

05.09.12

Д 814

На правах рукописи



Дудкин Максим Михайлович

**ИНТЕГРИРУЮЩИЕ ФАЗОСДВИГАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ВЕНТИЛЬНЫМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2007

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Цытович Леонид Игнатьевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Осипов Олег Иванович;
доктор технических наук, профессор
Сарваров Анвар Сабулханович.

Ведущая организация – Уфимский государственный авиационный
технический университет, г. Уфа.

Защита состоится «__» мая 2007 г., в ____ часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: (351) 267-96-90, E-mail: tsli@susu.ac.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

Актуальность темы. Неотъемлемой частью современных систем автоматического управления электроприводами и технологической автоматикой являются регулируемые вентильные преобразователи (ВП) (тиристорные выпрямители, транзисторные преобразователи частоты, широтно-импульсные преобразователи постоянного тока и т.д.), с помощью которых осуществляется плавное регулирование выходных координат исполнительных механизмов.

Рост уровня мощности силовой части электрооборудования и чувствительности элементов вентильных электроприводов (ВЭП) в области «малых» сигналов способствовали резкому увеличению влияния помех в схемах автоматизированного электропривода и промышленной автоматики. Сигналы помех оказались соизмеримыми с сигналами управления и стали приводить как к искажению статических и динамических характеристик систем автоматического управления, так и к их полной неработоспособности.

Проблема помехоустойчивости и электромагнитной совместимости ВЭП была и остается одной из самых сложных в техническом плане задач, требующих своего комплексного решения. Специфической особенностью ВЭП является то, что генераторами помех зачастую выступают сами элементы систем управления, работающие в дискретном (импульсном) режиме, формирующие высокочастотные гармоники, которые проникают в информационные каналы через паразитные емкостные и индуктивные связи между кабельными коммуникациями. Применение пассивных методов борьбы с сигналами помех (экранирование, скрутка проводов и пр.) не всегда оказываются эффективными в силу меняющихся по мере развития производственных мощностей параметров электромагнитной обстановки на технологических объектах. Использование стационарных пассивных или активных фильтров также зачастую не приводит к желаемому результату ввиду того, что заранее достаточно проблематично предсказать возможные пути проникновения помех в каналы связи и, следовательно, установить фильтры в оптимальных для их подавления точках систем ВЭП. За последнее десятилетие данная проблема обострилась ввиду массового внедрения на предприятиях преобразователей частоты для электроприводов переменного тока, работающих в режиме широтно-импульсной модуляции с несущей частотой от единиц до десятков килогерц. Это привело к росту удельного веса высокочастотного спектра помех, наводимых на элементы систем ВЭП, что затрудняет борьбу с ними традиционными методами пассивной и активной фильтрации.

Одним из наиболее чувствительных к сигналам помех элементов систем управления ВП являются фазосдвигающие устройства (ФСУ). Несмотря на значительное развитие силовой преобразовательной техники, современные аналоговые и цифровые системы управления вентильными преобразователями в большинстве своем строятся с ФСУ «вертикального» типа, которые оставляют желать много лучшего в плане метрологических характеристик и помехоустойчивости ввиду разомкнутого характера своей структуры.

Широко известно, что одним из наиболее эффективных способов повышения помехоустойчивости и уровня метрологических характеристик элементов систем автоматики и измерительной техники являются методы интегрирующего разvertyвающего преобразования. Данной проблеме посвящены работы Темникова Ф.Е., Смолова В.Б., Шляндина В.М., Мартяшина А.И., Шахова Э.К., Угрюмова В.К., Гусева В.Г., Конюхова Н.Е., Осипова О.И., Цытовича Л.И. и многих других ученых.

Многообразие принципов интегрирующего разvertyвающего преобразования, которые могут быть заложены в основу ФСУ, диктует необходимость детального сопоставительного анализа по единой методике статических и динамических характеристик фазосдвигающих устройств различных классов, с целью определения рациональных областей их применения и выбора из их числа структур, наиболее полно удовлетворяющих жестким условиям промышленной эксплуатации ВП и электроприводов на их основе.

Цель работы. Создание систем управления силовыми вентильными преобразователями на основе ФСУ с повышенными эксплуатационными характеристиками (точностью, помехоустойчивостью, простотой технической реализации и надежностью).

Для достижения намеченной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

➤ разработка единой обобщенной методики сопоставительного анализа статических и динамических для широкого частотного диапазона входного гармонического сигнала характеристик структур ФСУ различных классов с позиций теории разvertyвающих систем.

➤ анализ на основе разработанных математических моделей статических и динамических характеристик структур ФСУ с выборкой мгновенных значений сигнала управления, а также структур интегрирующих разомкнутых и замкнутых ФСУ;

➤ анализ на основе разработанных математических моделей статических и динамических характеристик структур преобразователей напряжения в частоту импульсов (ПНЧ) различных классов для число-импульсных интегрирующих ФСУ;

➤ сравнительный анализ статических и динамических характеристик структур ФСУ различных классов и определение рациональных областей их применения для управления силовыми вентильными преобразователями. Разработка рекомендаций по выбору элементной базы ФСУ;

➤ разработка математических моделей различных типов силовых ВП для автоматизированных электроприводов и сравнение их характеристик при управлении от ФСУ различных классов;

➤ разработка практических схем ФСУ и ВП на их основе для ВЭП и технологической автоматики и их экспериментальные исследования;

➤ промышленное внедрение силовых ВП с ФСУ различных классов для автоматизированных электроприводов технологических установок с целью подтверждения достоверности теоретических результатов.

Методы исследования. Для анализа статических и динамических показателей ФСУ использовалась единая разработанная методика на основе систем трансцендентных уравнений с их решением на ЭВМ и представлением результатов в виде пространства статического и динамического состояния объекта и их проекций на плоскость переменных, а также метод логарифмических частотных характеристик. Исследования переходных процессов в системах электропривода на базе ВП с управлением от ФСУ различных классов осуществлялись с помощью пакета прикладных программ MatLab+Simulink.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием методов расчета статических и динамических процессов в математических и компьютерных моделях при общепринятых допущениях, удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных результатов, а также результатами промышленного внедрения и эксплуатации электроприводов с ВП на основе ФСУ различных классов.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- математические модели и результаты анализа на их основе статических и динамических характеристик ФСУ с выборкой мгновенных значений сигнала управления, а также структур интегрирующих разомкнутых и замкнутых ФСУ;
- принципы построения число-импульсных интегрирующих ФСУ;
- математические модели и результаты анализа на их основе статических и динамических характеристик структур преобразователей напряжения в частоту импульсов различных классов для число-импульсных интегрирующих ФСУ цифровых систем управления ВП;
- математические модели и результаты анализа на их основе характеристик структур электроприводов переменного и постоянного тока, содержащих силовые ВП с интегрирующими ФСУ различных классов.

Научное значение работы:

- в результате разработки математического описания для статических и динамических характеристик ФСУ, их теоретического и экспериментального анализа получила дальнейшее развитие теория интегрирующих развертывающих систем и систем управления ВП на их основе;
- впервые на основе единой обобщенной методики и разработанных математических моделей исследованы и сопоставлены статические и динамические для широкого частотного диапазона гармонического входного воздействия характеристики структур ФСУ различных классов и силовых вентильных преобразователей на их основе;
- впервые на основе единой обобщенной методики и разработанных математических моделей исследованы и сопоставлены статические и динамические для широкого частотного диапазона гармонического входного воздействия характеристики структур ПНЧ различных классов для цифровых систем управления ВП;

➤ предложена и исследована новая структура разомкнутого число-импульсного ФСУ с двумя развертывающими функциями, обладающая повышенной помехоустойчивостью;

➤ предложена и исследована новая структура интегрирующей защиты от исчезновения фазного напряжения в силовых ВП электроприводов переменного тока, обладающая повышенной помехоустойчивостью и достоверностью процесса предупреждения аварийного режима работы исполнительного электродвигателя.

Практическое значение работы:

➤ на основе трансцендентных функций разработаны математические модели ФСУ, позволяющие исследовать статические и динамические характеристики ВП различных типов;

➤ получены рекомендации по рациональному выбору параметров элементов схем ФСУ различных классов, обеспечивающие минимизацию результирующей статической и динамической погрешности работы как аналоговых, так и цифровых систем управления силовыми ВП;

➤ разработаны компьютерные модели электропривода переменного тока с тиристорным регулятором напряжения и электропривода постоянного тока с широтно-импульсным регулированием, позволяющие исследовать режимы работы электроприводов с ФСУ различных классов;

➤ разработаны и внедрены структурные и принципиальные схемы промышленных замкнутых тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) для плавного пуска асинхронных электродвигателей с интегрирующими ФСУ, предназначенных для работы с сетью различной мощности.

Реализация результатов работы

ТРН с интегрирующими ФСУ внедрены на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» при автоматизации технологического процесса на гидропрессе №7 и системе оборотного цикла водоснабжения линии отделки труб большого диаметра цеха №6. Результирующий годовой экономический эффект от реконструкции технологических объектов составил более 650 тыс. руб. Материалы диссертационной работы используются при чтении лекций по курсам «Физические основы электроники», «Элементы систем автоматики» и «Системы управления вентильными преобразователями» для студентов энергетических специальностей. По результатам исследований разработан учебно-лабораторный стенд по курсу «Системы управления вентильными преобразователями» для студентов специальности 140604. Результаты работы используются также в рамках проекта «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы) НИОКР» по заданию Рособразования по аналитической ведомственной целевой программе (регистрационный № 01.2006 10696).

Апробация работы. Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, ЮУрГУ, 2004 – 2006 гг.); IV Международной конференции «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (Магнитогорск, МГТУ, 2004); международной тринадцатой научно-технической конференции

«Электроприводы переменного тока» (Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2005); международной научно-технической конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения) (Иваново, ИГЭУ, 2005); XI Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Москва, ГОУВПО МЭИ (ТУ), 2006).

Публикации. Основные положения, выводы и практические результаты изложены в 7 статьях в журналах, 4 материалах конференций и тезисов докладов. На оригинальные технические решения получены 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 181 страница, заключения, списка литературы из 171 наименования, трех приложений. Общий объем диссертации 220 страниц, включая 65 рисунков и 41 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, определены цели, методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются уровни и частотный спектр промышленных помех и основные проблемы электромагнитной совместимости вентиляльных преобразователей. Рассмотрены пути проникновения помех в информационные каналы систем управления электроприводами. Приведена классификация систем импульсно-фазового управления ВП, а также обобщенная функциональная схема силовых вентиляльных преобразователей. Отмечается, что, независимо от схемы ВП и его функционального назначения, наиболее чувствительным к внешним помехам элементом систем управления ВП является ФСУ. Впервые дана классификация ФСУ систем управления ВП с позиций теории разветвляющихся систем. Рассмотрены базовые принципы интегрирующего разветвляющегося преобразования и возможность их применения для систем управления ВП. Проведена классификация источников статической и динамической погрешностей ФСУ, и из их числа выбраны наиболее значимые для систем ВЭП составляющие. Сформулированы технические требования к ФСУ при работе с сетью большой и ограниченной мощности.

Разработана единая методика оценки статической и динамической погрешностей фазосдвигающих устройств, в частности, с использованием метода частотного анализа и систем трансцендентных уравнений.

Проведен анализ статических и динамических характеристик ФСУ с выборкой мгновенных значений сигнала управления, которые являются наиболее распространенными в типовых промышленных образцах ВП отечественного и зарубежного производства и получили название ФСУ с «вертикальным» управлением (рис. 1 а).

Исследованы мультипликативная ошибка, обусловленная экспоненциальным характером изменения разветвляющей функции с учетом

реальных статических и динамических характеристик канала интегрирования, а также аддитивные составляющие, вызванные дрейфовыми параметрами интегратора. Сформулированы требования к элементам ФСУ данного класса, при которых минимизируется их результирующая погрешность преобразования.

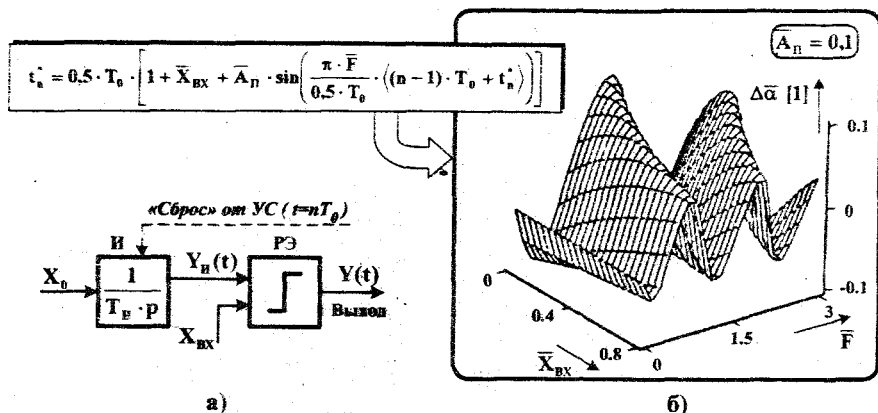


Рис. 1. Структурная схема (а), обобщенное расчетное уравнение и пространство динамического состояния (б) ФСУ с выборкой мгновенных значений сигнала управления (И – интегратор; РЭ – релейный элемент; УС – устройство синхронизации ВП; X_0 – опорный сигнал; $X_{ВХ}$ – сигнал управления; T_0 – интервал дискретизации; $n=1; 2; 3 \dots$ – целое число)

Доказаны низкие метрологические характеристики данных ФСУ, особенно их неудовлетворительная помехоустойчивость в области частот замедленной дискретизации за пределами несущей частоты ВП (рис. 1 б). Здесь и далее: $\bar{A}_n = |A_n/A|$, $\bar{F} = T_0/T_n$ – нормированное значение амплитуды A_n и частоты $(T_n)^{-1}$ гармонического входного сигнала помехи соответственно; $\bar{X}_{ВХ} = |X_{ВХ}/A|$ – нормированное значение сигнала управления $X_{ВХ}$, отнесенное к его максимально допустимому значению A ; $\Delta \bar{\alpha} [1] = 1 - t_n^*/t_n$ – нормированное значение реального угла управления (времени включения t_n^* силового вентиля ВП) относительно его требуемого значения t_n , определяемого величиной $X_{ВХ}$.

В результате проведенного анализа проблемы электромагнитной совместимости ВП, характеристик базовой структуры ФСУ и разработанных требований к данному классу устройств управления ВП сформулированы цель и задачи исследований.

Вторая глава посвящена анализу статических и динамических характеристик разомкнутых интегрирующих ФСУ. Приведены базовые принципы построения подобного рода устройств, дана их классификация. Рассматривались ФСУ с одной функциональной развертывающей функцией (рис. 2 а), впервые предложенное ФСУ с двумя функциональными развертывающими функциями, а

также ФСУ с одной функциональной и одной параметрической развертывающими функциями.

На основе полученных автором аналитических выражений рассмотрены статические характеристики данных ФСУ с учетом экспоненциального характера изменения развертывающей функции и аддитивных составляющих ошибки дрейфа «нуля» канала интегрирования. Даны рекомендации по выбору конкретной элементной базы ФСУ данного класса с целью минимизации их результирующей погрешности преобразования.

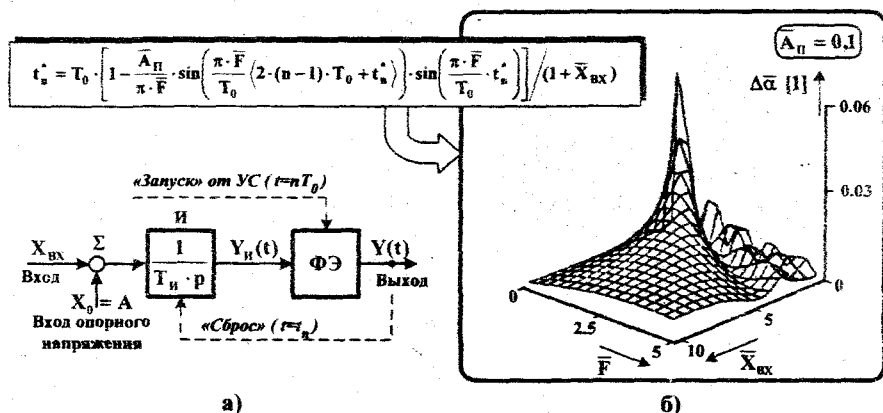


Рис. 2. Структурная схема (а), обобщенное расчетное уравнение и пространство динамического состояния (б) разомкнутого интегрирующего ФСУ с одной функциональной развертывающей функцией (Σ – сумматор, ФЭ – фиксирующий (релейный) элемент)

Доказана повышенная помехоустойчивость разомкнутых интегрирующих ФСУ. При этом с ростом уровня сигнала управления и частоты сигнала помехи погрешность, вызванная ее действием, уменьшается (рис. 2 б), а уровень сигналов замедленной дискретизации входного динамического сигнала на 1–2 порядка меньше, чем в ФСУ «вертикального» типа (рис. 1). Характер пространства динамического состояния для всех ФСУ данного класса идентичен. Отличие состоит в том, что уровень помехоустойчивости структуры с двумя функциональными развертками в два раза выше аналогичных характеристик ФСУ с одной функциональной развертывающей функцией.

Рассмотрены структуры число-импульсных ФСУ (рис. 3), предназначенных для цифровых систем управления ВП.

В число-импульсном ФСУ с одной функциональной разверткой и «горизонтальным» управлением (рис. 3 а) входной сигнал управления под действием ПНЧ преобразуется в последовательность импульсов, которые поступают на счетный С-вход суммирующего счетчика СТ. В результате на выходе счетчика формируется цифровая развертывающая функция $N_1(t)$, которая

сравнивается с заранее заданным максимальным числом N_{\max} , и в момент их равенства формируется команда на включение силового ключа ВП $t_n = N_{\max} / f_{\text{вых}}$, где $f_{\text{вых}}$ – частота импульсов на выходе ПНЧ.

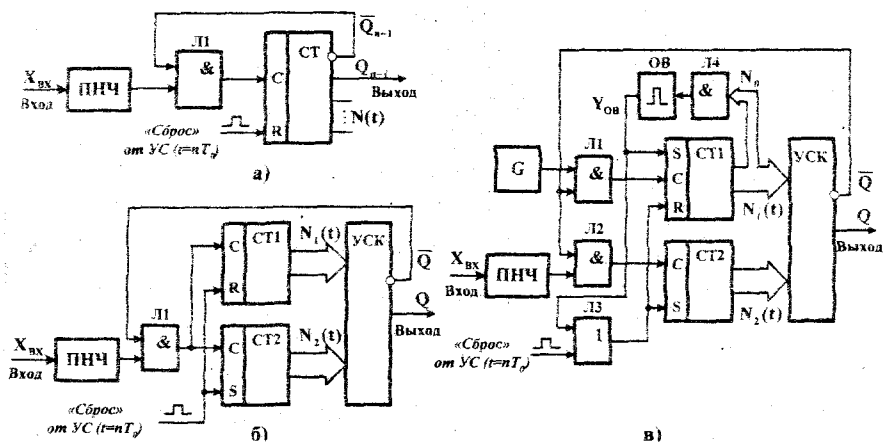


Рис. 3. Число-импульсные ФСУ с одной функциональной (а), с двумя функциональными (б) и с одной функциональной и одной параметрической (в) развертывающими функциями

Структура на рис. 3 б (патент на изобретение № 2288532 РФ) под действием выходных импульсов ПНЧ формирует две функциональные развертывающие функции $N_1(t)$ и $N_2(t)$ в суммирующем СТ1 и вычитающем СТ2 двоичных счетчиках соответственно. В момент выполнения условия $N_1(t) \geq N_2(t)$, фиксируемых устройством сравнения кодов (УСК), дается команда на включение силового ключа ВП. При этом $t_n = N_{\max} / (2 \cdot f_{\text{вых}})$, что позволяет снизить частоту выходных импульсов ПНЧ за счет повышения постоянной времени его канала интегрирования, и тем самым повысить помехоустойчивость ФСУ в целом.

Число-импульсное ФСУ с двумя цифровыми развертывающими функциями (рис. 3 в) реализует «вертикальный» принцип управления. При этом параметрическая развертывающая функция $N_1(t)$ формируется за счет генератора импульсов стабильной частоты G в суммирующем счетчике СТ1, а функциональная развертка $N_2(t)$ – в вычитающем счетчике СТ2 под действием импульсного сигнала с выхода ПНЧ. При выполнении условия $N_1(t) \geq N_2(t)$ формируется команда на включение силового ключа ВП. В результате $t_n = \frac{N_{\max}}{(1 + f_{\text{вых}}/f_G) \cdot f_G}$, где f_G – частота импульсов на выходе высокочастотного генератора G .

Основным достоинством схемы ФСУ (рис. 3 в) является возможность выполнения параметрической цифровой развертки $N_i(t)$ с дискретизацией по амплитуде, что позволяет ограничить максимальный угол управления α_{\max} на заданном уровне без применения дополнительных устройств ограничения уровня сигнала управления, которые отрицательно влияют на помехоустойчивость ВП в целом. С этой целью в ФСУ введены логические элементы ЛЗ, Л4 и одновибратор ОВ.

Анализ погрешности дискретизации для ФСУ данного класса показал, что в системах управления ВП достаточно использовать восьми разрядный двоичный код, при котором обеспечивается допустимая асимметрия угла управления в многоканальных системах импульсно-фазового управления.

Поскольку все число-импульсные ФСУ относятся к разряду аналого-цифровых устройств, то, очевидно, что их метрологические показатели, в том числе и помехоустойчивость со стороны информационного входа, во многом определяются реальными характеристиками ПНЧ.

В третьей главе диссертационной работы рассматриваются статические и динамические характеристики ПНЧ различных классов (рис. 4) для цифровых систем управления ВП.

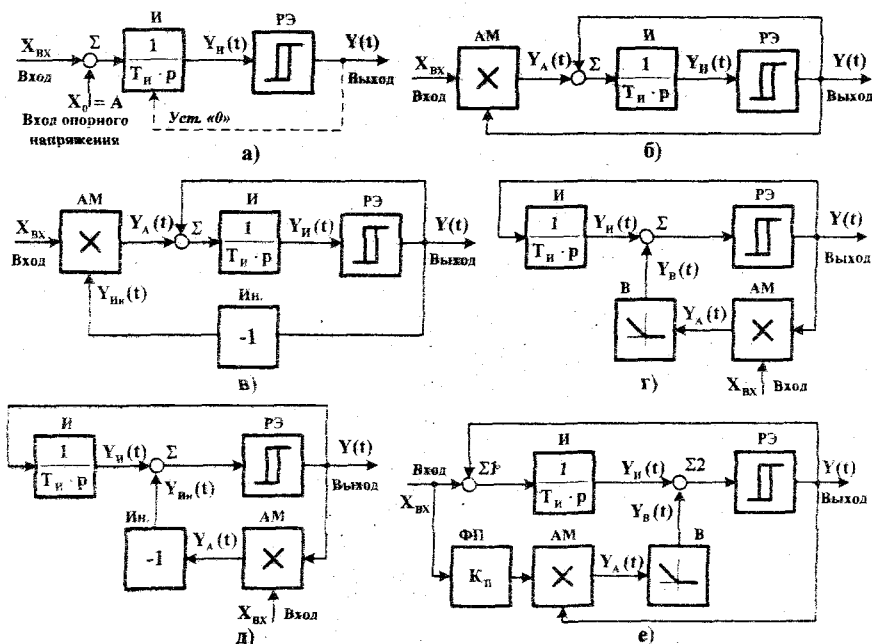


Рис. 4. Структурные схемы ПНЧ различных классов (Ин. – инвертор, АМ – амплитудный модулятор, В – выпрямитель, ФП – функциональный преобразователь)

В качестве базовых структурных схем были проанализированы ПНЧ четырех классов: интегрирующий с установкой нулевых начальных условий в канале интегрирования (рис. 4 а), интегрирующий с синфазной (рис. 4 б) и противофазной (рис. 4 в) амплитудной модуляцией (АМ), псевдоинтегрирующий с АМ одного (рис. 4 г) и двух (рис. 4 д) порогов переключения РЭ, а также комбинированный с интегрированием преобразуемого параметра и АМ одного порога переключения РЭ (рис. 4 е).

На основе полученных выражений, связывающих выходную частоту ПНЧ с величиной входного сигнала управления $f_{\text{вых}} = F(X_{\text{вх}})$, установлено, что для интегрирующих ПНЧ несущая частота меняется линейно с ростом сигнала управления, а для псевдоинтегрирующих — по гиперболическому закону. Комбинированный ПНЧ относится к разряду двухкоординатных развертывающих систем, когда информативными составляющими его выходных импульсов одновременно являются как частота их следования, так и среднее значение импульсов за интервал дискретизации. За счет изменения коэффициента ФП можно получить любой требуемый вид зависимости $f_{\text{вых}} = F(X_{\text{вх}})$.

На основе разработанного математического описания определены среднестатистические погрешности ПНЧ (рис. 5). Установлено, что наименьшим уровнем аддитивной ошибки обладают ПНЧ с синфазной амплитудно-частотно-импульсной модуляцией, уровень дрейфа «нуля» которых во много раз ниже аналогичных показателей других структур ПНЧ.

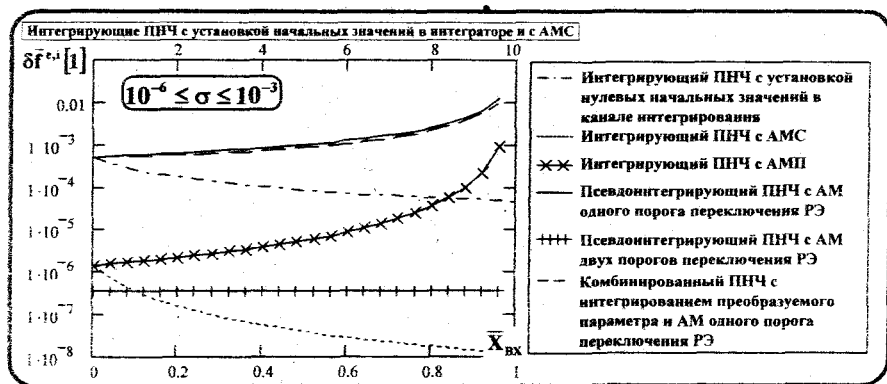


Рис. 5. Среднестатистическая ошибка частоты $\delta \bar{f}^{\text{с.п.}} [1] = f(\bar{X}_{\text{вх}})$ для ПНЧ различных классов в диапазоне изменения приведенных к входу нормированных значений « σ » сигналов дрейфа «нуля» канала интегрирования и амплитудного модулятора

На основе разработанных автором математических моделей проведен анализ динамических характеристик ПНЧ для широкого частотного спектра внешнего гармонического воздействия. Показана идентичность характера динамических характеристик внутри класса интегрирующих и псевдоинтегрирующих ПНЧ (рис. 6).

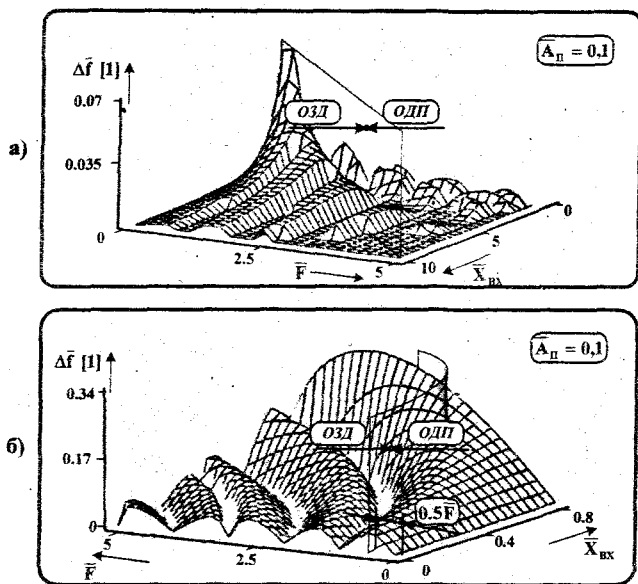


Рис. 6. Характер пространств динамических состояний $\Delta \bar{f}[1] = f(\bar{X}_{вх}, \bar{F}, \bar{A}_\pi = 0,1)$ интегрирующих (а) и псевдоинтегрирующих (б) ПНЧ (ОДП, ОЗД – области достоверной передачи частот и замедленной дискретизации входного воздействия соответственно; $\Delta \bar{f}[1]$ – нормированное значение ошибки частоты выходных импульсов ПНЧ)

В результате сопоставительного анализа статических и динамических показателей ПНЧ различных классов доказано, что синфазная амплитудная модуляция обеспечивает наилучшее сочетание стабильности характеристик ПНЧ и число-импульсных ФСУ в целом (рис. 5), их помехоустойчивости (рис. 6) и простоты технической реализации (рис. 4).

Четвертая глава посвящена анализу статических и динамических характеристик замкнутых интегрирующих ФСУ (рис. 7 а, б), а также сравнительному анализу технических показателей различных классов фазосдвигающих устройств.

В качестве синхронизирующего воздействия в замкнутом интегрирующем ФСУ с синхронизацией со стороны информационного входа (рис. 7 а) используется либо гармонический синусоидальный сигнал (сеть), либо прямоугольные биполярные импульсы типа «меандр» с амплитудой $\bar{A}_c = |A_c/A| > 2,0$, а в схеме интегрирующего ФСУ с синхронизацией со стороны РЭ (рис. 7 б) – симметричный или с дискретным фронтом пилообразный сигнал, синхронизированный с напряжением сети. Статическая функция преобразования замкнутых ФСУ $\alpha_{ст} = f(\bar{X}_{вх})$ является линейной и определяется из выражения

$\alpha_{CT} = 90 \text{ эл. град.} \cdot (1 - \bar{X}_{\text{ВХ}})$, где α_{CT} – угол управления силовым ключом ВП В. установившемся режиме; $\bar{X}_{\text{ВХ}}$ – нормированное значения входного воздействия.

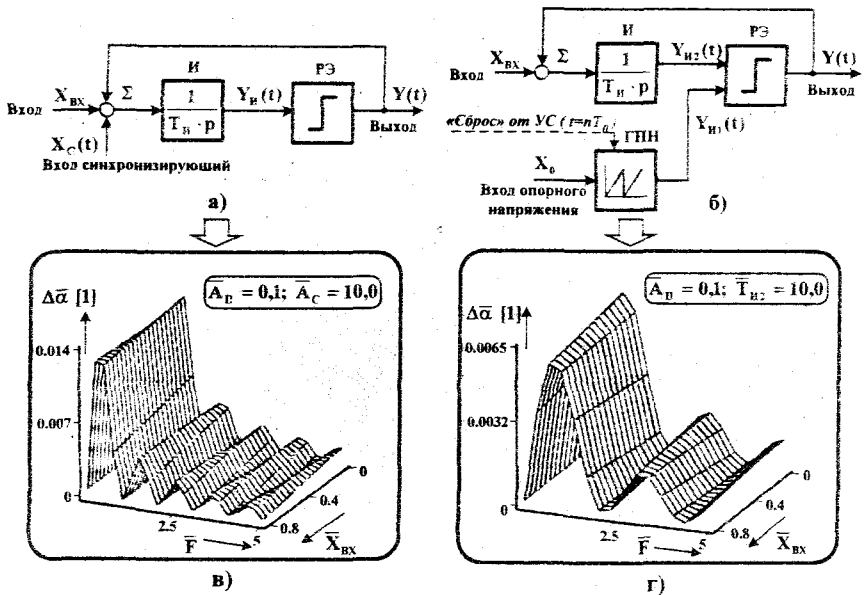


Рис. 7. Структурная схема замкнутого интегрирующего ФСУ с синхронизацией по информационному входу (а) и по входу релейного элемента (б) и их пространства динамического состояния (в, г)

(ГПН – генератор пилообразного сигнала развертки; $A_C = |A_C/A|$ – нормированное значение амплитуды A_C синхронизирующего воздействия (напряжения сети); $\bar{T}_{И2} = T_{И2}/T_{И1}$ – относительная постоянная времени канала интегрирования; $T_{И1} = (A \cdot T_C)/A_C$ – постоянная времени ГПН; T_C – период напряжения сети; A_C – амплитуда сигнала синхронизации; A – амплитуда выходных импульсов РЭ)

На основе разработанных математических моделей, а также с использованием компьютерного моделирования в среде MatLab+Simulink дан анализ статических и динамических (рис. 7 в, г) показателей данного класса ФСУ. Приведены рекомендации по выбору параметров элементов схем ФСУ с позиций минимизации статической погрешности реализации заданной функции преобразования. Установлено, что определяющими факторами, влияющими на статические и динамические характеристики, в ФСУ с синхронизацией со стороны информационного входа являются период T_C и нормированное значение амплитуды сигнала внешней синхронизации $\bar{A}_C = |A_C/A|$, а в ФСУ с синхронизацией со стороны РЭ – частота сети $(T_C)^{-1}$ и относительное значение постоянной времени интегрирования $\bar{T}_{И2} = T_{И2}/T_{И1}$.

Доказана способность динамических характеристик ФСУ адаптироваться к параметрам синхронизирующего воздействия (напряжения сети), что особенно ценно для автономных систем управления при работе с источником электропитания ограниченной мощности.

Рассмотрен метод параллельной коррекции динамических характеристик ФСУ с синхронизацией «пилой» со стороны входа РЭ, обеспечивающий расширение полосы пропускания ФСУ данного класса.

С использованием понятия среднестатистического угла управления на пространстве исследуемого объекта проведен сравнительный анализ статических и динамических характеристик различных классов ФСУ, результаты которого (табл. 1) позволяют сделать следующие основные выводы:

➤ среднестатистическая ошибка, вызванная нелинейностью сигнала развертки и дрейфовыми параметрами канала интегрирования (табл. 1, рис. 1, 2) для замкнутых интегрирующих ФСУ (рис. 7) практически не зависит от входного воздействия $\bar{X}_{вх}$ и примерно на один порядок меньше, чем для разомкнутых ФСУ, что объясняется их замкнутой структурой;

➤ по уровню статической ошибки (табл. 1, рис. 1, 2) интегрирующее ФСУ с одной функциональной разверткой (рис. 2) занимает среднее положение между исследуемыми классами ФСУ;

➤ как видно из табл. 1, рис. 3 логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ), полученные путем моделирования в среде MatLab+Simulink, для разомкнутых ФСУ совпадают. При этом их граничная частота определяется из теоремы В.А. Котельникова и составляет $f_{гп} \leq 0,5 \cdot f_0$, где f_0 – несущая частота на выходе ФСУ;

➤ замкнутые интегрирующие ФСУ в ОДП ($(\bar{F} = f/f_0) \leq 0,5$) обладают свойствами, близким к динамическим характеристикам линейного апериодического звена первого порядка (табл. 1, рис. 3) с эквивалентной постоянной времени $T_{э1} \approx 0,25 \cdot \bar{A}_c \cdot T_c$ для схемы на рис. 7 а и $T_{э2} \approx 0,45 \cdot \bar{T}_{и2} \cdot T_c$ для структуры на рис. 7 б. Это говорит о более низком быстродействии замкнутых устройств по сравнению с разомкнутыми структурами;

➤ в диапазоне частот $0,1 \leq \bar{F} \leq 5,0$ (табл. 1, рис. 5) среднестатистическое отклонение угла управления для разомкнутого интегрирующего ФСУ с одной функциональной разверткой (рис. 2) составляет 1,2% и с ростом $\bar{X}_{вх}$ снижается практически в 2 раза. Для замкнутых интегрирующих ФСУ (рис. 7) среднестатистическое отклонения угла управления практически не зависит от входного сигнала и составляет 0,8% для ФСУ с синхронизацией по информационному входу и 0,4% для ФСУ с синхронизацией по входу РЭ. Поэтому замкнутые ФСУ целесообразны к применению на промышленных объектах с высоким уровнем помех в каналах передачи сигнала управления, а также в электроприводах с автономным энергоснабжением.

Сравнительный анализ статических и динамических характеристик фазосдвигающих устройств различных классов

Сравнительный анализ статических характеристик

Среднестатистическое отклонение угла управления $\delta\bar{\alpha}^3 [1] = f(\bar{X}_{вх})$ из-за нелинейности сигнала развертки

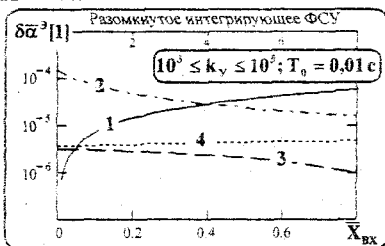


Рис. 1

Среднестатистическое отклонение угла управления $\delta\bar{\alpha}^{3,4} [1] = f(\bar{X}_{вх})$ из-за дрейфовых параметров интегратора



Рис. 2

Сравнительный анализ динамических характеристик

Логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ)

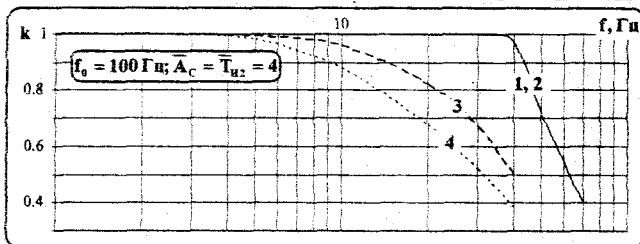


Рис. 3

Среднестатистическое отклонение угла управления $\Delta\bar{\alpha}^* [1] = f(\bar{X}_{вх})$ в результате воздействия сигнала помехи в широком частотном диапазоне \bar{F}

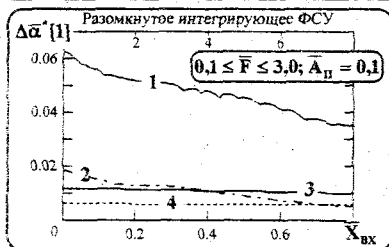


Рис. 4

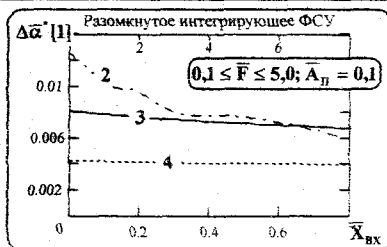


Рис. 5

- 1 — ФСУ с выборкой мгновенных значений сигнала управления («вертикальный» принцип);
- 2 — Разомкнутое интегрирующее ФСУ с одной функциональной разверткой («горизонтальный» принцип);
- 3 — Замкнутое интегрирующее ФСУ с синхронизацией со стороны информационного входа ($A_c = 4$);
- 4 — Замкнутое интегрирующее ФСУ с синхронизацией со стороны РЭ ($T_{и2} = 4$).

В пятой главе рассматриваются ВП с интегрирующими ФСУ и электроприводы технологических установок на их основе.

Разработаны компьютерные модели в пакете MatLab+Simulink для тиристорных регуляторов напряжения по схеме «тиристор-тиристор» и «тиристор-диод», осуществляющих плавный пуск асинхронных электроприводов, и модель электропривода постоянного тока с широтно-импульсным регулированием. Дан сравнительный анализ режимов работы электроприводов при воздействии сигналов помех для различных схем ФСУ. Доказано, что применение интегрирующих ФСУ является высокоэффективным средством повышения помехоустойчивости систем управления электроприводами переменного и постоянного тока.

На рис. 8 представлена функциональная схема ТРН для плавного пуска асинхронных электродвигателей (АД). Силовая часть ТРН выполнена по схеме «тиристор-тиристор». Система управления ТРН представляет собой синхронную трехканальную систему импульсно фазового управления (СИФУ), где каждый из каналов содержит устройство синхронизации (УС), ФСУ, формирователь – распределитель (ФР) импульсов управления, контур тока, обеспечивающего ограничение пускового тока АД на заранее заданном уровне порядка 2–3 номинального значения.

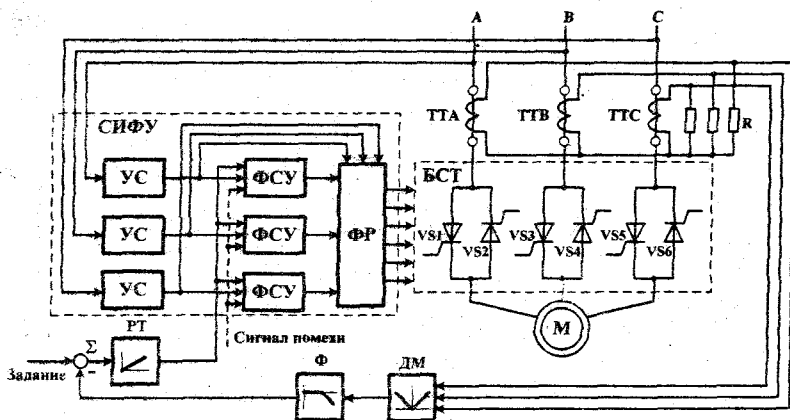


Рис. 8. Функциональная схема ТРН для плавного пуска асинхронного электродвигателя (УС – устройство синхронизации; ФСУ – фазосдвигающее устройство; ФР – формирователь-распределитель импульсов управления; БСТ – блок силовых тиристоров; ТТА, ТТВ, ТТС – трансформаторы тока; ДМ – демодулятор; Ф – фильтр; РТ – регулятор тока; М – асинхронный электродвигатель; Σ – сумматор)

Результаты исследований для ТРН по схеме «тиристор-тиристор» представлены на рис. 9 в виде зависимости $\delta I_{\max} = F(f_{1п})$, где $\delta I_{\max} = |(\bar{I}_0 - \bar{I}_{1п}) / \bar{I}_0|$ – максимальная относительная ошибка тока статора АД на участке его ограничения (пуска электродвигателя), \bar{I}_0 , $\bar{I}_{1п}$ – кратность пускового тока статора

АД при отсутствии и наличия сигнала помехи соответственно, $f_{п}$ – частота помехи. При этом видно следующее:

➤ в результате воздействия гармонической помехи в частотном диапазоне от 50 – 1200 Гц и кратностью 0,1 на вход ФСУ «вертикального» типа в ТРН наблюдаются значительные отклонения пускового тока статора АД от требуемых значений, что затрудняет, а чаще всего делает невозможным выход АД на естественную механическую характеристику;

➤ отмеченного недостатка лишены ТРН, построенные на основе интегрирующих ФСУ (рис. 2, 7), для которых максимальная относительная ошибка δI_{max} во всем частотном диапазоне сигнала помехи не превышает 2% (за исключением частоты 50 Гц), что примерно на 1–1,5 порядка меньше, чем для ТРН с «вертикальным» принципом управления. Кроме того, в системах управления на основе интегрирующих ФСУ ошибка δI_{max} уменьшается с ростом частоты помехи, что говорит о их повышенной помехоустойчивости со стороны информационного входа.



Рис. 9. Максимальная относительная ошибка тока статора АД δI_{max} под действием сигнала помехи для ТРН по схеме «тиристор-тиристор» с различными классами фазосдвигающих устройств (ограничение пускового тока 2,5 от номинального значения)

Аналогичные исследования были проведены для ТРН по схеме «тиристор-диод» и для электропривода постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем с несимметричным управлением силовых транзисторных ключей и с двухконтурной системой подчиненного регулирования. Во всех случаях были подтверждены существенные преимущества интегрирующих ФСУ.

Таким образом, теоретические исследования и результаты математического моделирования в среде MatLab+Simulink однозначно подтверждают, что применение интегрирующих ФСУ является высокоэффективным средством повышения помехоустойчивости системы управления вентильных преобразователей систем технологической автоматики.

В работе разработаны и экспериментально исследованы аналого-цифровые ТРН для плавного пуска асинхронных электродвигателей по схемам «тиристор-тиристор» и «тиристор-диод», которые внедрены на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» при автоматизации режимов работы гидропресса №7 линии отделки труб большого диаметра 1020 – 1220 и электроприводов оборотного цикла водоснабжения. Для исключения возможности срабатывания защиты при кратковременном исчезновении фазного напряжения в ТРН используется интегрирующая защита от исчезновения фазного напряжения (патент на изобретение № 2275723 РФ). Экономический эффект от внедрения оборудования составил более 650 тыс. руб. в год, и получен за счет экономии электроэнергии при переводе асинхронных электроприводов в повторно-кратковременный режим работы и сокращения расходов на ремонт и обслуживания силового электрооборудования технологических установок.

Приложения к диссертационной работе. В приложении 1 представлены документы о внедрении результатов работы на производстве и в учебный процесс энергетического факультета ЮУрГУ. В приложениях 2 и 3 приведен перечень сокращений и обозначений, принятых в диссертационной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате разработки математического описания для статических и динамических характеристик ФСУ, их теоретического и экспериментального анализа получила дальнейшее развитие теория интегрирующих развертывающих систем и систем управления ВП на их основе.

2. Произведена классификация фазосдвигающих устройств систем управления силовыми вентильными преобразователями и разработана единая методика сопоставительного анализа статических и динамических для широкого частотного диапазона входного гармонического сигнала характеристик структур ФСУ различных классов с позиций теории развертывающих систем.

3. Впервые на основе единой методики и разработанных математических моделей исследованы и сопоставлены статические и динамические для широкого частотного диапазона гармонического входного воздействия характеристики структур ФСУ различных классов и силовых вентильных преобразователей на их основе. Доказана высокая помехоустойчивость и стабильность характеристик ВП с интегрирующими ФСУ. Даны рекомендации по выбору параметров элементов схем ФСУ.

4. Впервые на основе единой методики и разработанных математических моделей исследованы и сопоставлены статические и динамические для широкого частотного диапазона гармонического входного воздействия характеристики структур ПНЧ различных классов для разомкнутых число-импульсных ФСУ цифровых систем управления ВП. Показано, что наиболее высокой стабильностью характеристик и помехоустойчивостью обладают ПНЧ с амплитудно-частотно-импульсной модуляцией. Даны рекомендации по выбору параметров элементов схем ПНЧ.

5. Предложена и исследована новая структура разомкнутого число-импульсного ФСУ с двумя развертывающими функциями, обладающая повышенной помехоустойчивостью.

6. Предложена и исследована новая структура интегрирующей защиты от исчезновения фазного напряжения в силовых ВП электроприводах переменного тока, обладающая повышенной помехоустойчивостью и достоверностью процесса предупреждения аварийного режима работы исполнительного электродвигателя.

7. С помощью пакета прикладных программ MatLab+Simulink произведен сравнительный анализ помехоустойчивости асинхронных электроприводов с ТРН для схем силовых блоков с ключами «тиристор-тиристор» и «тиристор-диод», а также электропривода постоянного тока с широтно-импульсным силовым преобразователем с управлением от фазосдвигающих устройств «вертикального» и замкнутого интегрирующего типов при воздействии гармонических помех на информационный вход ФСУ. Показана высокая помехоустойчивость систем управления электроприводами с интегрирующими ФСУ.

8. Разработаны и экспериментально исследованы схемы ТРН с силовыми ключами «тиристор-тиристор» и «тиристор-диод» с управлением от разомкнутого и замкнутого интегрирующего ФСУ, содержащие необходимый комплекс селективных защит. ТРН с интегрирующими ФСУ внедрены в комплексе асинхронных электроприводов системы оборотного цикла водоснабжения и гидропресса №7 линии отделки труб большого диаметра в цехе №6 ОАО «Челябинский трубопрокатный завод». Экономический эффект от внедрения оборудования составил более 650 тыс. руб. в год. Результаты теоретических исследований и разработанные математические модели приняты к внедрению в учебный процесс ЮУрГУ в курсах «Элементы систем автоматики» и «Системы управления вентиляльными преобразователями».

Научные публикации по теме диссертации в журналах ВАК

1. Цытович, Л.И. Анализ динамики интегрирующего амплитудно-частотно-импульсного развертывающего преобразователя аналоговых сигналов в частоту импульсов / Л.И. Цытович, Р.З. Гафиятуллин, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – № 11(27). – С. 36–40.

2. Цытович, Л.И. Тиристорная станция управления интегрирующего типа для плавного пуска асинхронных электродвигателей / Л.И. Цытович, Р.Х. Гафиятуллин, Р.М. Рахматуллин, М.М. Дудкин, С.И. Шкаликов, Ю.Г. Попов, В.А. Тюгаев, А.А. Габорик, С.И. Скляр // Наука и технологии. Избранные труды Российской школы «К 70-летию Г.П. Вяткина». – М.: РАН, 2005. – С. 520–526.

3. Цытович, Л.И. Система управления асинхронным электроприводом водоснабжения жилого здания с автоматическим регулированием каналов регулирования / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина, М.М. Дудкин // Проблемы энергетики: известия высших учебных заведений. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2005. – № 5–6. – С. 47–52.

4. Цытович, Л.И. Тиристорный преобразователь с интегрирующим устройством для мягкого пуска асинхронных электродвигателей / Л.И. Цытович,

С.И. Шкалик, М.М. Дудкин // Проблемы энергетики: известия высших учебных заведений. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2005. – № 7–8. – С. 57–65.

5. Цытович, Л.И. Система управления группой асинхронных электроприводов с самодиагностированием и автоматическим резервированием каналов регулирования / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина, М.М. Дудкин // Электротехника 2006. – №11. – С. 38–44.

Другие научные публикации по теме диссертации

1. Цытович, Л.И. Тиристорный регулятор напряжения для плавного пуска асинхронных электродвигателей / Л.И. Цытович, Р.Х. Гафиятуллин, М.М. Дудкин, С.И. Шкалик, Ю.Г. Попов, С.И. Скларов // Труды IV Международной конференции «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития», – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – Ч. 1. – С. 292–294.

2. Дудкин, М.М. Сравнительный анализ динамических характеристик фазосдвигающих устройств / М.М. Дудкин // Электротехнические системы и комплексы: межвузовский сб. науч. тр. / Под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – Вып. 11. – С. 87–96.

3. Цытович, Л.И. Анализ динамических характеристик интегрирующих фазосдвигающих устройств / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // Труды международной тринадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: УПИ, 2005. – С. 95–98.

4. Дудкин, М.М. Сравнительный анализ динамических характеристик преобразователей напряжения в частоту импульсов / М.М. Дудкин // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии»: тез. докл. в 2-х т. – Иваново: ИГЭУ, 2005. – Т. 1. – С. 189.

5. Дудкин, М.М. Анализ динамических характеристик преобразователей напряжения в частоту импульсов / М.М. Дудкин // Электротехнические системы и комплексы: межвузовский сб. науч. тр. / Под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – Вып. 12. – С. 183–192.

6. Дудкин, М.М. Помехоустойчивость систем управления тиристорными регуляторами напряжения с различными классами фазосдвигающих устройств / М.М. Дудкин // Труды XI Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (XII Бенардосовские чтения): тез. докл.: в 2-х ч. – М.: Изд. институт электротехники ГОУВПО «МЭИ (ТУ)», 2006. – Ч. 1. – С. 30–32.

7. Пат. № 2275723 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 7/00. Устройство защиты тиристорного преобразователя / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина. – № 2005100929/09; заявл. 17.01.05; опублик. 27.04.06. Бюл. № 12. – 7 с.

8. Пат. № 2288532 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 М 1/08. Фазосдвигающее устройство / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин. – № 2005114902/09; заявл. 13.05.05; опублик. 27.11.06, Бюл. № 33. – 10 с.