

05.09.12  
К309

На правах рукописи



Качалов Андрей Валентинович

**АДАПТИВНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
СИЛОВЫМИ ВЕНТИЛЬНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2011

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  
Карандаев Александр Сергеевич.

Ведущее предприятие – ГОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет».

Защита состоится 12 мая 2011 г., в 10 часов, на заседании  
диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном  
университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд.  
1001.

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

Отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба направлять по  
адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76, ЮУрГУ на имя ученого  
секретаря диссертационного совета.

Телефон/факс для справок (351) 267-93-85.

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.298.05  
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современные энергосистемы как стационарного, так и автономного базирования характеризуются высоким уровнем искажений с трудно предсказуемыми параметрами, зачастую выходящими за допустимые нормы искажений и играющими роль дестабилизирующих факторов в работе не только вентильных преобразователей (ВП), но и технологических установок в целом. Поэтому создание систем управления ВП, способных частично или полностью адаптироваться к изменяющимся параметрам сети, является актуальной задачей, направленной на повышение эксплуатационной надежности работы всего комплекса электротехнического оборудования промышленных предприятий.

Одним из наиболее уязвимых с позиций помехоустойчивости каналов систем управления ВП являются устройства синхронизации (УС), которые в большинстве практических случаев представляют собой каскадное включение сглаживающего фильтра Ф, например, апериодического первого порядка и релейного элемента РЭ. Недостаток подобных технических решений очевиден – при изменениях амплитуды и/или частоты напряжения сети заданный угол синхронизации существенно меняется, что сказывается на характеристиках ВП в целом, а в ряде случаев может привести к его аварийному отключению. Проблема помехоустойчивости контуров синхронизации ВП за последнее время в немалой степени обострилась из-за широкого внедрения преобразователей частоты в электроприводах переменного тока, генерирующих в сеть высокочастотные гармоники широтно-импульсной модуляции, не связанные по кратности с частотой напряжения сети. Это привело к росту удельного веса высокочастотного спектра помех, наводимых на элементы систем ВП, что затрудняет борьбу с ними традиционными методами пассивной и активной фильтрации.

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

Многообразие принципов развертывающего преобразования, которые могут быть заложены в основу УС, диктует необходимость детального сопоставительного анализа по единой методике статических и динамических характеристик устройств синхронизации 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. При этом необходим также анализ взаимодействия УС с фазосдвигающими устройствами (ФСУ) различных типов при их совместной работе в составе замкнутых систем управления ВП.

**Цель работы.** Повышение эксплуатационной надежности силовых вентиляльных преобразователей при их работе в условиях нестационарных параметров источника электроснабжения.

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

– разработка единой методики сопоставительного анализа статических и динамических для широкого частотного диапазона входного гармонического сигнала характеристик структур УС различных классов с позиций теории разветвляющихся систем и ВП на их основе;

– разработка математических моделей ВП постоянного и переменного тока, ведомых сетью, и элементов их систем управления для проведения сопоставительного анализа степени влияния нестационарных параметров источника электроснабжения на характеристики ВП при различных классах УС и ФСУ;

– разработка математических моделей источников электроснабжения с нестационарными параметрами;

– анализ на основе разработанных математических моделей статических и динамических характеристик УС с выборкой мгновенных значений сигнала управления, интегрирующих разветвляющихся УС, комбинированных УС и каскадных интегрирующих УС;

– разработка методики синтеза и принципов аппаратной реализации УС с цифровыми алгоритмами обработки информации на интервалах естественной коммутации  $n$  – фазной системы напряжений источника электроснабжения;

– сравнительный анализ статических и динамических характеристик УС различных классов, определение путей повышения их статической и динамической точности, а также рациональных областей применения для управления силовых вентиляльных преобразователей, работающих в системах электроснабжения различного типа. Разработка рекомендаций по выбору элементной базы УС;

– сравнительный анализ статических и динамических характеристик ВП при работе с УС и ФСУ различных классов;

– разработка практических схем УС и ВП на их основе для вентиляльных электроприводов и технологической автоматики и их экспериментальные исследования;

– промышленное внедрение силовых ВП с адаптивными каналами синхронизации с целью подтверждения достоверности теоретических результатов.

**Методы исследования.** Для анализа статических и динамических показателей УС и ВП использовалась единая разработанная методика на основе теории управления, систем трансцендентных уравнений с их решением на ЭВМ и представлением результатов в виде пространств статического и динамического состояния объекта, метод логарифмических частотных характеристик, а также моделирование в пакете 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 тео-

ретических и экспериментальных результатов, а также результатами промышленного внедрения и эксплуатации электроприводов с ВП на основе адаптивных УС.

#### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

– математические модели и результаты анализа на их основе статических и динамических характеристик адаптивных УС с выборкой мгновенных значений сигнала управления;

– математические модели и результаты анализа на их основе статических и динамических характеристик адаптивных интегрирующих, комбинированных и каскадных УС;

– методика синтеза и принципы аппаратной реализации адаптивных УС с цифровыми алгоритмами обработки информации на интервалах естественной коммутации  $n$  – фазной системы напряжений источника электроснабжения;

– математические модели и результаты анализа на их основе статических и динамических характеристик разомкнутых и замкнутых структур силовых ВП с различными классами УС и ФСУ.

#### **Научное значение работы:**

– в результате разработки математического описания для статических и динамических характеристик УС различных классов, их теоретического и экспериментального анализа получила дальнейшее развитие теория развертывающих систем и систем управления ВП на их основе;

– впервые на основе единой методики и разработанных математических моделей исследованы и сопоставлены статические и динамические для широкого частотного диапазона гармонического входного воздействия характеристики предложенных адаптивных структур УС различных классов и силовых вентильных преобразователей на их основе;

– впервые предложены, на основе единой методики и разработанных математических моделей исследованы и сопоставлены статические и динамические для широкого частотного диапазона гармонического входного воздействия характеристики адаптивных структур комбинированных и каскадных УС;

– предложена методика синтеза, принципы аппаратной реализации и исследованы новые структуры адаптивных интервало-кодовых устройств синхронизации, а также показана их способность осуществлять режимы диагностики и защиты ВП от неправильного чередования фаз напряжения сети и катастрофических отказов активных компонентов УС;

– на основе единой методики и разработанных математических моделей исследованы и сопоставлены характеристики разомкнутых и замкнутых структур силовых ВП с различными классами УС и ФСУ.

#### **Практическое значение работы:**

– разработаны обобщенные математические модели ВП постоянного и переменного тока и элементов их систем управления, позволяющие исследовать статические и динамические характеристики разомкнутых и замкнутых структур вентильных преобразователей в условиях нестационарных параметров источника электроснабжения;

- получены рекомендации по рациональному выбору параметров элементов схем УС различных классов, определены области их применения;
- разработаны структурная и принципиальная схемы замкнутого тиристорного регулятора напряжения с цифровым управлением и адаптивными интервало-кодowymi каналами синхронизации, предназначенного для плавного пуска асинхронных электродвигателей;
- разработаны структурная и принципиальная схемы замкнутого тиристорного регулятора напряжения с частотно-широотно-импульсной модуляцией и цифровым управлением на базе адаптивных интервало-кодowych УС, предназначенная для систем терморегулирования.

**Реализация результатов работы.** ВП с интегрирующим адаптивным УС внедрены на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» при автоматизации технологического процесса на гидропрессе №8 и системе управления ЗПЧ – 5ПЧ электроснабжением 20 Гц/160 В рольгангов цеха №6, а также в системе управления режимами работы сушильной камеры 120ЕК электроцеха. Результирующий годовой экономический эффект от реконструкции технологических объектов составил 440520 рублей. Материалы диссертационной работы используются при чтении лекций по курсам «Преобразовательная техника», «Элементы систем автоматики», «Системы управления электроприводами», «Системы управления вентильными преобразователями», а также в учебных пособиях и лабораторных стендах по данным дисциплинам.

**Апробация работы.** Основные теоретические положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Электроэнергетика в металлургии и машиностроении» (Магнитогорск, 2008), всероссийской конференции «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий» (Уфа, 2009), 6-й Международной (17-й Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (Тула, 2010), первой и второй конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2009-2010), 61-й и 62-й конференциях «Наука ЮУрГУ» (Челябинск, 2009-2010), 17-й ежегодной конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2011).

**Публикации.** Основные положения, выводы и практические результаты изложены в 24 научных работах, включая 10 статей в журналах по перечню ВАК, 7 материалов научно-технических конференций и тезисов докладов. На оригинальные технические решения получены 6 патентов на изобретения, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программы.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста объемом 187 страниц, заключения, списка литературы из 119 наименований, трех приложений. Общий объем диссертации 223 страницы, включая 91 рисунок и 30 таблиц.

## **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** производится анализ электромагнитной обстановки в электрических сетях современных промышленных предприятий и автономных объектов, рассматриваются допустимые согласно ГОСТ 13109-97 и реально существующие уровни и виды статических и динамических искажений напряжения сети. Дается анализ основных источников помех в системах электропривода и промышленной автоматики, рассматриваются пути их проникновения в информационные каналы ВП и систем управления в целом. Приведена классификация вентильных преобразователей, их систем управления, и на основе обобщенной функциональной схемы ведомого сетью ВП показано, что наиболее восприимчивым к сигналам внешних помех и нестационарным параметрам сети является устройство синхронизации (УС).

Впервые осуществлена классификация принципов построения УС и получены их обобщающие структурные схемы, отображающие принципы обработки информации с позиций теории развертывающихся систем. Рассмотрены базовые принципы интегрирующего развертывающегося преобразования и возможность их применения для систем управления ВП. Дана классификация основных источников ошибки УС, которые возникают в сетях с нестационарными параметрами.

Определены цель и основные задачи исследований.

Разработаны этапы и единая методика оценки статической и динамической погрешности УС как таковых, так и в составе разомкнутой или замкнутой системы управления ВП. Для этого в среде имитационного моделирования Matlab+Simulink созданы универсальные модели синхронных ВП постоянного и переменного тока и библиотека моделей элементов их систем управления, включая УС и ФСУ различных классов.

**Вторая глава** посвящена исследованию группы устройств синхронизации с выборкой мгновенных значений синхронизирующего воздействия, выполненных по принципу независимой (УС-НФ), ведомой (УС-ВФ) или следящей (УС-СФ) фиксации сигнала развертки (напряжения сети).

В традиционных схемах УС-НФ (рис. 1, а) на основе сглаживающего фильтра  $\Phi$  и релейного элемента РЭ пространство статического состояния  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(\Delta\bar{A}_r, \Delta f_r)$  существенно зависит от колебаний как амплитуды, так и частоты напряжения сети (рис. 1, в), что очевидно ввиду частотно зависимых свойств  $\Phi$  и наличия зоны неоднозначности  $\pm b$  РЭ. Здесь и далее:  $\Delta\bar{\alpha}_c = (\alpha_c^* - \alpha_c) / \alpha_c$  – относительное значение ошибки угла синхронизации при его заданной  $\alpha_c = \alpha_\phi + \alpha_{рз}$  и реальной  $\alpha_c^*$  величинах;  $\alpha_\phi, \alpha_{рз}$  – составляющие угла  $\alpha_c$ , обусловленные характеристиками  $\Phi$  и РЭ соответственно;  $\Delta\bar{A}_r = (A_r^* - A_r) / A_r$  – нормированное значение фактической амплитуды  $A_r^*$  гармонического сигнала синхронизации  $X_r(t)$  по отношению к ее номинальной величине  $A_r$ ;  $\Delta\bar{f}_r = (f_r^* - f_r) / f_r$  – нормированная частота напряжения синхронизации при ее реальном  $f_r^*$  и номинальном  $f_r$  значениях.

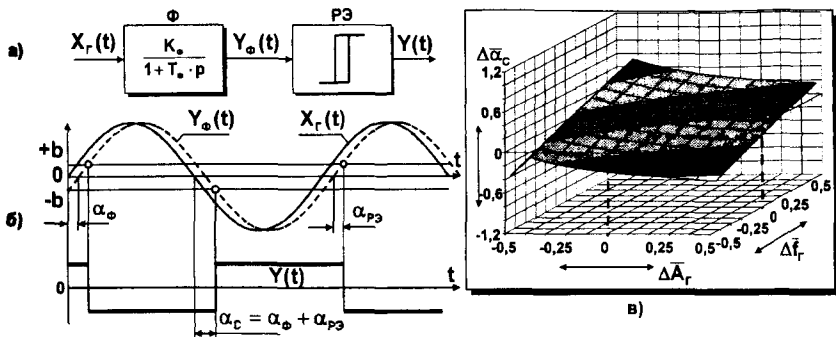


Рис. 1. Структурная схема (а), временные диаграммы сигналов (б) и пространство статического состояния  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(\Delta\bar{A}_\Gamma, \Delta\bar{f}_\Gamma)$  (в) УС-НФ

Адаптация угла синхронизации к изменяющейся амплитуде  $A_\Gamma$  напряжения сети может быть достигнута за счет выполнения условия  $\pm b = f(\pm A_\Gamma)$ , что впервые реализуется в УС-ВФ (рис. 2, а), включающем входной фильтр Ф1, линейное звено ЛЗ, амплитудный модулятор АМ, демодулятор ДМ с фильтром Ф2 и звенья  $K_{вх}$ ,  $K_{ос}$  на входе и в цепи положительной обратной связи ЛЗ.

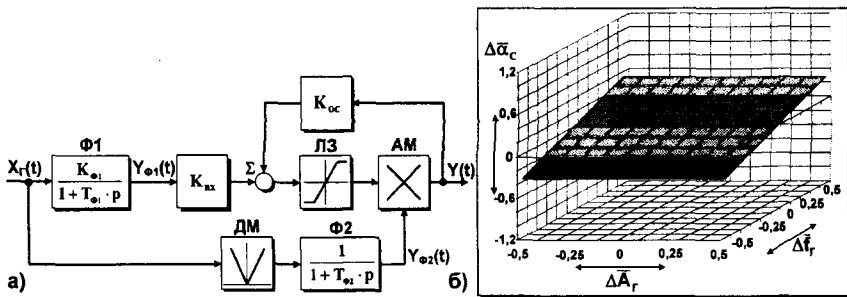


Рис. 2. Структурная схема (а) и пространство статического состояния  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(\Delta\bar{A}_\Gamma, \Delta\bar{f}_\Gamma)$  (б) УС-ВФ

В общем случае ДМ подключается к  $n$ -фазной системе переменного напряжения, когда одна из фаз выполняет также функции сигнала синхронизации. Импульсы на выходе АМ имеют частоту выходного сигнала ЛЗ, а их амплитуда определяется выходным напряжением ДМ. В результате при изменении  $\Delta A_\Gamma$  пропорционально изменяется величина сигнала положительной обратной связи и, следовательно, порогов переключения УС-ВФ. Фильтр Ф2 необходим только в УС-ВФ, работающих с однофазной сетью.

В результате характеристика  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(\Delta\bar{A}_\Gamma, \Delta\bar{f}_\Gamma)$  (рис. 2, б) зависит только от девиаций частоты напряжения сети и полностью адаптируется к колебаниям амплитуды  $\Delta\bar{A}_\Gamma$ . В работе дан анализ работы УС-ВФ при несимметричных по фазам изменениях амплитуды напряжения трехфазной сети. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, при нестабильности амплиту-



ды напряжения сети в пределах  $\pm 10\%$  ошибка угла синхронизации в УС-ВФ не превышает 0,3 эл. град.

В работе впервые предложен метод следящей фиксации двух сигналов разверток (фазных напряжений) с помощью компараторов К1 – К6 с последующим объединением результатов сравнения по логической функции «И» (рис. 3, а), предназначенный для синхронизации трехфазных «нулевых» и мостовых ВП. При отсутствии входного сглаживающего фильтра УС-СФ полностью адаптирован к изменениям  $\Delta\bar{A}_r$  и  $\Delta\bar{f}_r$  (рис. 3, б). Однако в реальных промышленных условиях эксплуатации ВП наличие входного фильтра Ф, как правило, всегда необходимо, что приводит к деформации пространства  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(\Delta\bar{A}_r, \Delta\bar{f}_r)$  по оси  $\Delta\bar{f}_r$  примерно так же, как и для УС-ВФ (рис. 2, б).

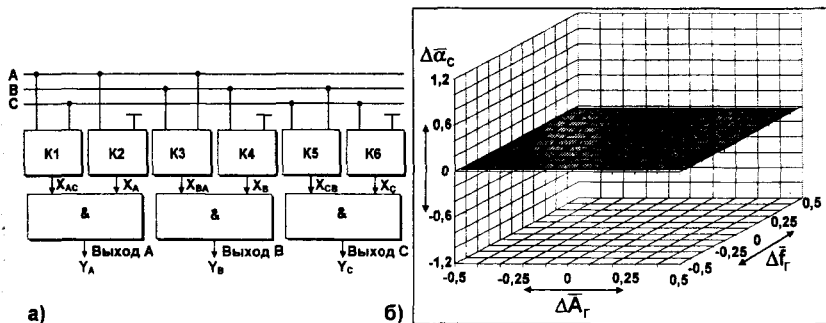


Рис. 3. Структурная схема (а) и статическое пространство  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(\Delta\bar{A}_r, \Delta\bar{f}_r)$  (б) УС-СФ

В работе показано, что для каскада «фильтр – УС-СФ» постоянная времени Ф должна обеспечивать начальный фазовый сдвиг – 60 эл. град. При этом динамическая ошибка УС-СФ по сравнению с УС-НФ примерно в 5 раз меньше, так как здесь происходит непосредственное слежение устройством синхронизации за точками естественной коммутации фаз А, В, С, а не их параметрическое сравнение с заранее заданным порогом фиксации.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ)  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(f_{вх})$  УС-СФ при наличии входного фильтра имеет характеристики апериодического звена первого порядка (рис. 4). «Провалы» ЛАЧХ обусловлены режимами замедленной дискретизации, возникающими на частотах возмущающего воздействия, превышающих  $0,5 \cdot f_r$ .

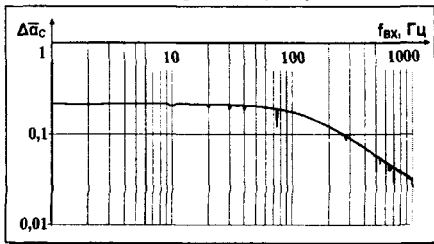


Рис. 4. ЛАЧХ  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(f_{вх})$  для каскада «фильтр - УС-СФ»

В работе определены рациональные области применения УС с выборкой мгновенных значений синхронизирующего воздействия, даны рекомендации по выбору их параметров. Отмечена, в частности, нецелесообразность применения

данного класса УС при работе ВП с энергосистемами, имеющими высокий уровень коммутационных искажений напряжения сети.

**Третья глава** посвящена исследованиям УС, в основе которых лежат методы интегрирующего развертывающего преобразования (УС-ИФ). Базовым элементом данного класса УС является автоколебательный частотно-широтно-импульсный (ЧШИМ) развертывающий преобразователь (РП) на основе РЭ и интегратора И (рис. 5, а), который при соблюдении определенных условий может переходить из автоколебательного состояния (рис. 5, б) в режим внешней синхронизации (рис. 5, в) и преобразовываться из ЧШИМ- в широтно-импульсную систему. При этом в качестве синхронизирующего воздействия могут использоваться как прямоугольные биполярные импульсы  $X_n(t)$ , так и гармонический сигнал  $X_r(t)$  напряжения сети.

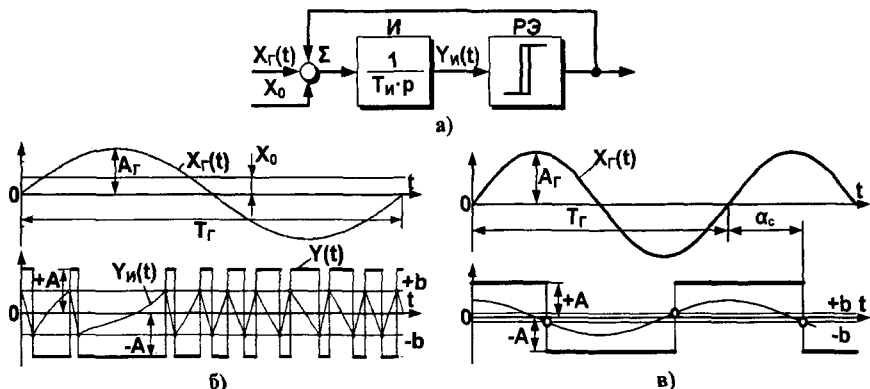


Рис. 5. Интегрирующий развертывающий преобразователь (а) и его временные диаграммы сигналов для автоколебательного режима (б) и режима внешней синхронизации напряжением сети (в)

Необходимым условием синхронизации РП прямоугольными импульсами является условие, при котором модуль вольт-секундной площади сигнала  $X_n(t)$  за его период  $T_n$  превышает модуль вольт-секундной площади выходных импульсов  $Y(t)$  за период собственных автоколебаний РП. В работе получены также условия синхронизации РП гармоническим сигналом  $X_r(t)$ .

Угол синхронизации  $\alpha_c$  (рис. 5, в) зависит от соотношения частот  $f_r / f_0$  (рис. б), где  $f_0$  – частота собственных колебаний РП, и глубины синхронизации  $\bar{A}_r = A_r / A$ . При соблюдении равенства  $f_r = f_0$  угол  $\alpha_c$  соответствует значению  $-90$  эл. град. и не зависит от колебаний величины  $\bar{A}_r$ .

Тогда статическая ошибка угла синхронизации РП отсутствует во всем диапазоне изменения параметров  $\bar{A}_r$  и  $\Delta\bar{A}_r$  (рис. 7, а), а при изменении частоты сигнала синхронизации  $X_r(t)$  ошибка  $\Delta\bar{\alpha}_c$  уменьшается по мере роста «глубины» синхронизации  $\bar{A}_r$  (рис. 7, б).

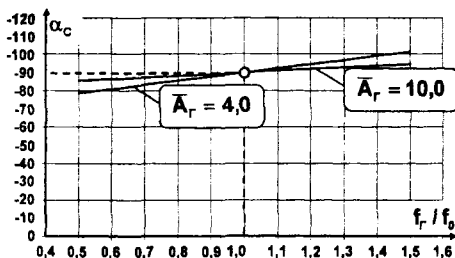


Рис. 6. Зависимость угла синхронизации от нормированной частоты синхронизирующего воздействия

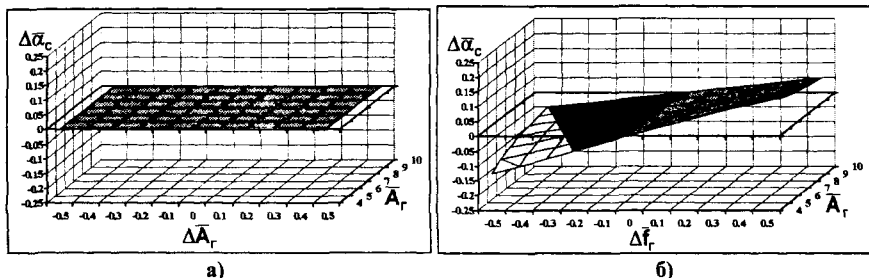


Рис. 7. Пространства статического состояния  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(\Delta\bar{A}_r, \bar{A}_r)$  (а) и  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(\Delta\bar{f}_r, \bar{A}_r)$  (б) интегрирующего «УС-ИФ» на основе РП

Анализ динамических характеристик УС-ИФ проводился относительно сигнала гармонической помехи  $X_{вх}(t) = A_{вх} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{вх} \cdot t)$ , подаваемой на вход УС совместно с полезным сигналом синхронизации  $X_r(t)$ , с помощью системы трансцендентных уравнений (1) и представлением результатов в виде пространства динамического состояния РП, а также на основе ЛАЧХ (рис. 8).

$$\left\{ \begin{aligned} t'_0 &= \frac{\bar{A}_r}{\pi \cdot \bar{f}_r \cdot f_0} \cdot [\cos^2(\pi \cdot \bar{f}_r \cdot f_0 \cdot t'_{n-1}) - \sin^2(\pi \cdot \bar{f}_r \cdot f_0 \cdot t'_n)] - (-1)^n \cdot \frac{\bar{A}_{вх}}{\pi \cdot \bar{f}_{вх} \cdot f_0} \\ &\left[ \sin\left(\pi \cdot \bar{f}_{вх} \cdot f_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot n - 1}{2 \cdot \bar{f}_r \cdot f_0} + t'_{n-1}\right)\right) \cdot \sin\left(\pi \cdot \bar{f}_{вх} \cdot f_0 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \bar{f}_r \cdot f_0} - t'_{n-1}\right)\right) + \right. \\ &\left. \sin\left(\pi \cdot \bar{f}_{вх} \cdot f_0 \cdot \left(\frac{n}{\bar{f}_r \cdot f_0} + t'_n\right)\right) \cdot \sin(\pi \cdot \bar{f}_{вх} \cdot f_0 \cdot t'_n) \right] - \frac{1}{2 \cdot \bar{f}_r \cdot f_0} + t'_{n-1} \\ t'_n &= \frac{1}{2 \cdot \bar{f}_r \cdot f_0} + t'_n - t'_{n-1} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Здесь  $t'_{n-1}$ ,  $t'_n$ ,  $t'_{n-1}$ ,  $t'_n$  — интервалы предыдущего «n-1» и последующего «n» циклов развертывающего преобразования.

При этом показано, что РП в режиме внешней синхронизации для диапазона частот  $f_{вх} \leq 0,5 \cdot f_r$  обладает свойством аperiodического звена первого по-

рядка с эквивалентной постоянной времени  $T_3 \approx \pi \cdot T_r \cdot \bar{A}_r / 16$ , зависящей от параметров сигнала синхронизации (напряжения сети).

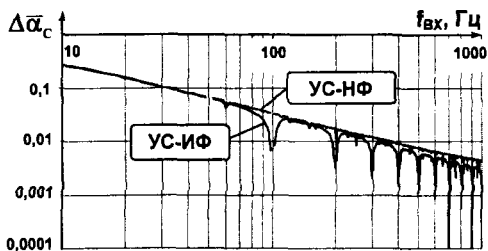


Рис. 8. Частотная характеристика  $\Delta\bar{\alpha}_c = f(f_{вх})$  каскада «фильтр – УС-ИФ» и УС-ИФ

Отличительной особенностью ЛАЧХ УС-ИФ, по сравнению с УС-ИФ (рис. 8), являются «провалы», возникающие при частотах помехи, кратных  $2 \cdot f_r$ . При этом ошибка  $\Delta\bar{\alpha}_c$  стремится к нулю (рис. 8, «УС-ИФ»). Это объясняется тем, что на полупериод полезного сигнала  $X_r(t)$  приходится целое число периодов сигнала помехи, когда ее интегральное значение равно нулю, что сохраняет неизменным значение  $\bar{A}_r$  и  $T_3$ . Это свойство интегрирующего РП обеспечивает высокую надежность работы ВП в системах, где частотный диапазон помех соответствует дискретному ряду 100, 200, 300, ... Гц. В общем случае синхронизация РП для ВП со стационарными источниками энергоснабжения должна удовлетворять условию  $2,0 \leq \bar{A}_r \leq 6,0$ , а при автономном электропитании диапазон синхронизации равен  $6,0 \leq \bar{A}_r \leq 10,0$ .

На основе интегрирующего РП впервые предложены, теоретически и экспериментально исследованы комбинированные и каскадные интегрирующие УС (рис. 9).

Простейший вариант комбинированного УС (рис. 9, а) состоит из последовательно соединенных релейного элемента РЭ0 и интегрирующего РП, причем вместо РЭ0 могут быть включены УС-ИФ (рис. 1) или УС-ВФ (рис. 2, а).

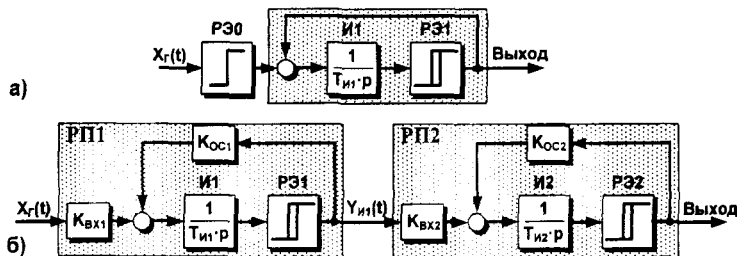


Рис. 9. Структурные схемы комбинированного (а) и каскадного (б) «УС-ИФ»

В комбинированных УС за счет прямоугольного характера импульсов на выходе РЭ0 величина  $\bar{A}_r$  может быть снижена до уровня  $1,2 \leq \bar{A}_r \leq 1,5$ , что позволяет предельно уменьшить постоянную времени  $T_3$ , расширив тем самым полосу пропускания контура синхронизации ВП.

Каскадные УС в простейшем случае представляют собой последовательно соединенные РП1, РП2, причем РП2 синхронизируется РП1. При этом ре-

зультирующий угол синхронизации  $\alpha_c = -180$  эл. град., что существенно упрощает использование подобных УС в однофазных ВП.

В работе впервые предложены и исследованы также комбинированное УС с параллельной амплитудной коррекцией сигнала синхронизации, каскадное УС с амплитудной модуляцией сигнала синхронизации РП2, каскадное УС с синхронизацией РП2 пилообразным сигналом со стороны РЭ. Дан сравнительный анализ статических и динамических характеристик интегрирующих адаптивных УС, включая область частот замедленной дискретизации, определены рациональные области применения подобных УС. Рассмотрен оригинальный метод перекрестной синхронизации каналов трехфазных ВП на основе РП.

**Четвертая глава** посвящена методам синтеза и анализу характеристик адаптивных интервало-кодовых УС. В их основе лежит идея представления выходных сигналов интегрирующих каскадных УС (рис. 9, б, рис. 10) или УС-СФ (рис. 3, а) с входными фильтрами, обеспечивающими сдвиг системы напряжений А, В, С на угол  $-30$  или  $-60$  эл. град., в виде двоичной или двоично-десятичной последовательности чисел. При этом выходные импульсы РП1 (рис. 10, д – ж) составляют младшую тетраду  $Q_2^* \dots Q_0^*$ , например, двоично-десятичного кода 8-4-2-1, а РП2 формирует последовательность  $Q_2 \dots Q_0$  (рис. 10, б – г), которая образует старшую тетраду данного кода. Старшие разряды  $Q_3^*$  и  $Q_3$  кода 8-4-2-1 принимаются равными нулю.

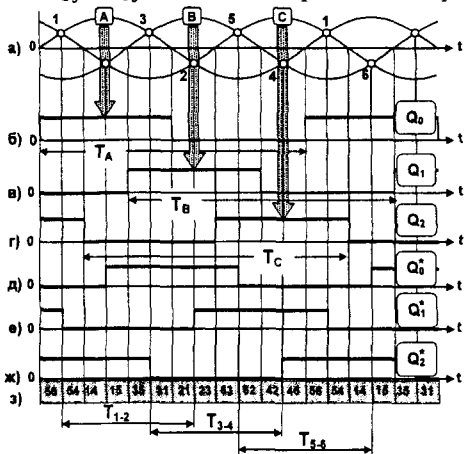


Рис. 10. Временные диаграммы каскадного интегрирующего интервало-кодового УС

В результате каждый участок трехфазной системы напряжений А, В, С продолжительностью 30 эл. град. характеризуется своей кодовой комбинацией или десятичным числом (рис. 10, з). Так, например, для интервалов  $T_{1-2}$ ,  $T_{3-4}$ ,  $T_{5-6}$  реверсивного мостового ВП, лежащих между точками естественной коммутации 1 – 2, 3 – 4, 5 – 6 (рис. 10, а), характерны три группы по шесть чисел в каждой, которые по функции «ИЛИ» легко преобразуются в сигнал синхронизации соответствующего канала ВП. Данные

УС обладают широкими функциональными возможностями, позволяющими с помощью одного УС синхронизировать различные по типу силовой схемы ВП. Кроме того, как показано в работе, с помощью интервало-кодовых УС возможно диагностирование правильности чередования фаз напряжения сети, а также формирование сигнала аварийного отключения ВП при катастрофических отказах активных компонентов схемы каналов синхронизации.

Рассмотрена схема адаптивного интервало-кодowego двоично-десятичного интегрирующего устройства синхронизации на основе каскадного УС с синхронизацией второго канала пилообразным сигналом развертки, обладающая повышенным быстродействием. Приведена методика синтеза интервало-кодowych УС на основе программируемых логических матриц и микроконтроллеров, в частности, разработано УС на базе контроллера Atmega 8535.

**Пятая глава** посвящена анализу характеристик ВП переменного и постоянного тока при работе с различными классами УС и ФСУ в условиях нестационарности параметров источника электроснабжения, а также результатам практического внедрения разработанных ВП с интегрирующими УС.

Оценка влияния канала синхронизации на характеристики трехфазного тиристорного регулятора переменного напряжения (ТРН) как в разомкнутой, так и в замкнутой системах производилась по величине относительной ошибки выходного напряжения  $\Delta \bar{U}_{\text{вых}} = (U_{\text{вых}}^* - U_{\text{вых}}) / U_{\text{вых}}^*$  при различных уровнях  $\Delta \bar{A}_r$  и углов  $\alpha_\gamma$  управления тиристорами. Здесь  $U_{\text{вых}}^*$ ,  $U_{\text{вых}}$  – реальное и требуемое напряжение на выходе ТРН соответственно. При этом считалось, что силовая схема ТРН получает электропитание от «идеального» источника, а УС синхронизировано с источником, имеющим нестабильность по амплитуде и частоте, а также содержащим коммутационные искажения.

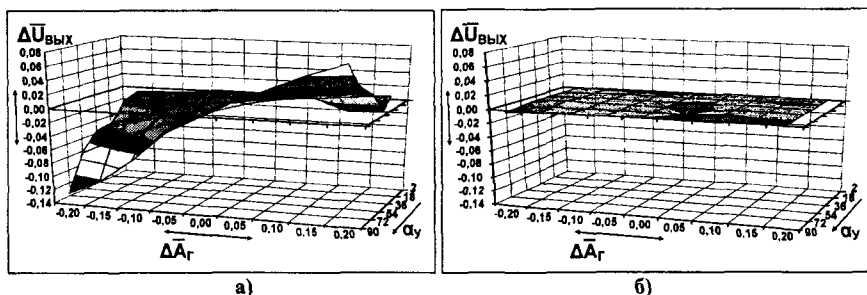


Рис. 11. Пространства статического состояния  $\Delta \bar{U}_{\text{вых}} = f(\Delta \bar{A}_r, \alpha_\gamma)$  разомкнутой структуры ТРН для УС-НФ (а) и адаптивного интегрирующего УС (б)

Синхронизация ТРН от УС-НФ существенно влияет на величину ошибки  $\Delta \bar{U}_{\text{вых}}$ , которая увеличивается с ростом  $\alpha_\gamma$  (рис. 11, а). В то же время применение интегрирующего УС (рис. 11, б) обеспечивает нулевое значение  $\Delta \bar{U}_{\text{вых}}$  во всем диапазоне изменения параметров  $\Delta \bar{A}_r$  и  $\alpha_\gamma$ , что является прямым следствием замкнутого характера структуры РП и наличия интегратора в прямом канале регулирования.

Была установлена существенная зависимость характеристик ВП от типа ФСУ. Так, в ТРН при колебаниях  $\Delta \bar{f}_r$  частоты сети величина  $\Delta \bar{U}_{\text{вых}}$  может быть существенно уменьшена путем замены ФСУ «вертикального» типа (рис. 12, а) на замкнутое интегрирующее ФСУ с синхронизацией РЭ сигналом ведущей пилообразной развертывающей функции (рис. 12, б).

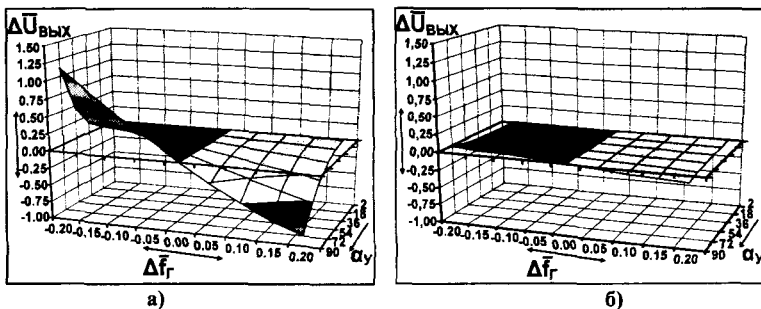


Рис. 12. Пространство статического состояния  $\Delta \bar{U}_{\text{вых}} = f(\Delta \bar{f}_r, \alpha_\gamma)$  разомкнутого ТРН с интегрирующим УС при «вертикальном» (а) и адаптивном интегрирующем (б) ФСУ

Аналогичный анализ был проведен для разомкнутой и замкнутой структур трехфазного реверсивного мостового ВП, который показал полную качественную сходимость результатов, полученных для ТРН.

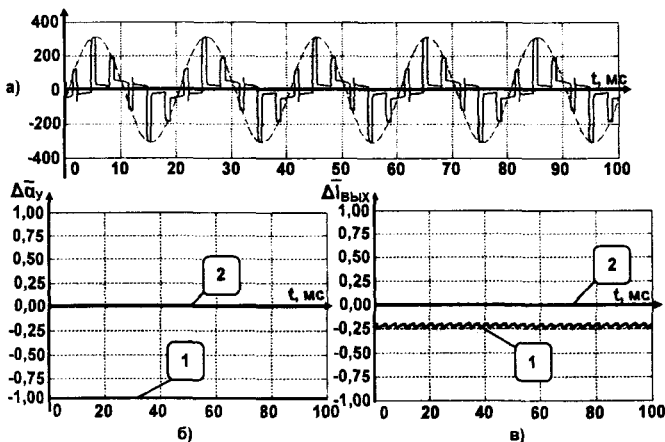


Рис. 13. Временные диаграммы напряжения сети (а), относительная ошибка угла управления (б) и тока (в) замкнутой по току структуры трехфазного мостового реверсивного ВП при наличии коммутационных искажений сети для случая УС-НФ (1) и интегрирующего УС-ИФ (2)

Произведен сопоставительный анализ работы ВП с различными типами УС при наличии амплитудной синфазной модуляции фазных напряжений высокочастотными гармониками при синхронных колебаниях напряжений фаз А, В, С для случая динамических колебаний одной из фаз, а также для коммутационных искажений в источнике энергоснабжения (рис. 13, а).

Во всех перечисленных случаях была доказана существенная эффективность адаптивных интегрирующих УС, обеспечивающих высокие регулировочные показатели ВП при их работе с нестационарной сетью.

Приведены структурные и принципиальные схемы разработанных автором цифровых ВП с адаптивными интегрирующими интервало-кодowymi УС, внедренных в промышленности и лабораторных стендах.

**Приложения к диссертационной работе.** В Приложении 1 приведены документы о внедрении результатов работы на производстве и в учебном процессе. Приложения 2, 3 содержат таблицы принятых обозначений и сокращений.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Впервые с позиций теории разветвляющихся систем произведена классификация принципов построения устройств синхронизации систем управления силовыми ВП и разработана единая обобщенная методика сопоставительного анализа их статических и динамических характеристик для широкого частотного диапазона входного гармонического сигнала.

2. На основе разработанной единой обобщенной методики и математических моделей ВП постоянного и переменного тока исследованы и сопоставлены статические и динамические характеристики УС различных классов и силовых вентильных преобразователей на их основе.

3. Теоретически и экспериментально исследованы адаптивные устройства синхронизации с ведомым уровнем фиксации сигнала развертки при однофазной и многофазной демодуляции напряжения питания фиксирующего элемента, характеризующиеся в области частот возмущающих воздействий со стороны напряжения сети до 100 Гц полной адаптацией к колебаниям амплитуды напряжения сети и частичной адаптацией к колебаниям частоты сети. При этом погрешность синхронизации УС-ВФ не зависит от девиаций амплитуды синхронизирующего воздействия, а определяется только изменениями его частоты и, по сравнению с традиционными УС типа «фильтр – релейный элемент», снижается примерно в 3 – 5 раз.

4. Впервые предложены, теоретически и экспериментально исследованы адаптивные устройства синхронизации со следящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети, фиксирующий элемент которых полностью адаптирован к колебаниям частоты и амплитуды напряжения сети, а также к асимметрии фазных напряжений. Показано неблагоприятное влияние высокочастотных помех на УС данного класса, которое может быть устранено за счет входного сглаживающего фильтра ценой утраты адаптивных свойств УС-СФ к колебаниям частоты сети и ограничения полосы пропускания на уровне 20 Гц.

5. Дан анализ статических и динамических характеристик базовой структуры интегрирующего разветвляющегося преобразователя при его работе в режиме автоколебаний и внешней синхронизации, получены условия синхронизации РП внешними периодическими сигналами, теоретически и экспериментально доказана его способность адаптироваться к параметрам синхронизирующего воздействия. Определены условия синхронизации РП для стационарных и автономных источников электроснабжения.

6. Впервые предложены, теоретически и экспериментально исследованы комбинированные УС. Показано, что для УС данного класса глубина синхрони-



зации может быть снижена до величины  $\bar{A}_r = 1,2 - 1,5$ , что обеспечивает максимальное быстродействие контура синхронизации ВП при колебаниях параметров напряжения сети. Однако комбинированные УС имеют повышенный уровень ошибок замедленной дискретизации, что ограничивает область их применения объектами с низким уровнем высокочастотных гармоник в системе электроснабжения.

7. Впервые предложен, теоретически и экспериментально исследован класс каскадных интегрирующих УС на основе двух последовательно включенных РП, работающих в режиме внешней синхронизации и отличающихся высокой помехоустойчивостью, пониженным уровнем ошибок замедленной дискретизации и широкими функциональными возможностями. Показано, что наибольшим быстродействием обладает каскадное УС, в котором второй РП синхронизируется со стороны релейного элемента пилообразным напряжением, имеющим частоту напряжения сети.

8. Произведен сравнительный анализ технических характеристик интегрирующих УС различного типа и определены области их применения. Доказана высокая помехоустойчивость и стабильность характеристик ВП с интегрирующими УС. Даны рекомендации по выбору параметров элементов схем УС.

9. Впервые предложен, теоретически и экспериментально исследован класс интервало-кодовых устройств синхронизации со следящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети и интегрирующего типа, разработана методика их синтеза на базе дискретных компонентов электроники и на основе микроконтроллеров. Разработана и экспериментально исследована схема интегрирующего интервало-кодового устройства синхронизации на основе микроконтроллера Atmega 8535, позволяющая синхронизировать любой тип вентильного преобразователя при любой фазности системы энергоснабжения.

10. На основе пакета прикладных программ MatLab+Simulink произведен сравнительный анализ характеристик ВП постоянного и переменного тока для их разомкнутой и замкнутой структур при работе с различными классами УС и ФСУ в условиях нестационарных параметров и коммутационных искажений напряжения сети. Показана зависимость характеристик ВП от принципа построения УС и ФСУ, выявлено, что наилучшими показателями обладают силовые вентильные преобразователи, в состав которых входят интегрирующие УС на основе РП и интегрирующие фазосдвигающие устройства замкнутого типа.

11. Показано, что при наличии коммутационных помех их влияние на работу ВП с замкнутой структурой и УС на основе каскада «фильтр – релейный элемент» обеспечивается лишь в узком диапазоне углов управления силовыми вентилями, в то время как при интегрирующем канале синхронизации работоспособность силового преобразователя сохраняется во всем диапазоне изменения углов управления, причем независимо от того, является структура ВП замкнутой или разомкнутой.

12. Разработан и экспериментально исследован тиристорный регулятор переменного напряжения с цифровым управлением и интервало-кодовым интегрирующим алгоритмом синхронизации, предназначенный для плавного пус-

ка асинхронных электродвигателей, который внедрен в комплексе асинхронных электроприводов гидропресса №8 линии отделки труб большого диаметра 1020-1220, а также в системе ЗПЧ – 5ПЧ энергоснабжения 20Гц 160В рольгангов цеха №6 ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» (ЧТПЗ).

13. Разработан, экспериментально исследован и внедрен в регуляторе температуры сушильной камеры 120ЕК электроцеха ОАО ЧТПЗ тиристорный регулятор напряжения с частотно-широотно-импульсным регулированием и интервало-кодовым интегрирующим каналом синхронизации, обладающий повышенными энергетическими показателями за счет реализуемой в нем частотно-широотно-импульсной модуляции. Суммарный годовой экономический эффект от промышленного внедрения результатов диссертационной работы составил 440520 руб. (в ценах 2011 г).

14. Разработанные в среде «Matlab + Simulink» математические модели силовых ВП и элементов их систем управления, а также действующие образцы ВП постоянного и переменного тока с цифровым управлением внедрены в учебный процесс кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ЮУрГУ по дисциплинам «Преобразовательная техника», «Элементы систем автоматики», «Системы управления электроприводами» и «Системы управления вентильными преобразователями».

## ПУБЛИКАЦИИ

### В журналах, рекомендованных ВАК России:

1. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 2 (34)/2009. – С. 35–41.

2. Цытович, Л.И. Числоимпульсные фазосдвигающие устройства для систем импульсно-фазового управления тиристорными преобразователями / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 3 (35)/2009. – С. 42–51.

3. Адаптивная система синхронизации трехфазного мостового реверсивного тиристорного преобразователя / Л.И. Цытович, А.В. Качалов, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 11. – № 15 (148). – С. 45–50.

4. Датчики напряжения (тока) с повышенной временной и температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, Н.А. Логинова, А.В. Качалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12. – № 34 (167). – С. 45–50.

5. Цытович, Л.И. Интегрирующая интервало-кодовая синхронизация реверсивных тиристорных преобразователей / Л.И. Цытович, А.В. Качалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – № 14 (190). – С. 36–39.

6. Качалов, А.В. Синхронизация систем импульсно-фазового управления вентильных преобразователей на базе интегрирующего развертывающего

преобразователя / А.В. Качалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – № 14 (190). – С. 40–46.

7. Качалов, А.В. Интегрирующие устройства синхронизации для систем импульсно-фазового управления вентильными преобразователями / А.В. Качалов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 1 (37)/2010. – С. 42–51.

8. Качалов, А.В. Перекрестная интегрирующая система синхронизации для реверсивного вентильного преобразователя / А.В. Качалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 103–108.

9. Цытович, Л.И. Интервал-кодовая синхронизация вентильных преобразователей / Л.И. Цытович, А.В. Качалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 139–143.

10. Интегрирующие развертывающие преобразователи с повышенной температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 10. – С. 38–43.

#### **В других изданиях:**

11. Адаптивная интегрирующая система управления реверсивным тиристорным преобразователем электроприводов постоянного тока / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Сборник научных трудов международной конференции «Электроэнергетика в металлургии и машиностроении». – Магнитогорск, 2008. – С. 69–74.

12. Качалов, А.В. Интегрирующее устройство синхронизации для систем управления тиристорными преобразователями / А.В. Качалов // Научный поиск: материалы первой научной конференции аспирантов и докторантов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 250–253.

13. Интегрирующий переключатель характеристик для реверсивных тиристорных преобразователей / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов. – Вып. 16. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2009. – С. 193–194.

14. Цытович, Л.И. Интегрирующий датчик нулевого тока для реверсивных тиристорных преобразователей с раздельным управлением / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов. – Вып. 16. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2009. – С. 195–197.

15. Тиристорный преобразователь для электроприводов с питанием от автономных энергетических установок / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции: в 2-х т. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – Т. 1. – С. 124–129.

16. Адаптивное к нестабильности напряжения сети компараторное устройство синхронизации со следящей фиксацией сигнала разверток / А.В. Качалов, Л.И. Цытович, Н.А. Тюменцева, Н.С. Фокина //Наука ЮУрГУ: материалы 62-й научной конференции. Секции технических наук – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 3. – С. 96–99.

#### **Патенты и свидетельства:**

17. Пат. № 2373624 Российская Федерация, МПК H02M 1/08, H02P 1/16. Фазосдвигающее устройство / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин. – № 2008142656/09; заявл. 27.10.2008; опубл. 20.11.2009, Бюл. № 32. – 16 с.

18. Пат. № 2383985 Российская Федерация, МПК H02M 1/08. Устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин. – № 2008142655/09; заявл. 27.10.2008; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7. – 13 с.

19. Пат. № 2390906 Российская Федерация, МПК H02M 1/08, G06G 7/12. Датчик нулевого тока / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин. – № 2009114056/09; заявл. 13.04.2009; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 8 с.

20. Пат. № 2396683 Российская Федерация, МПК H02M 1/084. Система импульсно-фазового управления / А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, Л.И. Цытович. – № 2009128430/09; заявл. 22.07.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22. – 7 с.

21. Пат. № 2400910 Российская Федерация, МПК H02M 1/08. Адаптивное устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин. – № 2009113408/09; заявл. 09.04.2009; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27. – 8 с.

22. Пат. № 2400911 Российская Федерация, МПК H02M 1/08. Устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин. – № 2009113987/09; заявл. 13.04.2009; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27. – 7 с.

23. Пат. № 89259 Российская Федерация, МПК G09G 7/12. Преобразователь напряжения в частоту импульсов / А.В. Качалов, М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин. – № 2009129046/22; заявл. 27.07.2009; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. – 2 с.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611012. Формирователь импульсов синхронизации интервало-кодowego устройства синхронизации системы управления трехфазного вентильного преобразователя / А.В. Качалов. – заявка № 2010617539; заявл. 29.11.2010; зарегистр. 28.01.2011.