоорганизующихся, так и новые. Применение предлагаемого подхода, в частности, приводит к возможности разработки систем управления одновременно с алгоритмами структурной и параметрической адаптации, а также с ограничениями на конкретные отдельные переменные [85-87].

ГЛАВА 4

АДАПТИВНЫЕ НА ПРИНЦИПАХ САМООРГАНИЗАЦИИ МНОГОЦЕЛЕВЫЕ С РАСШИРЕННЫМ КРУГОМ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

4.1. Адаптивная двухконтурная скоростная систем управления ЭП

В соответствии с методикой совместного использования принципов самоорганизации и подчинённого регулирования разработаем системы управления, отличающиеся наличием самоорганизующихся алгоритмов управления и возможностью расширенным кругом решаемых задач применительно к ЭП постоянного тока. Как показано в гл.1, 2, на основе принципа подчинённого регулирования разработаны в большинстве своём системы управления ЭП постоянного тока, но в тоже время этот принцип применяется и системах управления ЭП переменного тока. В связи с этим рассматриваемый подход может быть применён к системам управления на основе принципа подчинённого регулирования как к ЭП постоянного, так и переменного тока. Для сравнительного анализа рассмотрим два варианта синтеза систем: системы управления ЭП с традиционными регуляторами на основе метода подчинённого управления и адаптивной системы с совместным применением регулятора на основе принципа подчинённого регулирования и самоорганизующегося регулятора (СОРЭ- регулятора) при наличии различных внутренних и внешних возмущений. В качестве внутренних возмущений рассмотрим параметрические возмущения изменения постоянной времени якоря двигателя в T_a в 5, 10 и 20 раз от исходного значения, структурных возмущений – отсутствие обратной связи двигателя по частоте вращения, внешнего возмущения – помехи типа «белого» шума в датчиках ЭП.

Этапами разработки адаптивных систем являются:

– выбор структурной схемы системы;

- формирование обобщённой математической модели;
- настройка СОРЭ-регулятора;
- имитационное моделирование.

4.1.1. Выбор структурной схемы системы

На рисунке 4.1 приведена структурная схема двухконтурной скоростной системы управления на основе метода подчинённого регулирования.

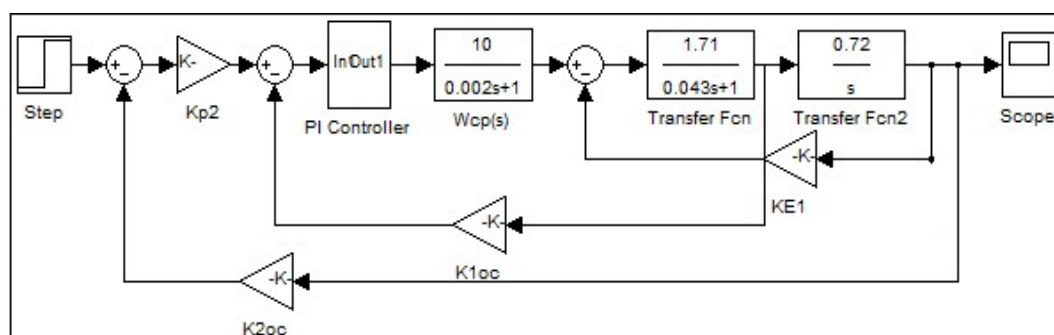


Рисунок 4.1 – Структурная схема двухконтурной скоростной системы управления с ПИ- регулятором в первом контуре и П- регулятором во втором

Целесообразность применения системы управления с СОРЭ регулятором определяется задачей её синтеза, наличия нелинейных элементов, нестационарностью элементов при эксплуатации ЭП, а также степенью разработки и адекватности математической модели. При этом рассматриваются конкретно все элементы по контурам. СОРЭ-регулятор в схеме системы должен располагаться в контуре, где присутствует нелинейные, нестационарные элементы или неопределённость их математического описания. Полагаем для определённости наличие этой неопределённости в первом контуре, так как в ММ контура находится изменяющаяся при эксплуатации электромагнитная постоянная времени якоря постоянная $T_{я}$. Тогда структурная схема двухконтурной скоростной системы управления с СОРЭ– регулятором принимает вид, представленный на рис. 4.2, где первый контур остаётся без изменения, а во втором контуре вместо П-регулятора используется СОРЭ - регулятор.

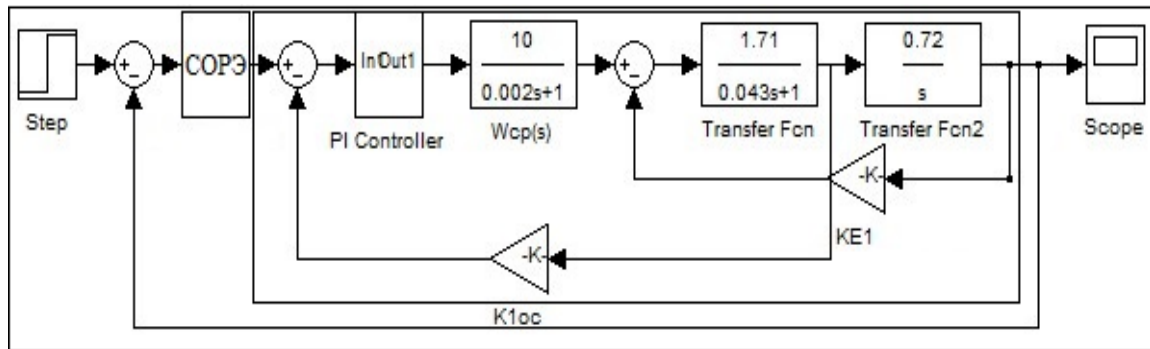


Рисунок 4.2 – Структурная схема двухконтурной скоростной системы управления с СОПЭ - регулятором

4.1.2. Формирование обобщённой математической модели

В системах мехатроники преимущественное применение нашли двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или магнитоэлектрические. Управление этими двигателями, как правило, осуществляется по цепи якоря. Уравнения, которыми описываются электромагнитные и электротехнические процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением, имеют вид:

$$\begin{cases} u_{\text{я}} = R_{\text{я}}(T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}}) + e_{\text{я}}, \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \\ \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \\ e_{\text{я}} = k_E \omega_m, M = k_M i_{\text{я}}. \end{cases} \quad (4.1)$$

где: $u_{\text{я}}, i_{\text{я}}, e_{\text{я}}$ - напряжение, ток и противо ЭДС якоря, $L_{\text{я}}, R_{\text{я}}, T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ - индуктивность, сопротивление и электромагнитная постоянная времени якоря, $\omega_m, M, M_H, \theta_m$ - механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала, J - момент инерции ротора, коэффициенты k_E, k_M являются конструктивными постоянными.

Таблица 4.1 – Параметры двигателя паспортных данных

P_H [кВт]	$U_{\text{я}} = U_B$ [В]	n_H [об/мин]	$I_{\text{я}}$ [А]	$R_{\text{я}}$ [Ом]	R_B [Ом]	J кг[М ²]
0,45	110	3000	5,6	0,585	400	0,36

В таблице 4.1 введены следующие обозначения:

- номинальная мощность двигателя P_H [кВт];
- номинальное напряжение питания якоря $U_{\text{я}}$ [В];
- номинальное напряжение возбуждения U_B [В];
- номинальный ток якоря $I_{\text{я}}$ [А];
- номинальная скорость вращения якоря n_H [об/мин];
- сопротивления обмотки якоря $R_{\text{я}}$ [Ом];
- сопротивления обмотки возбуждения R_B [Ом].

Из таблицы, мы расчет коэффициенты ниже:

Номинальный момент двигателя в (Нм),

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi n_H} \quad (4.2)$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30 \cdot 0,45 \cdot 1000}{\pi \cdot 3000} = 1,4322 \text{ Нм}.$$

Номинальный ток возбуждения в (А),

$$I_B = \frac{U_B}{R_B} \quad (4.3)$$

$$I_B = \frac{110}{400} = 0,275 \text{ А}.$$

Конструктивные постоянные коэффициенты в (H_M/A) и в (B/c) ,

$$k_M = \frac{M_H}{I_Y} \quad (4.4)$$

$$k_M = \frac{1,4322}{5,6} = 0,26 H_M / A.$$

$$k_E = \frac{30(U_Y - R_Y I_Y)}{\pi n_H} \quad (4.5)$$

$$k_E = \frac{30(110 - 0,585 \cdot 5,6)}{\pi \cdot 3000} = 0,34 B / c.$$

Индуктивность якоря в (B/c) ,

$$L_Y = \frac{30 U_Y c_X}{\pi n_H I_Y} \quad (4.6)$$

где $c_X = 0,3 - 0,4$ - Эмпирический коэффициент.

$$L_Y = \frac{30 \cdot 110 \cdot 0,4}{\pi \cdot 3000 \cdot 5,6} = 0,025 B / c$$

Электромагнитная постоянная времени якоря в $(с)$,

$$T_Y = \frac{L_Y}{R_Y} \quad (4.7)$$

$$T_Y = \frac{0,025}{0,585} = 0,043 c.$$

При этих значениях T_Y в матричном виде уравнения (3.1) примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU \end{aligned}$$

а) $T_{я} = 0,043c$; исходное значение:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,7222 & 0 \\ -13,6 & -23,2558 & 40 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

б) $5T_{я} = 0,215c$;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,7222 & 0 \\ -13,6 & -4,6512 & 40 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

в) $10T_{я} = 0,43c$;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,7222 & 0 \\ -13,6 & -2,3256 & 40 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Расчёт коэффициентов регуляторов в первом и во втором контуре с широтно-импульсным преобразователем для реализации оптимума по модулю приведён в работе [4]. После определения структурной схемы адаптивной системы далее осуществляется реализация самоорганизующегося алгоритма управления, приведённого в п.3 гл.3. Вполне естественно, СОРЭ-регулятор, как и традиционный регулятор требует настройки.

4.1.3. Настройка СОРЭ-регулятора

Особенность этого регулятора заключается в том, что формальные методы его настройки пока не разработаны, поэтому необходим подход с помощью метода последовательного приближения. Параметров настройки в принятом алгоритмическом обеспечении восемь, поэтому исходные значения их принимают исходя из опыта эксплуатации ЭП, а затем последовательно определяют влияние каждого на вид переходного процесса.

4.1.3.1. Влияние вариантов выбора управлений на переходные процессы

Отличительной особенностью рассматриваемого адаптивного регулятора (АР) с переменной структурой наблюдателя служит автоматический выбор порядка модели оцениваемого процесса на каждом цикле или на протяжении ряда циклов. Этот выбор должен производиться по показателю, измеряемому и вычисляемому в ходе самого процесса регулирования, связанному с качеством, точностью регулирования. Степень адекватности принятой модели по отношению к фактическому процессу обычно определяет качество, точность оптимального управления. Поэтому указанный выбор порядка модели в процессе функционирования контура регулирования можно рассматривать как процедуру распознавания.

Объект управления;

$$\dot{x}[k+1] = Ax[k+1] + Bu[k+1].$$

Математическая модель;

$$x[k+1] = \Phi[1]x[k],$$

$$\text{Где } \Phi[1] = \begin{bmatrix} 1 & k\Delta t_{III} & \frac{1}{2}(k\Delta t_{III})^2 \\ 0 & 1 & k\Delta t_{III} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad x[k] = \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \\ x_3[k] \end{bmatrix}.$$

где Δt_{III} = шаги в цикле, $k=0,1,2,\dots$ номер шагов, $x(k\Delta t_{III}) = x[k]$, здесь $x[0]$ начальное условие

Сравнительный анализ управления электроприводам по частоте вращения проводился в динамических и установившихся режимах их работы.

Переходные процессы при ступенчатом воздействии в управлении приведены на рисунке.

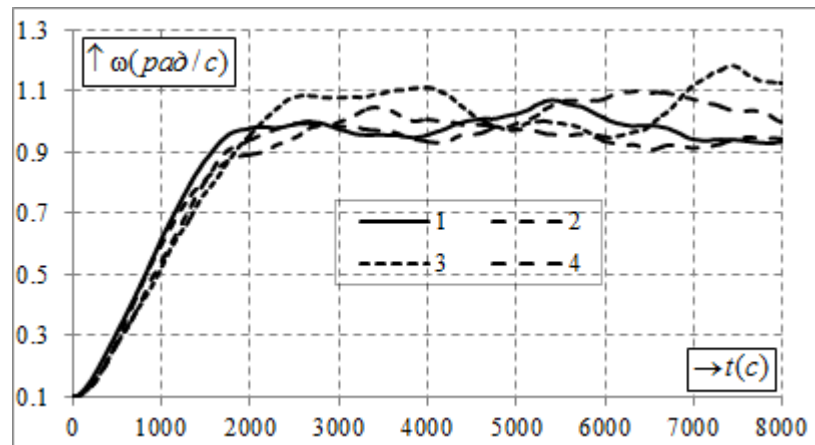


Рисунок 4.3 – Графики переходных процессов с различными выборами управления при исходном значении постоянной времени $T_{я}$ (кривая 1 – с выборами порядками 2,3; кривая 2 – с выборами порядками 2,4; кривая 3 – с выборами порядками 3,4; кривая 4 – с выборами порядками 2,3,4)

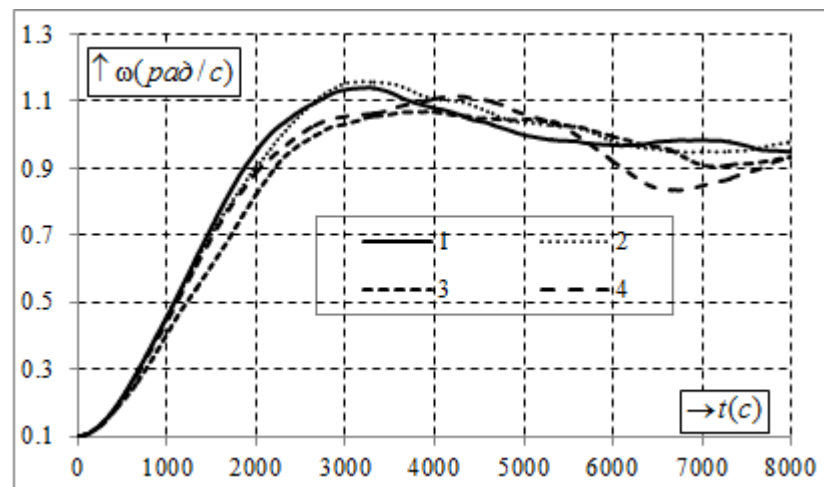


Рисунок 4.4 – Графики переходных процессов с различными выборами управления при значении постоянной времени $5T_{я}$ (кривая 1 – с выборами порядками 2,3; кривая 2 – с выборами порядками 2,4; кривая 3 – с выборами порядками 3,4; кривая 4 – с выборами порядками 2,3,4)

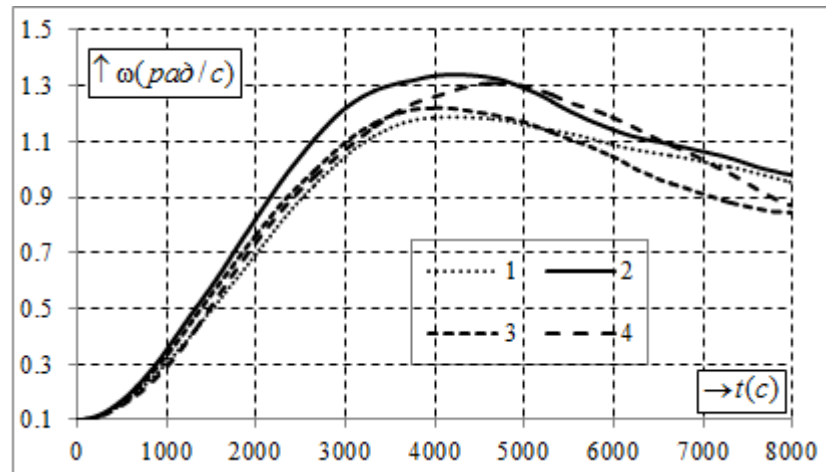


Рисунок 4.5 – Графики переходных процессов с различными выборами управления при значении постоянной времени $10T_{\text{я}}$ (кривая 1 – с выборами порядками 2,3; кривая 2 – с выборами порядками 2,4; кривая 3 – с выборами порядками 3,4; кривая 4 – с выборами порядками 2,3,4)

Вывод: Из вида графиков следует, что лучший вариант с выборами порядков 2,3, так как все переходные процессы имеют малые перерегулирования и устанавливаются по заданному значению и с небольшим временем переходного процесса.

4.1.3.2. Влияние вариантов исполнительного механизма (реле, насыщение) на переходные процесс

Как и в предыдущих исследованиях, исполнительная часть АР имеет алгоритм, синтезированный на основе функционала обобщенной работы. Это предполагает постоянство управления в течение цикла (точнее, времени экстраполяции). Поэтому на выходе АР устанавливается экстраполятор нулевого порядка, обеспечивающий кусочно-постоянную экстраполяцию. Единственной, но существенной особенностью алгоритма исполнительной части АР, рекомендуемого в данной, является выбор времени экстраполяции (прогнозирования) в функционале обобщённой работы (ФОР). В указанных работах это время выбиралось путем определения в процессе функционирования ФОР минимума главной части детерминированного ФОР, вычисляемого на

прогнозируемом свободном движении. Однако, точность прогноза (экстраполяции) в первую очередь определяется шумом датчика рассогласования и при рассмотренном наблюдателе существует оптимальное время экстраполяции $\theta_{\text{эк}}$, при котором точность прогнозирования максимальна. Согласно предыдущему это время определяется в интересах автоматического набора порядка наблюдателя. Логично выбрать $\theta_{\text{эк}}$ в качестве времени экстраполяции и в исполнительной части АР. Это упрощает полную систему алгоритмов за счет исключения алгоритма поиска минимума главной части ФОР на экстраполируемом движении и сокращает вычислительные затраты. Сокращение затрат происходит не только благодаря устранению упомянутой операции, но и за счет сокращения времени экстраполяции. Для непрерывного на каждом цикле варианта главная часть квадратичного ФОР для исполнительной системы АР имеет вид

$$I_{\Gamma} = \hat{x}_1^2(\theta_{\text{эк}}) + \beta_1 \int_0^{\theta_{\text{эк}}} \hat{x}_1^2(\theta) d\theta.$$

Здесь I_{Γ} - главная часть ФОР, вычисленная на экстраполированной по результатам измерений на предыдущем цикле оценке процесса:

$$\hat{x}_1(\theta) = \hat{x}_1(-0) + \hat{x}_2(-0)\theta + \dots + \frac{\hat{x}_n(-0)\theta^{n-1}}{(n-1)!}$$

β_1 - заданный весовой коэффициент.

В аналитическом виде оптимальное управление на очередной цикл имеет вид:

$$u = -k_1 \frac{\partial \hat{I}_{\Gamma}}{\partial \hat{x}_{n-1}(0)} = -\frac{2k_1 \theta_{\text{эк}}^{n-1}}{(n-1)!} \left[\left(1 + \frac{\beta_1 \theta_{\text{эк}}}{n}\right) \hat{x}_1(-0) + \right. \\ \left. + \left(1 + \frac{\beta_1 \theta_{\text{эк}}}{n+1}\right) \hat{x}_2(-0) \theta_{\text{эк}} + \dots + \left(1 + \frac{\beta_1 \theta_{\text{эк}}}{2n-1}\right) \frac{\hat{x}_n(-0)}{(n-1)!} \theta_{\text{эк}}^{n-1} \right],$$

где k_1 - коэффициент, обратный по отношению к весовому коэффициенту в квадратичных “затратах на управление” полного ФОР.

Эффект насыщения. В реальных системах всегда есть ограничения на максимальную величину управляющего воздействия. В судовых системах управления это, например, предельная скорость электромотора привода, предельное значение угла перекладки руля, предельная скорость перекладки. На малых углах поворота влиянием таких нелинейных ограничений можно пренебречь, однако при больших величинах сигналов они существенно изменяют свойства системы.

Нелинейности такого типа называются «насыщением»:



Они описываются уравнением

$$\bar{u} = \begin{cases} u_{\min}, & \text{при } u < u_{\min} \\ u, & \text{при } u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ u_{\max}, & \text{при } u > u_{\max} \end{cases}$$

где u – сигнал на входе звена, \bar{u} – сигнал на выходе (с учетом насыщения), u_{\min} и u_{\max} – допустимые пределы.

Для компенсации постоянных возмущений в регулятор часто вводится интегрирующее звено. При этом в системах с насыщением наблюдается эффект «залипания» интегратора. Он заключается в том, что управляющий сигнал уже достиг предельного значения, а интегратор продолжает интегрировать («наматывать») ошибку, хотя увеличивать управление уже нельзя. Когда ошибка изменит знак, потребуется переложить руль в другую сторону, но этого не произойдет, поскольку выход интегратора очень велик. В результате увеличивается перерегулирование и время переходного процесса. На практике такое поведение системы может оказаться недопустимым.

Для того, чтобы предотвратить «наматывание» интегратора, используются специальные приемы нелинейной коррекции. Они сводятся к одному из двух вариантов:

Условное интегрирование: если сигнал управления достигает предельного значения, интегратор отключается и интегрирование останавливается

Техника anti-windup: из входа интегратора вычитается сигнал, который поступает с блока компенсации насыщения. Пусть интегратор включается параллельно остальной части регулятора.

Мы исследовали влияние вариантов управлений на выше, там видно лучший вариант с выборами управлений 2,3. Поэтому мы последовательно исследуем влияние вариантов исполнительного механизма ИМ на переходные процессы на двух видно - реле и насыщение.

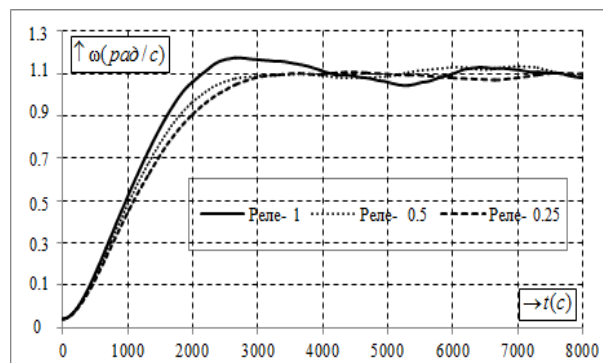


Рисунок 4.6 – Графики переходных процессов влияния вариантов исполнительного механизма ИМ (реле) при исходном значении постоянной времени $T_{я}$

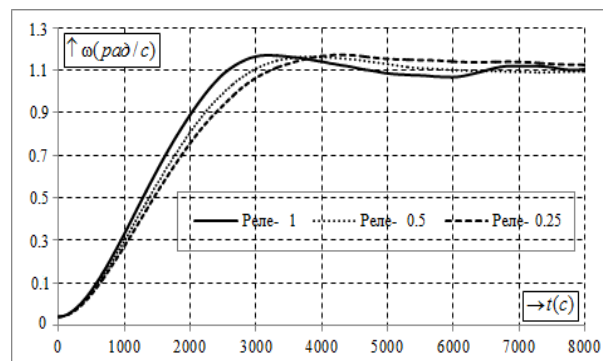


Рисунок 4.7 – Графики переходных процессов влияния вариантов исполнительного механизма ИМ (реле) при значении постоянной времени $5T_{я}$

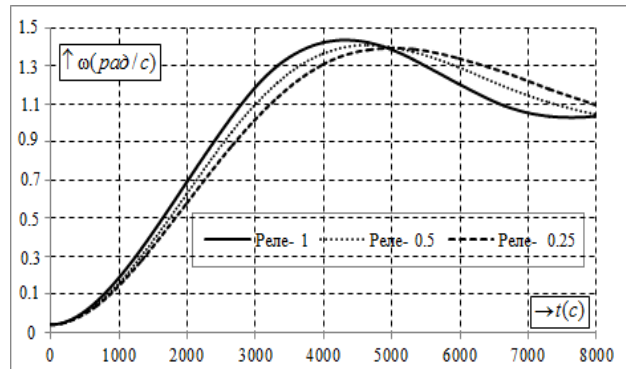


Рисунок 4.8 – Графики переходных процессов влияния вариантов исполнительного механизма ИМ (реле) при значении постоянной времени $10T_{я}$

Вывод: Из графиков следует, что лучший вариант (+0,25_-0,25) и малое перерегулирование и кратное время длительности.

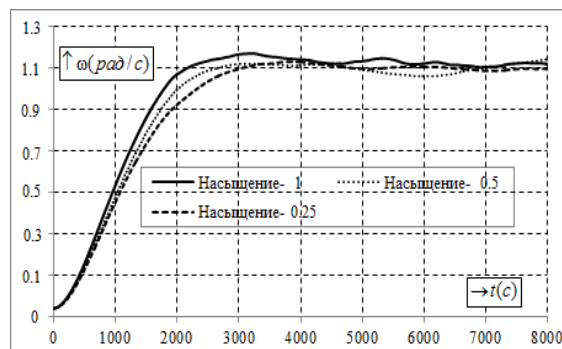


Рисунок 4.9 – Графики переходных процессов влияния вариантов исполнительного механизма ИМ (насыщение) при исходном значении постоянной времени $T_{я}$

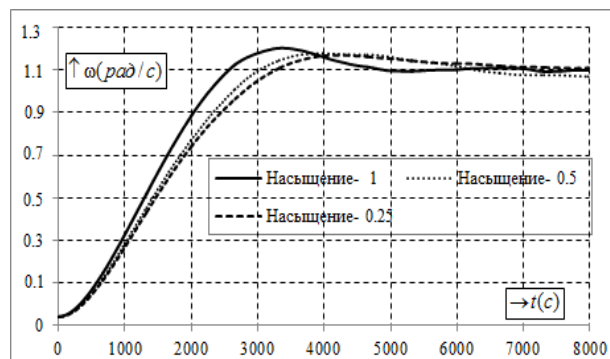


Рисунок 4.10 – Графики переходных процессов влияния вариантов исполнительного механизма ИМ (насыщение) при значении постоянной времени $5T_{я}$

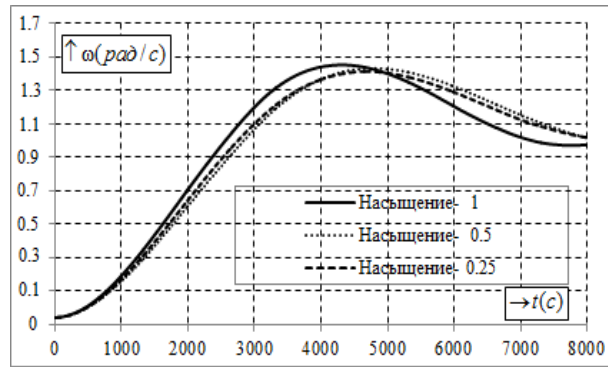


Рисунок 4.11 – Графики переходных процессов влияния вариантов исполнительного механизма ИМ (насыщение) при значении постоянных времени $10T_{я}$

Вывод: Из графиков следует, что лучший вариант (+0,25_-0,25), при этом имеем не большое перерегулирование и время переходного процесса.

4.1.3.3. Влияние времени цикла и шага ($T_{цикла}$ и $T_{шага}$) на переходные процессы

Длительности цикла. Для цели автоматического определения длительности цикла обратимся к формуле, записанной в виде

$$t_{Ц}^n = \frac{n! \sigma_{нэ}}{\sqrt{M[x_1^{(n)}(\xi)]^2}},$$

Где $\sigma_{нэ}$ - допустимая ошибка экстраполяции стационарного процесса посредством полинома n -й степени. На выходах набора ММ формируются оценки производных разных порядков. Поэтому дисперсии этих производных $M[x_1^{(n)}]^2$ могут быть приближенно определены в ходе функционирования контура. Для этого вычисляются средние значения квадратов оценок для цикла или ряда циклов. Во втором случае принимается, что смена порядка наблюдателя происходит одновременно с изменением длительности цикла. Эта длительность в обоих случаях определяется по формуле

$$t_{\text{ц}}^n = \frac{n! \sigma_{n\theta}}{\sqrt{[x_1^{(n)}]^2}}.$$

Начальное значение $t_{\text{ц}}$ задается по априорным данным.

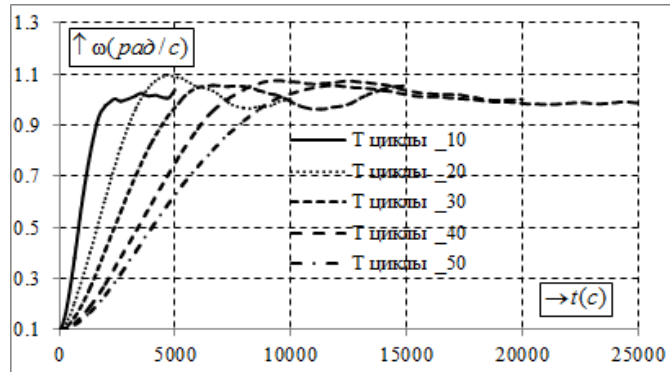


Рисунок 4.12 – Графики переходных процессов влияния вариантов Т цикла при исходном значении постоянной времени $T_{\text{я}}$

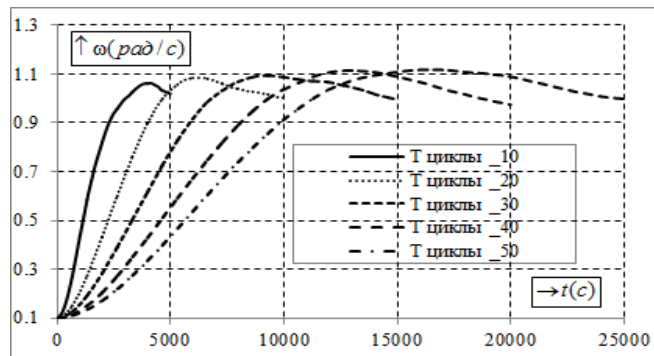


Рисунок 4.13 – Графики переходных процессов влияния вариантов Т цикла при значении постоянной времени $5T_{\text{я}}$

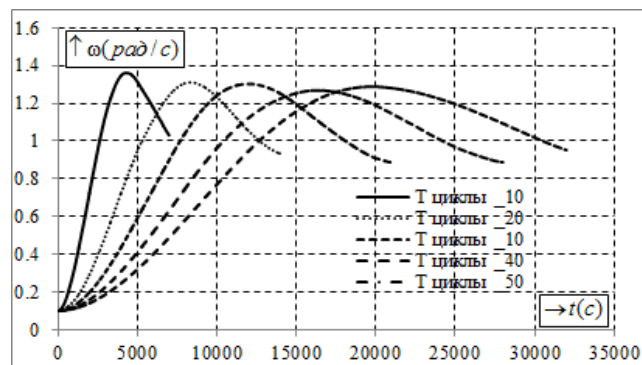


Рисунок 4.14 – Графики переходных процессов влияния вариантов Т цикла при значении постоянной времени $10T_{\text{я}}$

Вывод: Из графиков следует, что лучший вариант Т цикла=10.

Влияние вариантов Тшага на переходные процессы

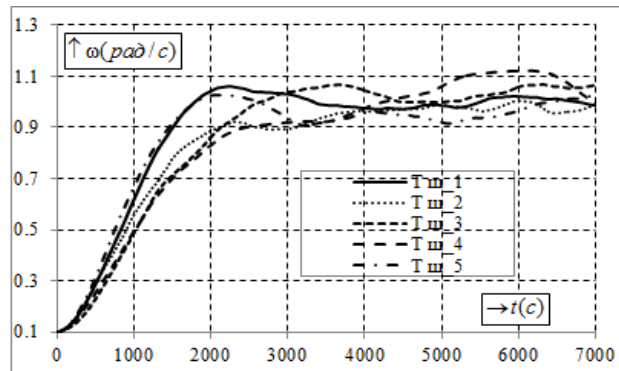


Рисунок 4.15 – Графики переходных процессов влияния вариантов Т шага при исходном значении постоянной времени $T_{я}$

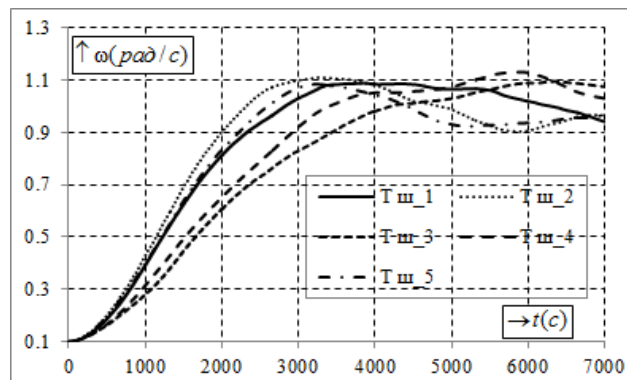


Рисунок 4.16 – Графики переходных процессов влияния вариантов Т шага при значении постоянной времени $5T_{я}$

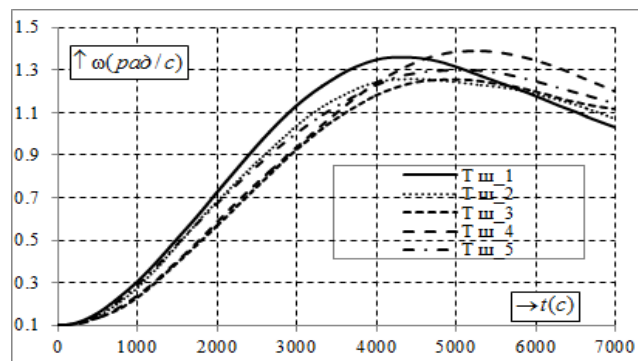


Рисунок 4.17 – Графики переходных процессов влияния вариантов Т шага при значении постоянной времени $10T_{я}$

Вывод: Из графиков следует, что лучший вариант Т шага=5.

4.1.3.4. Влияние вариантов датчика (Sigma2) на переходные процессы

Датчик (условие наблюдателя)

$$z[k] = [1 \ 0 \ 0]x[k] + \mathcal{A}[k],$$

где $\mathcal{A}[k]$, $k=1,2,\dots$ - последовательность некоррелированных центрированных случайных ошибок измерения с дисперсией $\sigma_{\mathcal{A}}^2$.

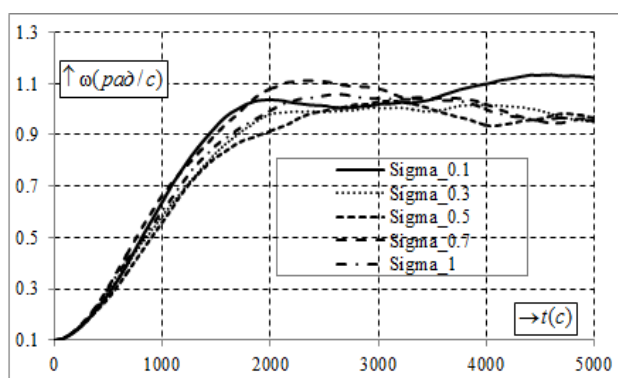


Рисунок 4.18 – Графики переходных процессов влияния вариантов датчика (sigma2) при исходном значении постоянной времени $T_{\text{я}}$

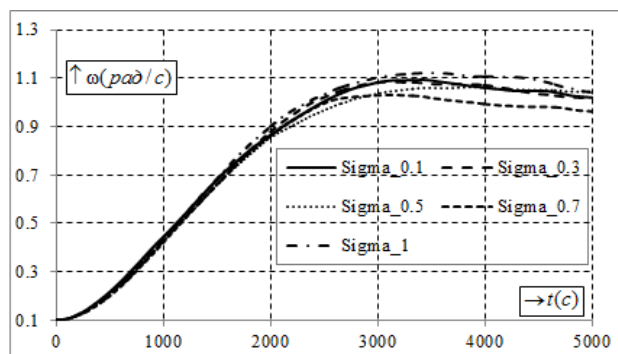


Рисунок 4.19 – Графики переходных процессов влияния вариантов датчика (sigma2) при значении постоянной времени $5T_{\text{я}}$

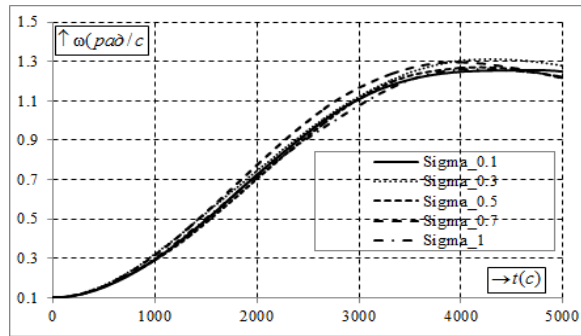


Рисунок 4.20 – Графики переходных процессов влияния вариантов датчика (sigma2) при значении постоянной времени $10T_{я}$

Вывод: Из графиков следует, что влияние вариантов датчика (sigma2) на переходные процессы при различных изменениях постоянных времени незначительно.

4.1.3.5. Влияние вариантов датчика (амплитуды) на переходные процессы

Датчик (условие наблюдателя)

$$z[k] = [1 \ 0 \ 0]x[k] + \mathcal{A}[k],$$

где $\mathcal{A}[k]$, $k=1,2,\dots$ - последовательность некоррелированных центрированных случайных ошибок измерения с дисперсией $\sigma_{\mathcal{A}}^2$.

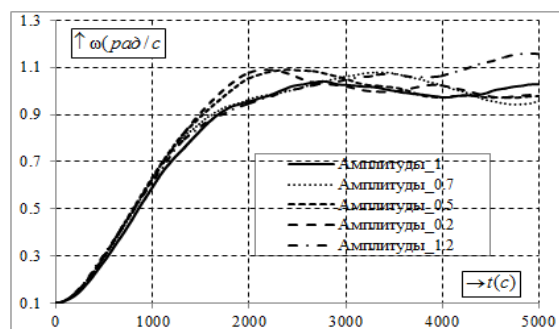


Рисунок 4.21 – Графики переходных процессов влияния вариантов датчика (амплитуды) при исходном значении постоянной времени $T_{я}$

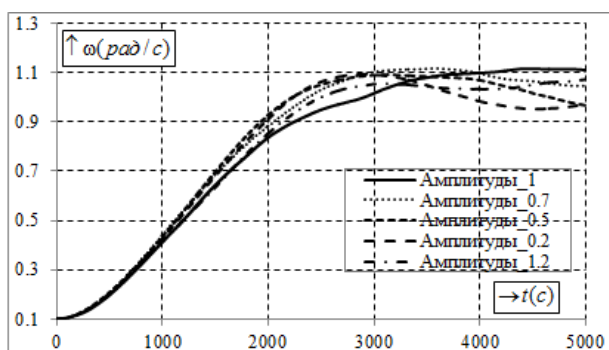


Рисунок 4.22 – Графики переходных процессов влияния вариантов датчика (амплитуды) при значении постоянной времени $5T_y$

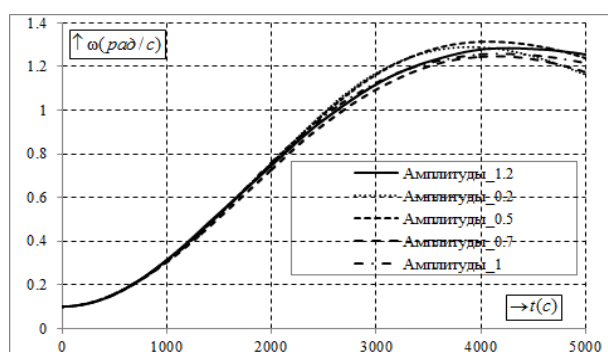


Рисунок 4.23 – Графики переходных процессов влияния вариантов датчика (амплитуды) при значении постоянной времени $10T_y$

Вывод: Из графиков следует, что влияние вариантов датчика (амплитуды) на переходные процессы при различных изменениях постоянных времени также незначительно

4.1.3.6. Влияние вариантов закона распределения на переходные процессы

Уравнение датчик имеет вид

$$z[k] = [1 \ 0 \ 0]x[k] + \mathcal{A}[k],$$

где $\mathcal{A}[k]$, $k=1,2,\dots$ - последовательность некоррелированных центрированных случайных ошибок измерения с дисперсией σ_D^2 .

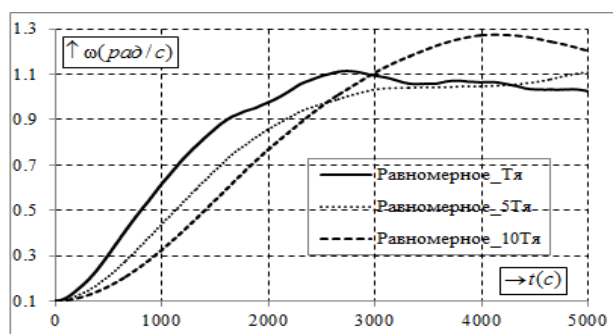


Рисунок 4.24 – Графики переходных процессов влияния равномерного закона распределения датчика при различных значениях постоянной времени T_y , $5T_y$ и $10T_y$

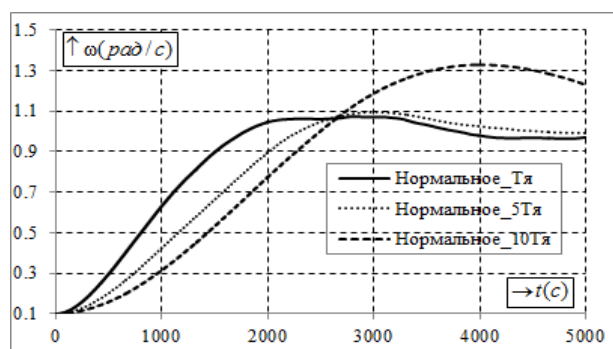


Рисунок 4.25 – Графики переходных процессов влияния нормального закона распределения при различных значениях постоянных времени T_y , $5T_y$ и $10T_y$

Вывод: Из графиков следует, что лучшим вариантом является равномерное распределение.

4.1.3.7. Влияние вариантов коэффициента при U на переходные процессы

Вычисление матричного (векторного) коэффициента усиления:

$$K[k+1] = \frac{1}{P_{11}[k+1|k] + \sigma_D^2} \begin{bmatrix} P_{11}[k+1|k] \\ P_{12}[k+1|k] \\ P_{13}[k+1|k] \end{bmatrix}.$$

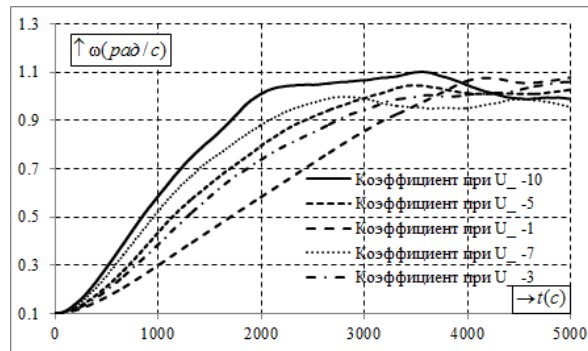


Рисунок 4.26 – Графики переходных процессов влияния вариантов коэффициента U при исходном значении постоянной времени $T_{я}$

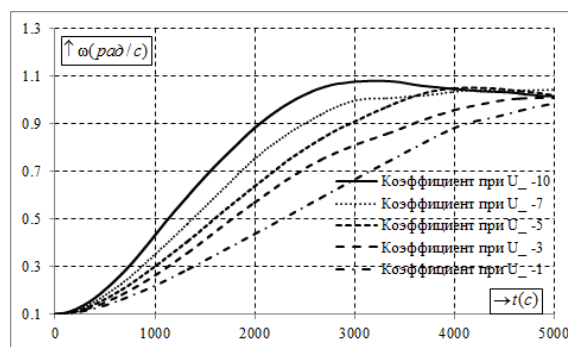


Рисунок 4.27 – Графики переходных процессов влияния вариантов коэффициента U при значении постоянной времени $5T_{я}$

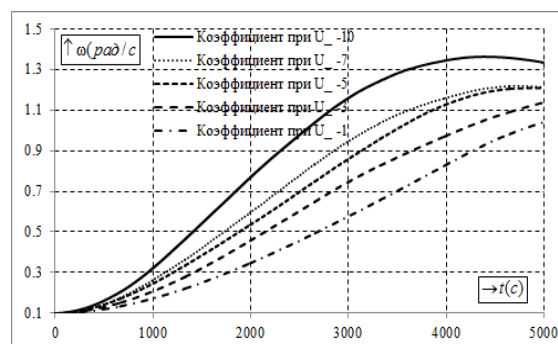


Рисунок 4.28 – Графики переходных процессов влияния вариантов коэффициента U при значении постоянной времени $10T_{я}$

Вывод: Из графиков следует определение значения коэффициента, равное -5, при различных изменения постоянных времени.

4.1.3.8. Влияние вариантов времени экстраполяции на переходные процессы

Экстраполятор (только \hat{x}_1)

В конце цикла значения \hat{x}_1 экстраполируется на один цикл для все $n=2,3,4,\dots$ по формуле

$$\hat{x}_1[\mu_{\text{эк}}] = \hat{x}_1[-0] + \frac{1}{1!} \hat{x}_2[-0] \mu_{\text{эк}} \Delta t_{\text{ш}} + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \hat{x}_n[-0] (\mu_{\text{эк}} \Delta t_{\text{ш}})^{n-1}.$$

Прогнозные значения сигнала рассогласования сравниваются с фактически измеренным сигналом рассогласования в моменты времени $\mu_{\text{эк}}(n) \Delta t_{\text{ш}}$, $n=2,3,\dots,n_m$, формируются минимальные в смысле СКО невязки и осуществляется поиск наименьшей величины нормы невязки $|z - \hat{x}|$ в конце следующего цикла. По результатам наблюдения невязок на одном цикле или ряде циклов выделяется порядок фильтра n , обеспечивающий наименьшую (или достаточно малую) невязку экстраполированного сигнала рассогласования.

Номер n выбранного ММ (порядок математической модели) посылается обратно в блок фильтра и определяет использование выходных сигналов именно этого фильтра на следующем цикле (следующей группе циклов).

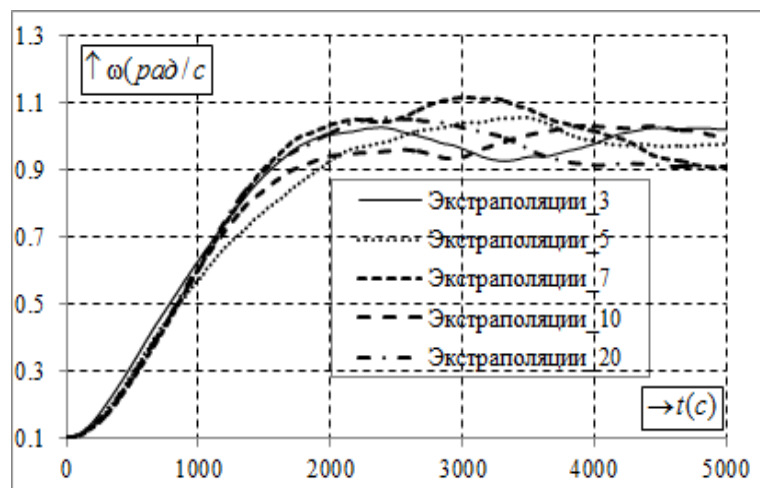


Рисунок 4.29 – Графики переходных процессов влияния вариантов значения времени экстраполяции при исходном значении постоянной времени $T_{\text{я}}$

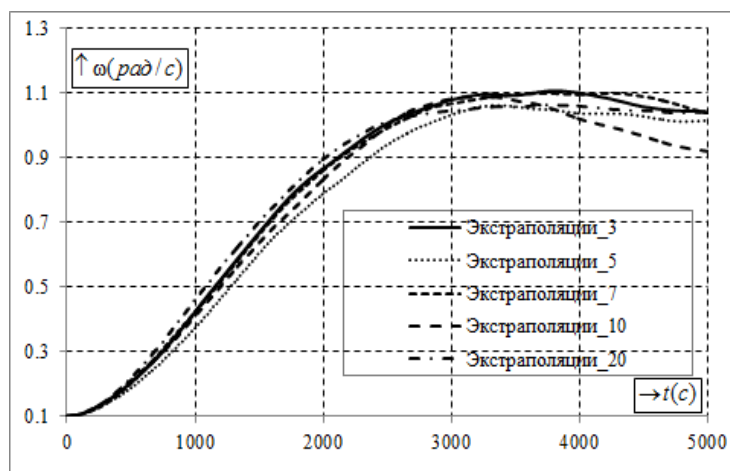


Рисунок 4.30 – Графики переходных процессов влияния значений времени экстраполяции при постоянной времени $5T_{я}$

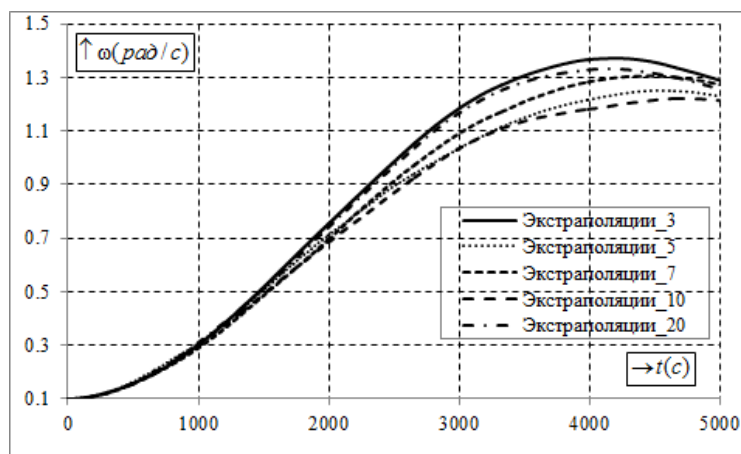


Рисунок 4.31 – Графики переходных процессов влияния значений времени экстраполяции при постоянной времени $10T_{я}$

Вывод: Из графиков следует, какое влияние оказывает этот параметр на переходные процессы при различных изменения постоянных времени $T_{я}$.

На основании выполненного анализа осуществляется установка значений рассмотренных параметров СОРЭ-регулятора.

4.1.4. Имитационное моделирование

После выполненной настройки СОРЭ-регулятора осуществляется имитационное моделирование переходных процессов в адаптивной системе и сравнение с процессами в системе управления ЭП на основе метода подчинённого регулирования.

Результаты имитационного моделирования процессов в этих системах представлены на рис. 4.32.

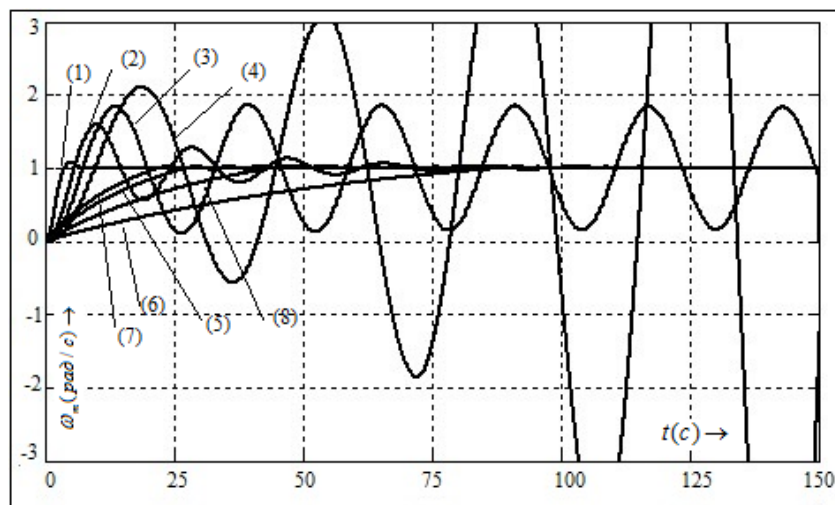


Рисунок 4.32 – Графики переходных процессов двухконтурной скоростной системы управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при отсутствии обратной связи и изменении постоянной времени якоря двигателя $T_{я}$

1)- $T_{я} = 0,043с$, 2)- $T_{я} = 0,215с$, 3)- $T_{я} = 0,43с$, 4)- $T_{я} = 0,86с$ с П регулятором
5)- $T_{я} = 0,043с$, 6)- $T_{я} = 0,215с$, 7)- $T_{я} = 0,43с$, 8)- $T_{я} = 0,86с$ с СОРЭ регулятором

Из данных рис. 4.32. следует, что при наличии параметрических возмущений система с П-регулятором становится неработоспособной, а система с СОРЭ – обеспечивает требуемые показатели качества регулирования. Аналогично выполняется синтез одноконтурной и трёхконтурной (позиционных) систем управления на основе совместного применения принципов самоорганизации и подчинённого регулирования. Приведём структурные схемы систем, математические модели и результаты моделирования. Настройка параметров СОРЭ-регуляторов выполняется также, как показано выше.

4.2. Адаптивная одноконтурная скоростная система управления ЭП

На рис. 4.33. изображена структурная схема одноконтурной **скоростной** системы подчиненного регулирования, где $W_p(s), W_{cp}(s)$ – передаточные функции регуляторов тока и силового регулятора (например, широка-импульсного преобразователя) соответственно [90].

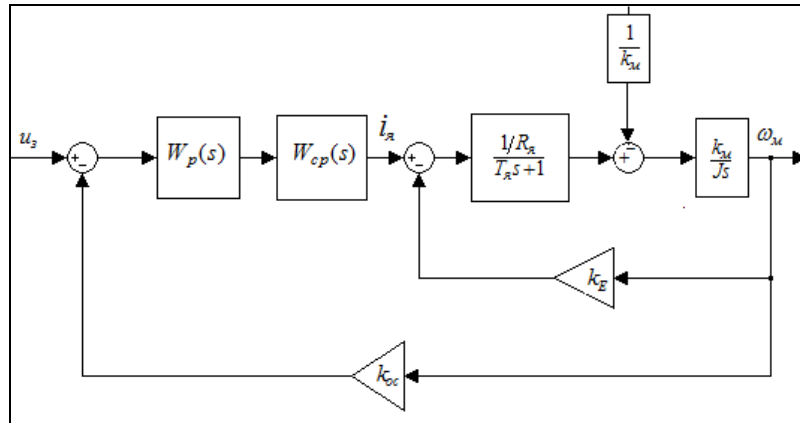


Рисунок 4.33 – Структурная схема **одноконтурной** скоростной системы ДПТ

Где $W_p(s)$ = ПФ регулятора, $W_{cp}(s)$ = ПФ силовой регулятора (в этом случае реверсивный широтно-импульсный преобразователь), R_a = сопротивление якоря, T_a = постоянные времени якоря, k_m = коэффициент момент нагрузки (конструктивные постоянные), k_E = коэффициент постоянным конструктивным, J = момент инерции ротора, k_{oc} = главный коэффициент обратной связи, u_s = задающее значение на входе, ω_m = частота вращения двигателя.

В этом варианте СОРЭ – регулятор устанавливается вместо традиционного регулятора. Структурные схемы систем управления приведены на рисунках 4.34-4.35.

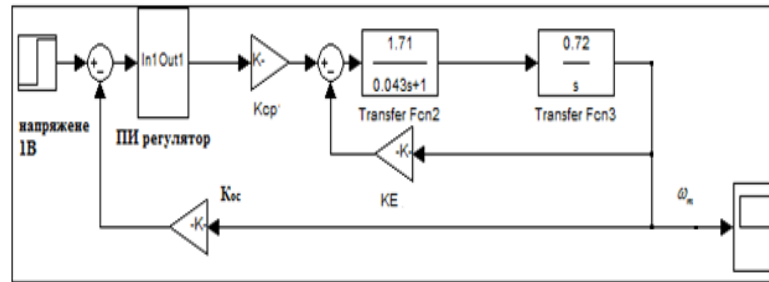


Рисунок 4.34 – Структурная схема одноконтурной скоростной системы управления с ПИ-регулятором

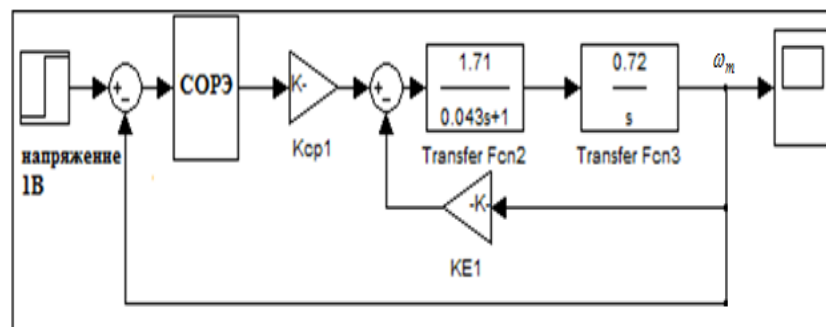


Рисунок 4.35 – Структурная схема одноконтурной скоростной системы управления с COPЭ –регулятором

При отсутствии обратной связи по скорости, $k_E = 0$. Значения матриц A и B следующие.

$$5T_{\text{я}} = 0,215\text{с};$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,7222 & 0 \\ 0 & -4,6512 & 40 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$$10T_{\text{я}} = 0,43\text{с};$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,7222 & 0 \\ 0 & -2,3256 & 40 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$$20T_{\text{я}} = 0,86\text{с};$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,7222 & 0 \\ 0 & -1,1628 & 40 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

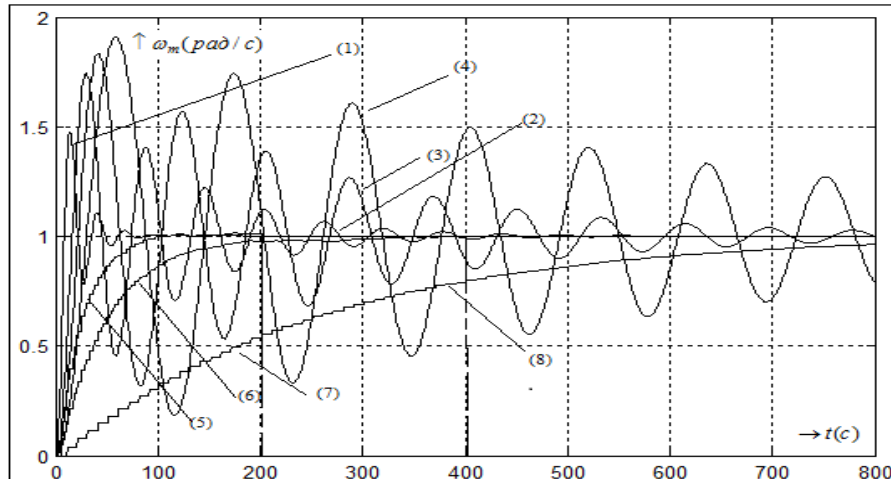


Рисунок 4.36 – Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при отсутствии обратной связи и изменении постоянной времени якоря двигателя (структурно-параметрическая адаптация)

На рис. 4.36. обозначены (1),(2),(3),(4) – кривые переходного процесса в системе с ПИ-регулятором соответственно при $T_{яи}$ исходном, $5T_{яи}$, $10T_{яи}$, $20T_{яи}$ и отсутствии обратной связи, (5),(6),(7),(8) - кривые переходного процесса с СОРЭ-регулятором также соответственно при $T_{яи}$, $5T_{яи}$, $10T_{яи}$, $20T_{яи}$ и отсутствии обратной связи.

Из данных рис. 4.36., следует, что при наличии параметрических и структурных возмущений система с ПИ-регулятором становится неработоспособной, а система с СОРЭ – обеспечивает требуемые показатели качества регулирования.

На рис. 4.37 представлена общая - имитационное моделирование.

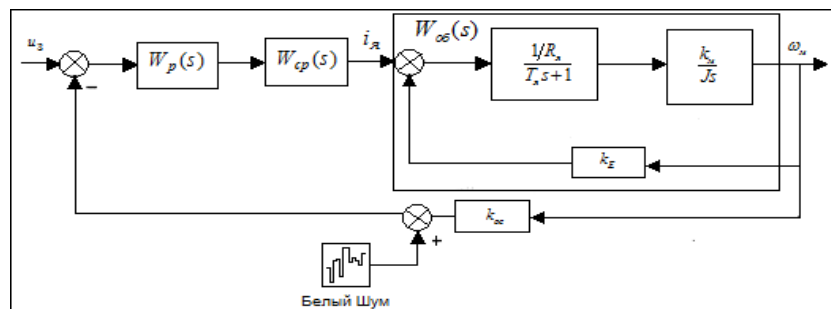


Рисунок 4.37 – Общая структурная схема одноконтурной скоростной системы с помехами типа «белый шум»

Графики переходных процессов приведены соответственно на рисунках 4.38.- 4.40., где обозначения (1) - процесс с ПИ –регулятором, (2) – с СОРЭ.

Из вида графиков следует, что при наличии помех или изменении исходных параметров и наличии помехи, система с ПИ-регулятором становится не работоспособной, а система с СОРЭ обеспечивает требуемые показатели качества регулирования.

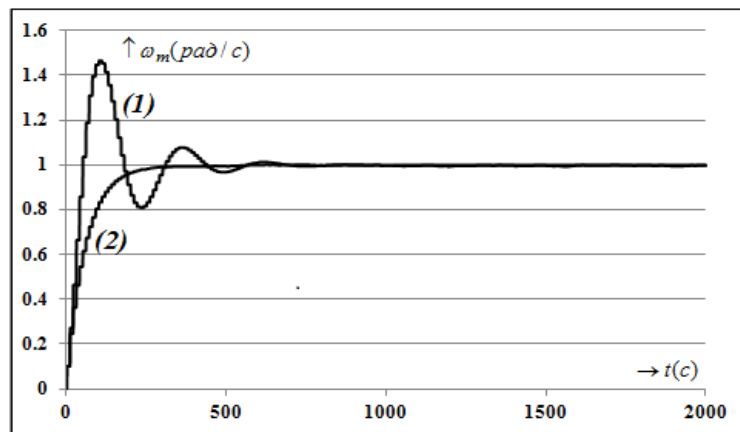


Рисунок 4.38 – Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором без помехи («белый шум») с исходными параметрами

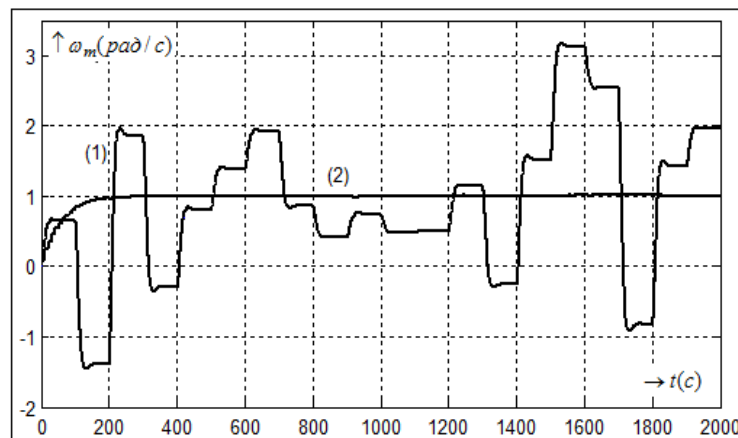


Рисунок 4.39 – Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором с учётом помехи

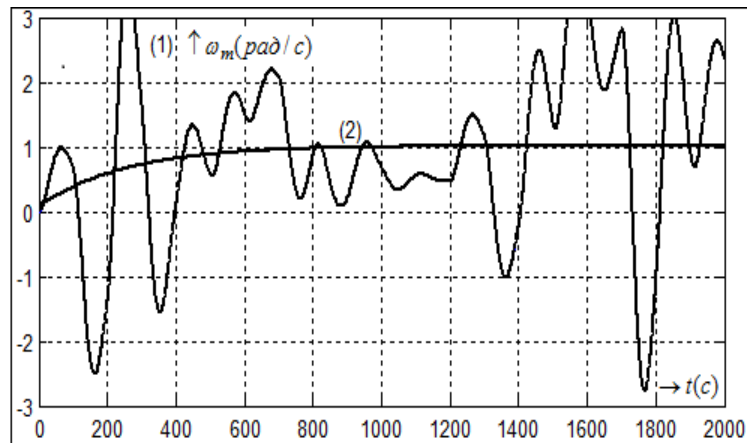


Рисунок 4.40 – Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при изменении исходных параметров (имитация нестационарности) и наличии помехи

Результаты моделирования показывают такие потенциальные возможности автоматизированных на основе принципов самоорганизации электроприводов, которые позволяют их считать электроприводами нового поколения.

4.3. Адаптивная система регулирования положения ЭП

Позиционной системой (ПС) или системой позиционирования называется замкнутая по положению СУЭП, предназначенная для отработки ступенчатых задающих воздействий. Функция ПС - перевод исходно неподвижного исполнительного органа рабочего механизма из некоторого начального положения в заданное конечное с остановкой в конце перемещения. Основными характеристиками ПС являются точность позиционирования, во многом определяемая средствами технической реализации СУЭП, в частности - типом используемого датчика положения ИО, и быстродействие, т.е. продолжительность переходного процесса, которая в значительной степени зависит от принятого закона управления. При анализе и синтезе алгоритмов управления ПС принято различать режимы отработки малых, средних и больших перемещений. В режиме малых перемещений позиционная СУЭП ведет себя практически как линейная, и ни одна из ее координат (сюда можно отнести выходные сигналы регуляторов, ЭДС преобразователя, ток и скорость двигателя) не выходит на ограничение. При

отработке средних перемещений во временной диаграмме ЭП появляются участки ограничения тока якоря в процессах разгона и/или торможения. Для больших перемещений характерно наличие интервала движения ЭП на максимальной (в системе с однозонным регулированием - на номинальной) скорости [4].

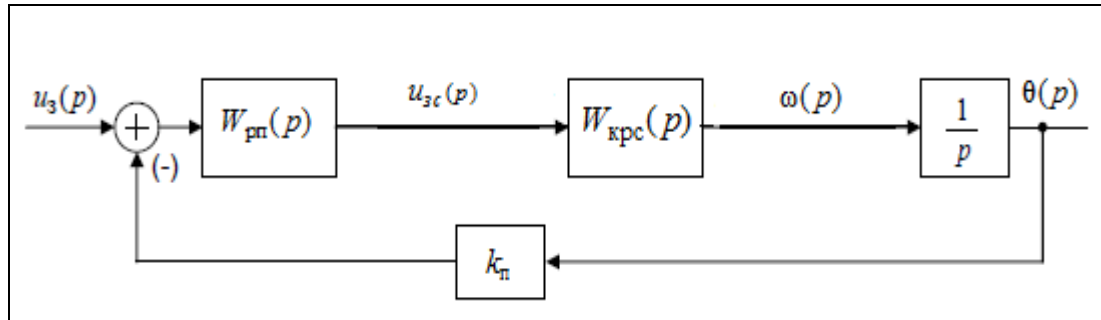


Рисунок 4.41 – Структурная схема контура регулирования положения

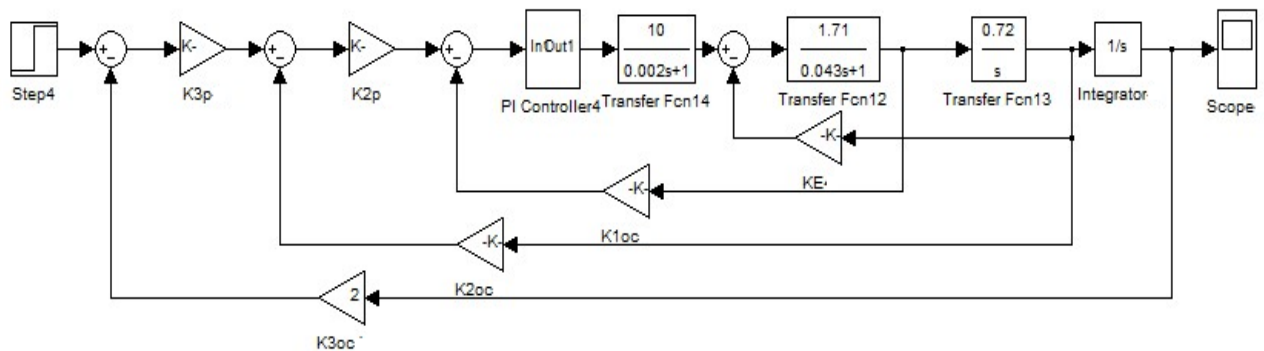


Рисунок 4.42 – Структурная схема трехконтурной системы управления положением

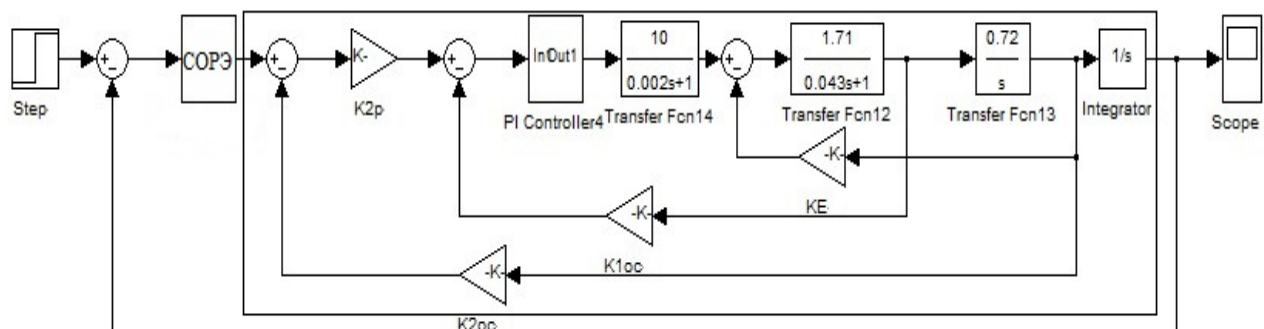


Рисунок 4.43 – Структурная схема трехконтурной системы управления положением

Значения матриц А и В.

Исходное значение $T_{я}$;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 256 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 512 & 0 \\ 0 & -43.26 & -141.2 & -266.6 & -523.3 & 32 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$2T_{я}$;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 256 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 256 & 0 \\ 0 & -43.26 & -141.2 & -266.6 & -511.6 & 32 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$5T_{я}$;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 128 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 256 & 0 \\ 0 & -34,61 & -112,9 & -106,6 & -504,7 & 32 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

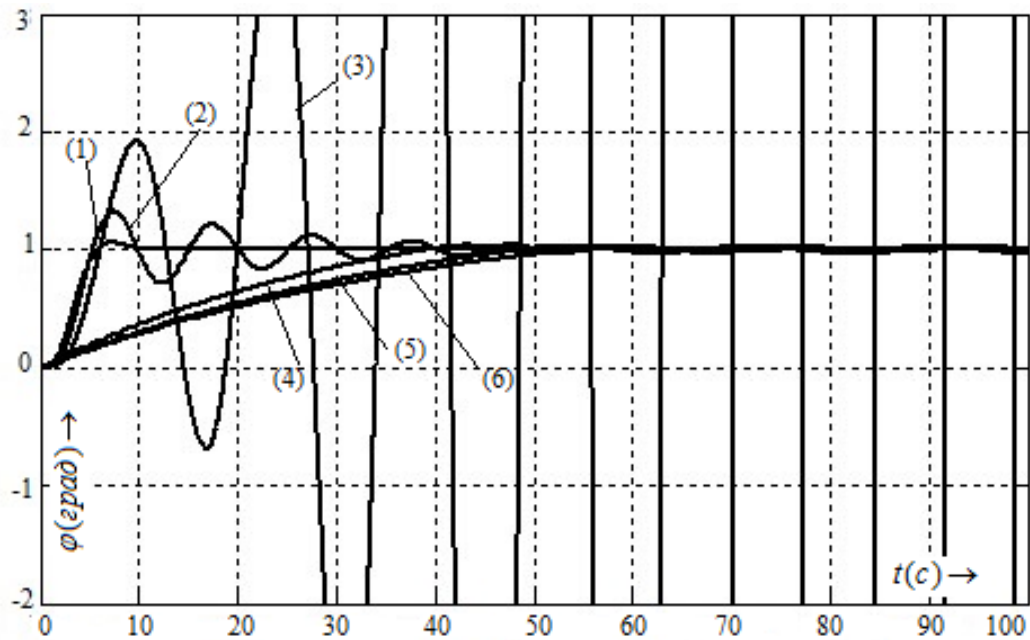


Рисунок 4.44 – График переходных процессов для трехконтурной системы управления углом ЭП при изменении T_y

- 1) – $T_y = 0,043с$, 2) – $T_y = 0,086с$, 3) – $T_y = 0,215с$ с П регулятором
 4) – $T_y = 0,043с$, 5) – $T_y = 0,086с$, 6) – $T_y = 0,215с$ с СОРЭ регулятором

Вывод: переходные процессы в системе с традиционными регуляторами являются или колебательными (1), или неустойчивые. Адаптивная система имеет монотонные переходные процессы.

4.4 Адаптивные многоцелевые с повышенной живучестью системы управления ЭП

Дальнейший прогресс в автоматизации ЭП настоятельно требует разработки новых методов и способов снижения их уязвимости в широком диапазоне изменения специфических условий их эксплуатации. Указанные обстоятельства обуславливают очевидную важность создания нетрадиционных структур автоматизированных ЭП, позволяющих эффективно противостоять возникновению внешних или внутренних поражающих факторов, их одновременного проявления в различных точках пространства, а также возможного воздействия на все или большую часть элементов системы [99,100].

Таким образом, также не менее важной является реализация альтернативных научных исследований, направленных на создание адаптивных многоцелевых систем управления с повышенной живучестью ЭП.

Обратимся к особенностям таких систем. Работоспособность — это состояние технического средства (ТС), при котором оно способно выполнять заданную функцию с параметрами, установленными требованиями технической документации. Надежность, как критерий работоспособности, оценивают вероятностью сохранения работоспособности в течение заданного срока службы. В соответствии с общетехническим определением под живучестью понимается способность технических средств (систем) к сохранению своих основных функций, значений параметров и структуры при воздействии факторов внешней среды и неблагоприятных условий эксплуатации [99,100].

В этом определении следует обратить внимание на следующее. Во-первых, живучесть следует рассматривать как внутреннее свойство системы, которым она обладает независимо от возникающих в данный момент времени условий функционирования. Она обладает им всегда и в определенной мере может проявляться при нормальных условиях функционирования, когда возникают отказы элементов, вызванные производственными дефектами, старением, уходом параметров и др. Во-вторых, живучесть проявляется в том, что система сохраняет не все функции, которые она должна выполнять при нормальной работе, а лишь основные функции, да и то с возможным понижением качества их выполнения. Это означает, что возможно изменение стратегии функционирования системы по мере увеличения тяжести неблагоприятных воздействий. В-третьих, система должна обладать свойством постепенной деградации по мере увеличения тяжести неблагоприятных последствий и для каждого уровня таких последствий уметь оперативно и максимально эффективно использовать сохранившиеся ресурсы для выполнения основных функций с учетом изменения стратегии функционирования (целевой функции), а в дальнейшем реализовать оптимальную стратегию восстановления с учетом

возникающих ограничений.

Автоматизированные ЭП представляют собой комплексы, включающие непосредственно электропривод и его систему управления. В связи с этим облик таких комплексов в значительной мере определяется не только непосредственно электроприводом, так и особенностями его системы правления. Учитывая содержание проблемы повышения работоспособности и живучести, целями многоцелевой СУЭП в рассматриваем случае должно являться не только решение традиционных задач их автоматизации, но и задач обеспечения работоспособности и живучести. Однако нетрудно видеть, что задачи автоматизации ЭП с адаптивной системой управления и задачи обеспечения живучести его практически совпадают. Они заключаются в применении адаптивных систем управления ЭП, обеспечивающих структурно-параметрическую адаптацию. Появляется возможность повышения работоспособности, живучести и безопасности автоматизированного ЭП за счёт использования алгоритмического обеспечения системы управления, основанного на принципах самоорганизации. Однако настройка СОРЭ-регулятора при одновременном решении этих задач существенно изменяется [97]. Отметим, что ранее в работе не акцентировалось внимание на связи возмущающих воздействий и видов адаптации, которые должны быть обеспечены в системе.

В качестве примера рассмотрим применение разработанного подхода для построения адаптивной многоцелевой с повышенной живучестью системы управления судном как объектом его движения по курсу (авторулевого) и выясним ее отличие от адаптивной системы управления, приведенной в работе [101], где разработано алгоритмическое обеспечение, реализующее только адаптацию при параметрических и структурных возмущениях. Рассматривались 2 варианта систем – с традиционным ПИ- регулятором и СОРЭ-регулятором рулевого электропривода при учете различных параметрических и структурных возмущений. В качестве параметрических возмущений были приняты изменения постоянной времени судна при 3-х режимах движения, а в качестве структурных

возмущений – отсутствие обратной связи рулевого электропривода. Графики переходных процессов реакции систем с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором на эти возмущения приведены рис. 4.45 – 4.46.

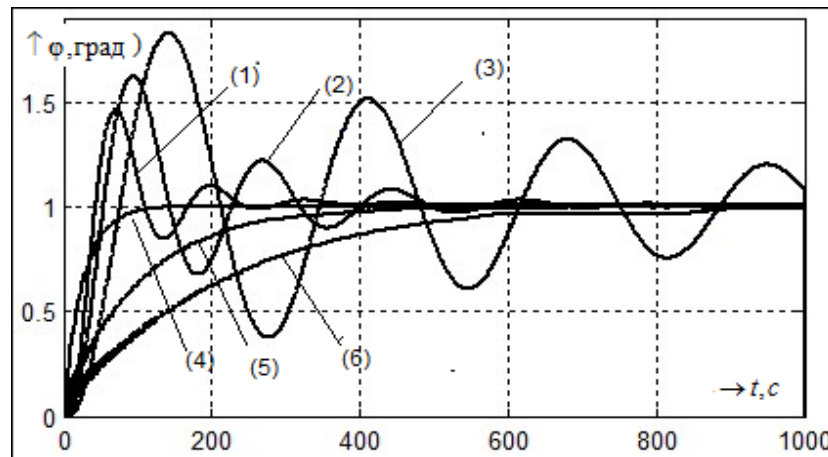


Рисунок 4.45 – Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при изменении постоянной времени судна: 1–3 – кривые переходного процесса в системе с ПИ-регулятором при постоянной времени судна 12с, 22с, 57с соответственно; 4–6 – кривые переходного процесса в системе с СОРЭ-регулятором при указанных постоянных времени (параметрическая адаптация) соответственно.

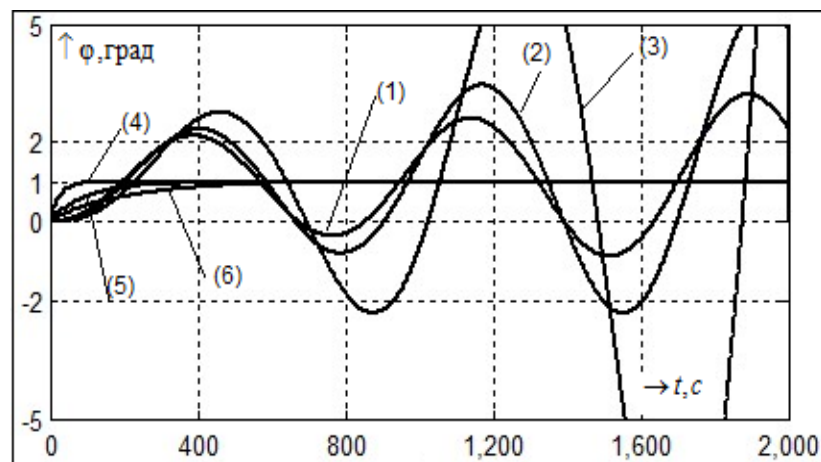


Рисунок 4.46 – Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при отсутствии обратной связи и изменении постоянной времени: 1–3 – кривые переходного процесса в системе с ПИ-регулятором при постоянной времени судна 12с, 22с, 57с

соответственно; 4–6 – кривые переходного процесса в системе с СОРЭ-регулятором при указанных постоянных времени (структурно параметрическая адаптация) соответственно.

Из видов графиков было сделано заключение, что при наличии параметрических и структурных возмущений система с ПИ-регулятором становится неработоспособной, а система с СОРЭ обеспечивает требуемые показатели качества регулирования. Этот вывод был достаточно общим и касался только адаптивных свойств системы управления. При этом не уточнялись более основные аспекты работоспособности автоматизированного электропривода (АЭП), такие как вид переходных процессов, требуемые показатели качества регулирования, влияние изменения вида настройки алгоритмического обеспечения СОРЭ, приведенной в работе [101].

Таким образом, целями многоцелевой СУЭП в рассматриваем случае должно являться не только решение традиционных задач их автоматизации, но и задач обеспечения работоспособности и живучести. Одновременное решение задач возможно только при использовании адаптивных алгоритмов управления, реализующих не только параметрическую, но и структурно – параметрическую адаптацию системы.

4.5. Выводы по главе 4

Таким образом, разработаны алгоритмическое обеспечение, методики синтеза и моделирования конкретных адаптивных систем управления электроприводами, отличающихся наличием структурно–параметрической адаптации и расширенным кругом решаемых задач при неопределённых внутренних и внешних возмущениях. Предложена концепция создания адаптивных многоцелевых СУ электроприводами, отличающихся как наличием структурно–параметрической адаптации, так и повышенной живучестью. При внедрении разработанных систем управления необходимо учитывать, что для модернизации многочисленных автоматизированных ЭП с микропроцессорными системами управления, построенными на основе принципа подчинённого регулирования, требуется только замена программного обеспечения. Совершенствование автоматизированных электроприводов путём использования разработанных нового типа адаптивных систем управления вместо существующих приведёт к существующему повышению их эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической проблемы совершенствования автоматизированных электроприводов путём использования разработанных нового типа адаптивных систем управления. Эти системы управления ЭП построены на основе совместного применения принципов подчинённого регулирования и самоорганизации и отличаются наличием структурно–параметрической адаптации, а также расширенным кругом решаемых задач при неопределённых внутренних и внешних возмущениях.

К основным результатам работы можно отнести следующее:

1. Обоснован общий подход к разработке автоматизированных электроприводов с новыми возможностями систем управления по самоорганизации алгоритмов и расширению круга решаемых задач;
2. Установлены особенности автоматизированных электроприводов как объектов управления и определены современные задачи их автоматизации;
3. Предложены современные технологии алгоритмического обеспечения разрабатываемых адаптивных систем управления;
4. Выявлены свойства систем управления ЭП, построенных отдельно как путём применения принципа подчинённого регулирования, так и самоорганизации, на основе которых возможно их совместное применение и развитие;
5. Разработаны алгоритмическое обеспечение, методики синтеза, и моделирования адаптивных систем управления электроприводами, отличающихся наличием структурно–параметрической адаптации и расширенным кругом решаемых задач при неопределённых внутренних и внешних возмущениях;

6. Предложена концепция создания адаптивных многоцелевых СУ электроприводами, отличающихся как наличием структурно–параметрической адаптации, так и повышенной живучестью;

7. Разработаны конкретные адаптивные многоцелевые СУ электроприводами - одноконтурная и двухконтурной скоростная система управления ЭП, система регулирования положения ЭП с новыми характеристиками и эффективностью.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АИТО – алгоритм идентификации, основанный на теории оценивания

АКОР – аналитическое конструирование оптимальных регуляторов

АОСАУ – адаптивная оптимальная система автоматического управления

АР – адаптивный регулятор

АСУ автоматическая система управления

АЭП – автоматизированный электропривод

БАУ – блок адаптивного управления

БОИ – блок обработки информации

БППР – блок перестройки регулятора

БЦВС – бортовая цифровая вычислительная система

ДОС – система датчиков обратных связей

ИО – исполнительный (рабочий) орган

ИОМ – исполнительный орган рабочей машины (механизма)

КЗА – коммутационная и защитная аппаратура

ММ – математическая модель

МО – модульный оптимум

МПУ – механическое преобразовательное (передаточное) устройство

МС – механическая система

ОУ – объект управления

ПР – подчинённое регулирование

ПФ – передаточная функция

САР – система автоматического регулирования

СИВ – система измерения возмущений

СО – симметричный оптимум

СОА – самоорганизующийся адаптивный алгоритм

СОРП – самонастраивающийся оптимальный регулятор с прогнозированием

СОРЭ – самоорганизующийся оптимальный регулятор с экстраполяцией

СПР – система подчинённого регулирования

СТАУ – современная теория автоматического управления

СУ – система управления

СУП – силовой управляемый преобразователь электрической энергии

ТАР – теория автоматического регулирования

ТАУ – теория автоматического управления

УУ – управляющее устройство

ФКБ – фильтр Калмана-Бьюси

ФОР – функционал обобщенной работы

ЭД – электрический двигатель

ЭП – электропривод

ЭС – электрическая система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юньков, М. Г. Всесоюзные (Всероссийские) научнотехнические конференции по автоматизированному электроприводу (к 80-летию конференций по электроприводу) / М. Г. Юньков // Журнал: Известия Тульского государственного университета «Технические науки», – Выпуск № 3–5. – 2010. – С. 5–9.
2. Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-212 – Иваново: Изд-во Ивановского государственного энергетического университета, 2012. – 708с.
3. Онищенко, Г.Б. Теория электропривода: Учебник / Г.Б. Онищенко. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 294с.
4. Панкратов, В.В. Автоматическое управление электроприводами / В.В. Панкратов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200с.
5. Буков, В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / В.Н. Буков. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.
6. Луценко, Е. В. Автоматизированный системно-когнитивный анализ в управлении активными объектами: Монография (научное издание) / Е. В. Луценко. – Краснодар: КубГАУ, 2002. – 605 с.
7. Туркин, И.И. Системы управления нового поколения НПО АМТ / И.И. Туркин, Э.Б. Быков // Журнал морской бизнес, – № 4 май, – 2006.
8. Ключев, В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов / В.И. Ключев, В.М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360с.
9. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
10. Юкаева, В.С. Управленческие решения: Учебное пособие / В.С. Юкаева. – М.: Дашков И К, 1999. – 292 с.

11. Смирнов, Э.А. Разработка управленческих решений: Учебник для ВУЗов / Э.А. Смирнов. – М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2002. – 271с.
12. Литвак, Б.Г. Разработка управленческого решения: Учебник. 4-е изд. / Б.Г. Литвак. – М.: Дело, 2003, – 248с.
13. Башарин, А.В. Примеры расчетов автоматизированного электропривода: Издание 2 / А.В. Башарин. – М.. 1972. – 440с.
14. Борцов, Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями: 2-е изд., перед. раб. и доп. / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288с.
15. Туркин, И.И. Активное управление объектами морской энергетики / И.И. Туркин // Материалы Всероссийской межотраслевой научно–технической конференции: «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ. – 2012. С. 37–40.
16. Цыпкин, ЯЗ. Адаптация и обучение в автоматических системах / ЯЗ Цыпкин. – М.: Наука, 1968. – 400с.
17. Красовский, А.А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем / А.А. Красовский. – М.: Физматгиз. 1963.
18. Анохин, П.К. Избранные труды: Кибернетика функциональных систем / П.К. Анохин. Под ред. К.В. Судакова. Сост. В.А. Макаров. – М.: Медицина, 1998. – 400 с.
19. Терехов, В.М. Система управления электроприводами: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.М. Терехов., О.И. Осипов. – М.: Издательский центр: Академия. 2005. – 275с.
20. Бесекерский, В. А. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Поповый: Под ред. В. А. Бесекерского – изд-во «Наука», – изд. 4-е, 1972. – 743с.
21. Булатов, И.А. Адаптивное управление электроприводом / И.А. Булатов, А.В. Романов, Ю.М. Фролов // Электротехника, № 3. – 1997. С. 17 – 21.

22. Справочник по теории автоматического управления/ под ред. Красовского А.А. – М.:Наука, 1987. – 713с.
23. Воронов, А.А. Теория автоматического управления /А.А. Воронов. – Часть 2, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. , 1986. – 504с.
24. Красовский, А.А. Универсальные алгоритмы управления непрерывными процессами / А.А. Красовский, В.Н. Буков, В.С. Шендрик. – М.: Наука, 1977. – 272 с.
25. Червоный, А. А. Надежность сложных систем / А. А. Червоный, В.И. Лукьященко, Л. В. Котин. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
26. Терехов, В.М. Система управления электроприводами: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Издательский центр: Академия. 2005. – 275с.
27. Громов, Ю.Ю. Основы теории управления : учеб. пособие / Ю.Ю. Громов, В.О. Драчёв, О.Г. Иванова, Ю.С. Сербулов, К.А. Набатов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 240 с.
28. Клишин, А.Н. Особенности применения алгоритма с прогнозирующей моделью при адаптивном оптимальном управлении / А.Н. Клишин, А.В. Платунова // Молодежный научно-технический вестник, 2015.
29. Феодосеев, А.С. Алгоритм оптимального управления с обобщенной прогнозирующей моделью / А.С. Феодосеев // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 7. С.16–21.
30. The 17th Convention of electrical & electronics engineers in Israel. Proceedings. 1991 Kfar Hamaccabian, Ramat Gan. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1991.
31. Мисриханов, М.Ш. Синтез по критерию обобщенной работы группового регулятора мощности многоагрегатной ГЭС / М.Ш. Мисриханов // Махачкала: ДагФАН СССР, 1981.
32. Воронов, А.А., Рутковский, В.Ю. Современное состояние и перспективы развития адаптивных систем: Вопросы кибернетики. Проблемы теории и

практики адаптивного управления / А.А. Воронов, В.Ю. Рутковский – М.: Научный Совет АН СССР по комплексной проблеме “Кибернетика”, – 1985. С. 5-48.

33. Мисриханов, М.Ш. Фундаментальные теоретические и прикладные работы академика А.А. Красовского основа для форсированного возрождения энергетики при отечественном инвестировании / М.Ш. Мисриханов // АиТ. – 2001. – № 7. С. 158-177.

34. Красовский, А.А. Избранные труды: Теоретическая и прикладная теория управления: Последние проекты и открытия / А.А. Красовский. – М.: Мысль. 2001.

35. Красовский, А.А. Избранные труды: Самые ранние самые новые / А.А. Красовский. – М.: Наука, 2003.

36. Саридис, Д'Ж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления: Перевод с англ. Под ред. Я.З Цыпкипа. – М.: Наука, 1980.

37. Красовский, А.А. Избранные труды: Самые разные – самые новые / А.А. Красовский. – Изд. Наука, 2003. – 614с.

38. Красовский, А.А. Развитие концепции, аналитическая теория, алгоритмическое обеспечение двухконтурного самоорганизующегося регулятора / А.А. Красовский // Изв. АН. Т и СУ. – 1999. – № 4.

39. Мисриханов, М.Ш., Матвеев, В.А. и др. Совместная работа системы ГРАМ с устройствами противоаварийной автоматики / М.Ш. Мисриханов // Электрические станции. – № 1. – М.: Энергоатом- издат. – 1993. С. 56–57.

40. Красовский, А.А., Мисриханов, М.Ш. Основы теории и техники создания гидро- и ветроэнергетических установок нового класса / А.А. Красовский // – М.: Энергоатомиздат, 1995.

41. Александровский, Н.М., Егоров, С.В., Кузин, Р.Е. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами / Н.М. Александровский – М.: Энергия. 1973.

42. Мисриханов, М.Ш. Синтез по критерию обобщенной работы автоматической системы адаптивного управления частоты и активной мощности в энергосистеме / М.Ш. Мисриханов. – Махачкала: Даг. ЦНТИ, 1980.
43. Мисриханов, М.Ш. Аналитическое конструирование комплексной системы адаптивного управления мощностью и возбуждением гидроагрегата по критерию обобщенной работы / М.Ш. Мисриханов // – Махачкала: Даг. ЦНТИ, 1979.
44. Красовский, А.А., Мисриханов, М.Ш. Универсальные алгоритмы оптимального оперативного управления гидроэнергетическими комплексами / А.А. Красовский. – Махачкала: Дагестан, кп. изд-во, 1978.
45. Красовский, А.А., Мисриханов М.Ш. Самоорганизующиеся регуляторы с экстраполяцией для энергетических объектов. История и перспективы / А.А. Красовский, М.Ш. Мисриханов //А и Т. – 2006. – № 5. С. 48–53.
46. Гайдук, А.Р. Алгоритмическое обеспечение самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией / А.Р. Гайдук // Изв. АН. ТиСУ. – 2002. – № 3.
47. Гайдук, А.Р. Непрерывные и дискретные динамические системы / А.Р. Гайдук – М.: УМ и ИЦ «Учебная литература», 2004.
48. Гайдук, А.Р. Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы / А.Р. Гайдук // – Жордана: А и Т. – 2006. – № 7. С. 3–13.
49. Гайдук, А.Р., Мисриханов, М.Ш., Рябченко, В.Н., Идентификация математической модели энергосистемы и синтез управления на основе самоорганизующихся алгоритмов / А.Р. Гайдук, М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко //Вестник ИГЭУ, Выпуск № 6, – 2005. – С 176–198.
50. Туркин, И.И. Самоорганизующиеся системы управления сложных технических объектов./ И.И. Туркин, Э.Б. Быков // Индустрия. № 1. – 2005. С.2–3.
51. Красовский, А. А. Проблемы качественной и аналитической теории оптимального управления /А.А. Красовский // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1991. № 6. С. 3-9.

52. Красовский, А.А. Оптимальное управление с адаптацией времени экстраполяции / А.А. Красовский // *АиТ*. 1993. №2. С. 148-157.
53. Красовский, А. А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменным порядком наблюдателя и временем экстраполяции / А.А. Красовский // *АиТ*. 1994. №. 11. С. 97-112.
54. Красовский, А. А. Адаптивные полиномиальные наблюдатели и идентификация в критических режимах / А.А. Красовский // *АиТ*. 1996. №10. С. 142-155.
55. Красовский, А. А. Неклассические целевые функционалы и проблемы теории оптимального управления / А.А. Красовский // *Изв. РАН. Техн. кибернетика*. 1992. №1. С. 3-41.
56. Красовский, А. А. Основы теории авиационных тренажеров / А.А. Красовский. – М.: Машиностроение, 1995.
57. Шрейнер, Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов / Р.Т. Шрейнер. Екатеринбург: РГППУ, 2008. 279 с.
58. Соловьев, В. А. Система управления электроприводами: Учебное пособие / В. А. Соловьев, С. А. Васильченко. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2009. – Ч. 1 – 2.
59. Воронин, С. Г. Электропривод летательных аппаратов: Конспект лекций / С. Г. Воронин. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – Ч.1. – 171с.
60. Слежановский, О.В. Системы подчинённого регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др.– М: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
61. Пахомов, А. Н., Кривенков, М. В. Электрический привод: Учебное пособие / А. Н. Пахомов, М. В. Кривенков. – Красноярск, СФУ, 2008. – 293с.
62. Елисеев, В.А. Справочник по автоматизированному электроприводу / В.А. Елисеев. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 616с.

63. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода: Учебник / В.В. Москаленко. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 206с.
64. Большам, Я.М. Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных приборов: Издание 2 / Я.М. Большам. – М.: Энергия, 1975. – 728с.
65. Астрахан, В.Д. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами: Под редакцией В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Сомова. / В.Д. Астрахан. – М.: Энергоиздат, 1982. – 418с.
66. Корытин, А.М. Автоматизация типовых технологических процессов и промышленных установок: Учебное пособие для вузов / А. М. Корытин и др.. – Киев; Одесса: Вища шк., 1980. – 376с.
67. Зимин, Е.Н. Автоматическое управление электроприводами: Учебное пособие / Е.Н. Зимин. – М.: Высшая школа, 1979. – 320с.
68. Коновалов, Л.И. Элементы и системы электроавтоматики: Учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по спец. «Автоматизация и комплексная механизация химико-технолог. процессов» / Л. И. Коновалов, Д. П. Петелин . – М.: Высш. шк., 1985. – 216с.
69. Ковалёв, Ф.И. Полупроводниковые выпрямители / Ф.И. Ковалёв. М.: Энергия, 1978. – 448с.
70. Новиков, В.А. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации: учебное пособие: Под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова / Белов М.П., Зементов О.И., Козярук А.Е., и др. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 388с.
71. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода: Учебное пособие / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – Энергоиздат, 1981. – 576с.
72. Иванов, Г.М. Автоматизированный электропривод в химической промышленности / Г.М. Иванов, Г.Б. Онищенко. – М.: Машиностроение, 1975. – 312с.

73. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. – Рассудов Издательство: Академия, 2007. – 576с.
74. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин. – Энергоиздат, 1981. – 576с.
75. Борцов, Ю.А. Тиристорные системы электропривода с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергия, 1979. – 160с.
76. Капунцов, Ю.Д. Электрооборудование и электропривод промышленных установок: Учебник для вузов / Ю. Д. Капунцов, В. А. Елисеев, Л. А. Ильяшенко; ред. М. М. Соколов. – М.: Высшая школа, 1979. – 360с.
77. Kessler C. Ein Beitrag zur Theorie mehrschleifiger Regelungen // Regelungstechnik. – B.8. – 1960. – H.8. – S. 261 – 266.
78. Kessler C. Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. Teil III: Die optimale Einstellung des Reglers nach dem Betragsoptimum // Regelungstechnik. – B.3. – 1955. – H.2. – S. 40 – 49.
79. Панкратов, В.В. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами: учеб. пособие / В.В. Панкратов, Е.А. Зима. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2005.
80. Панкратов, В.В. Избранные разделы теории автоматического управления: учеб. пособие / В.В. Панкратов, О.В. Нос, Е.А. Зима. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2011.
81. Ковчин, С.А. Теория электропривода: учеб. для вузов / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 1994.
82. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
83. Ключев, В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В.И. Ключев. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2001.

84. Мин Хеин. Адаптивная, с высоким уровнем искусственного интеллекта, система управления судовым электроприводом / Мин Хеин // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2016. № 2. С. 95–101.
85. Туркин, И. И. Быков Э. Б. Самоорганизующиеся системы управления сложных технических объектов / И.И. Туркин // Индустрия. 2005. – № 1. С. 2–3.
86. Туркин, И. И. Самоорганизующиеся системы управления сложными судовыми техническими средствами / И.И. Туркин // Морские интеллектуальные технологии. – 2008. – № 1. С. 66–68.
87. Туркин, И. И. Экспериментальная проверка работоспособности и эффективности адаптивной на принципах самоорганизации системы автоматического управления / И.И. Туркин, С.Н. Кирюхин // Материалы 23-й межвуз. науч.-техн. конф. «Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы» (Петродворец, 13–14 марта 2012 г.). СПб: – 2012. Ч. 3. С. 209–215.
88. Kessler C. Das Symmetrische Optimum. Teil I // Regelungstechnik. – В.6. – 1958. – Н.11. – S. 395 – 400.
89. Kessler C. Das Symmetrische Optimum. Teil II // Regelungstechnik. – В.6. – 1958. – Н.12. – S. 432 – 436.
90. Герман-Галкин, С.Г. Проектирование мехатронных систем на ПК., Matlab & Simulink / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368с.
91. Борцов, Ю.А. Алгоритмы управления нестационарными нелинейными объектами непрерывными динамическими объектами с эталонной моделью / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов // Вопросы кибернетики. Проблемы теории и практики адаптивного управления: Сб. статей. – М.: Научный совет по кибернетике АН СССР, – 1985. С. 82-94.
92. Борцов, Ю.А. Адаптивное управление в автоматизированных электроприводах с упругими и нестационарными свойствами / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов // Тез. докл. Всесоюзн. симпозиума по автоматиз. и МГД-электроприводу, сент. – 1981, Таллинн. С. 13-14.

93. Путов, В.В. Адаптивное управление динамическими объектами: беспоисковые системы с моделями: Учеб. Пособие / В.В. Путов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2001. – 91с.

94. Поляхов, Н.Д. Интеллектуальные системы управления: Учеб. пособие. / Н.Д. Поляхов, И.А., Приходько, В.Е. Кузнецов, О.Э. Якупов. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 72с.

95. Путов, В.В. Адаптивные и модальные системы управления многомассовыми нелинейными упругими механическими объектами / В.В. Путов, В.Н. Шелудько. СПб: Изд-во «Элмор», 2007. – 243с.

96. Путов, В.В. Семейство аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления нелинейными упругими электромеханическими объектами / В.В. Путов, В.Н. Шелудько // СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2007, – №10. С. 16–24.

97. Кузнецов, В.Е. Исследование и улучшение динамических характеристик электрогидравлических рулевых систем с помощью адаптивных регуляторов с эталонной моделью / В.Е. Кузнецов, Н.Д. Поляхов, Д.М. Филатов, Чжан Ян // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, – 2012, – №5. С. 74–81.

98. Березин, С.Я. Системы автоматического управления движением судов по курсу: Издательство «судостроение» / С.Я. Березин, Б.А. Тетюев. – Ленинград 1974. – 264с.

99. Волик, Б.Г. Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем / Б.Г., Волик, И.А. Рябинин // Автоматика и телемеханика. – 1984. – №12. С. 151–160.

100. Черкесов, Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем / Г.Н. Черкесов // – М.: Знание, – 1987. С. 1–9.

101. Мин Хеин. Методы применения адаптивных систем автоматического управления с высоким уровнем искусственного интеллекта для совершенствования сложных объектов морской инфраструктуры / Мин Хеин // МОРИНТЕХ. – № 2 (32) том 1. – 2016. С. 69–75.