

На правах рукописи



Левин Константин Юрьевич

Прецизионный стабилизатор переменного напряжения  
для светотехнических измерений

Специальность:  
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2011

Работа выполнена на кафедре «Микроэлектронные системы» Московского авиационного института (государственного технического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Шевцов Даниил Андреевич

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Краснопольский Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Мыцык Геннадий Сергеевич

доктор технических наук, профессор

Резников Станислав Борисович

Ведущая организация:

ОАО "ГОКБ "Прожектор"

Защита диссертации состоится « 17 » \_\_\_\_\_ мая 2011 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Учёный совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета).

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан 12 апреля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.125.07  
к.т.н., доцент



А. Б. Кондратьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

В современной технике выдвигаются высокие требования к параметрам используемых устройств. Для обеспечения этих требований следует повышать точность измерений в процессе производства и контроля параметров изготавливаемых изделий (пускорегулирующей аппаратуры (ПРА), люминесцентных и светодиодных ламп).

При измерении различных характеристик электроприборов (мощность, коэффициент мощности, КПД, и т.д.) существенный вклад в погрешность измерений вносит нестабильность сетевого напряжения. Допустимое отклонение действующего значения переменного напряжения в сетях общего назначения от номинала составляет 5% (предельное – 10%), в соответствии с ГОСТ 13109-97. Для электроснабжения метрологических лабораторий и измерительных стендов нормативными документами рекомендуется использовать источники вторичного электропитания (ИВЭП), в т.ч. стабилизаторы, классом точности не хуже 0.5 и контролем среднеквадратичного значения напряжения (Root Mean Square (RMS)). Следует отметить, что на практике в случаях, не требующих столь высокой точности, используется выходной контроль по среднему значению. Такую высокую точность способны обеспечить несколько типов стабилизирующих ИВЭП переменного напряжения, в т.ч. электронные, релейно-трансформаторные и с управляемым резонансом.

Существует несколько подходов к улучшению характеристик указанных ИВЭП. Это выбор подходящей схемы устройства, совершенствование средств контроля и разработка эффективных методов анализа и настройки устройств.

В качестве наиболее подходящего типа рассматривается и исследуется электронный стабилизатор переменного напряжения с управляемым резонансом.

Для разработки схем ИВЭП требуется создание эффективных методов моделирования и анализа систем управления индуктивно-емкостными преобразователями электроэнергии с оценкой их устойчивости, адекватности моделирования различных режимов работы.

Следует отметить, что известные средства контроля источников переменного напряжения с необходимой точностью (0.1-0.3%) отличаются сложностью, высокой стоимостью, недостаточной функциональной гибкостью и их построение представляет сложную техническую задачу. Поэтому создание автоматизированной системы сбора, анализа, визуализации данных о параметрах напряжения, с помощью которой можно решить указанную задачу, также представляется, несомненно, актуальным.

В данной работе рассмотрены анализ и улучшение эксплуатационных характеристик стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом методами имитационного и математического моделирования, что востребовано в современной технике.

### **Цель:**

Исследование прецизионного стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом и разработка методов его проектирования.

### **Задачи:**

- Исследовать существующие типы стабилизаторов для обоснования выбора стабилизатора напряжения с управляемым резонансом.
- Исследовать стабилизатор переменного напряжения с управляемым резонансом для выявления возможностей его совершенствования.
- Провести моделирование стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом с учетом функциональных особенностей его системы управления и силовой части для анализа режимов их работы и путей обеспечения заданных выходных характеристик.

- Разработать методы улучшения настроек и средства автоматического контроля параметров разрабатываемого оборудования.

- Создать опытный образец и экспериментально исследовать предложенные методы улучшения его характеристик.

#### **Методы исследований:**

Для решения поставленных в работе задач используются общие положения теории цепей, вычислительные методы, теория функции комплексной переменной, теория автоматического управления, современные инструментальные системы имитационного компьютерного моделирования MATLAB и ANSYS, а также физическое (натурное) моделирование.

#### **Научная новизна:**

1. Создана функционально-полная модель стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом, состоящая из электронных компонентов и стандартных звеньев теории автоматического управления (ТАУ), и проведен ее анализ при варьировании параметров элементов для выявления источников возникновения погрешностей.

2. Адаптирован метод идентификации линейных систем для нахождения передаточных функций, что позволило улучшить характеристики конкретных устройств (проверен как на модели, так и в реальном эксперименте).

3. Разработана линеаризованная математическая модель стабилизатора на основе полученных методами идентификации передаточных функций, что позволяет применять частотные методы при исследовании устойчивости работы стабилизатора.

4. Предложен метод настройки цифровой адаптивной обратной связи (ЦАОС) и сформулированы критерии оценки (структурные, частотные) ее настройки, что позволило минимизировать статическую погрешность стабилизации напряжения на 1-2 порядка.

#### **Практическая значимость:**

1. Разработанные модели стабилизатора с управляемым резонансом позволяют вскрыть существенные особенности функционирования и улучшить выходные характеристики устройства.

2. Адаптированные методы идентификации и анализа нелинейных систем автоматического управления (САУ) повышают эффективность их настройки, (в т.ч. стабилизаторов и пускорегулирующей аппаратуры (ПРА)).

3. Применение стабилизатора с управляемым резонансом позволяет существенно повысить точность измерений за счет снижения погрешности стабилизации на 1-2 порядка питающих напряжений.

4. Созданный измерительный комплекс для контроля параметров источников переменного напряжения позволяет сохранять, обрабатывать и отображать экспериментальные данные в автоматическом режиме, что значительно повышает эффективность контроля параметров источников переменного напряжения.

**Достоверность научных результатов** обеспечена адекватностью моделирования, надежностью систем математического моделирования MATLAB и ANSYS, справедливостью использования приближений и практическим экспериментированием на образцах стабилизатора напряжения мощностью 5кВт.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Функционально-полная модель стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом, выявляющая особенности поведения системы при варьировании параметров элементов.

2. Метод идентификации линейных систем для нахождения их передаточных функций указывающий пути улучшения характеристик конкретных устройств (проверен как на модели, так и в реальном эксперименте).

3. Математическая модель стабилизатора на основе полученных методами идентификации передаточных функций, позволяющая применять частотные методы при исследовании устойчивости работы стабилизатора.

4. В исследуемой системе существует область линейности, где поведение системы описывается передаточной функцией построенной на основе колебательного звена.

5. Метод настройки ЦАОС и сформулированные на его основе критерии оценки настройки (структурные, частотные) обеспечивающие минимизацию статической погрешности стабилизации.

6. Использование двухконтурного построения системы управления с разнесением контуров в частотной области, позволяющее значительно упростить техническую реализацию устройства.

#### **Реализация результатов работы:**

Прецизионный стабилизатор переменного напряжения с управляемым резонансом, а также методика частотного анализа параметров аппаратуры приняты к внедрению в ООО “ВНИСИ”, г. Москва (подтверждено соответствующим актом внедрения).

Кроме того, методика автоматического анализа сложных временных процессов при внешнем воздействии использована в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН) в материалах заключительного отчета по НИР “Редукция-133-РАН” в рамках ФЦП “Редукция –133” (подтверждено соответствующим актом внедрения).

#### **Апробация работы:**

По результатам диссертации опубликовано 10 работ: 3 в журналах из списка ВАК, 2 статьи в сборниках трудов конференций, 3 отчета по федеральным целевым программам, а также несколько публикаций в сборниках тезисов всероссийских конференций. Основные положения работы докладывались на научных семинарах кафедры «Электротехники и Микропроцессорной Электроники» НИТУ “МИСиС”, на заседании кафедры 306 МАИ (ГТУ), а также на Всероссийской светотехнической конференции “Свет без границ” (Москва, 2009г.).

#### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержит 155 стр. текста, 110 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 104 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается выбор научного направления и актуальность темы диссертации. Кратко рассмотрены существующие проблемы, сформулированы цели, задачи, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор известных систем формирования питающих напряжений, их параметров, принципов работы, характеристик. Дан анализ возможных видов отклонений параметров сетевого напряжения. Для проведения измерительных операций в светотехнике рекомендуемая погрешность действующего значения сетевого напряжения составляет 0.5%, что говорит о необходимости более точной стабилизации напряжения.

Проведенный обзор применяемых измерительных схем и оценка погрешности измерений, возникающей при отклонениях параметров напряжения от номинала, также говорят о необходимости повышения стабильности питающего напряжения.

Найденные типовые методы расчета, моделирования и оптимизации систем управления преобразователями электроэнергии с применением Electronics Workbench (MultiSim), MATLAB, PSpice, LabView, Proteus, Compaq Visual Fortran, Microsoft VC++, Borland Delphi и др. сложны и не универсальны.

С целью нахождения подходящего источника напряжения рассмотрены характерные параметры существующих типов стабилизаторов переменного напряжения

(электрохимические, релейно - трансформаторные, электронные, с управляемым резонансом, феррорезонансные), обозначены их недостатки и определены области применимости, приведены типовые схемы, рассмотрены принципы работы, проведен патентный поиск, где показаны структурные схемы и пояснены принципы управления существующих устройств. В их числе рассмотрены серийно выпускаемые стабилизаторы переменного напряжения фирм НПП ИНТЕПС, ГК ШТИЛЬ, N-Power, ССК-СТАБИТЕК, Solby-FNEX, среди которых погрешность 0.5% обеспечивает только стабилизатор фирмы НПП ИНТЕПС Lider PS15000SQ-D, относящийся к релейно-трансформаторному типу, что жестко ограничивает его характеристики количеством коммутируемых обмоток. Кроме того, недостатку в этом образце отсутствует фильтрация высших гармоник. В заключение приведен сравнительный анализ характерных параметров различных типов стабилизаторов.

В этой главе показано, что при проведении светотехнических и электротехнических измерений (контроль мощности, коэффициента мощности, КПД, и т.д.) большой вклад в точность результатов вносит качество используемой электроэнергии, поэтому требуется использовать источники переменного напряжения повышенной стабильности выходных параметров. Измерительным целям больше всего соответствует тип стабилизаторов с управляемым резонансом, и в частности, измерительный стабилизатор переменного напряжения (ИСН) с управляемым резонансом. Для удовлетворения повышенным требованиям к точности выходных параметров необходима существенная доработка данного типа стабилизаторов. Аналогичной схемы стабилизатора с надлежащими характеристиками в рассмотренных материалах не найдено, поэтому требуется дальнейшее проведение исследований.

**Во второй главе** рассматривается устройство – стабилизатор переменного напряжения - предназначенное для работы в сетях 50-60 Гц, при отклонениях входного напряжения  $U_{вх}$  не более 10% от номинала, для нагрузок мощностью до 5кВт и коэффициенте мощности нагрузки  $K_a > 0.8$ . Выходное напряжение устройства с сетевой частотой отклоняется не более чем на 0.5% от номинала, содержит не более 3% высших гармоник, что удовлетворяет вышеупомянутым стандартам.

Устройство представлено в виде двух взаимосвязанных частей – силовой части (объекта регулирования) и управляющей системы.

В работе рассмотрены принципы его функционирования, выделены структурные элементы (блоки), выявлены взаимосвязи, построена структурная схема (рис.1).

Система управления измеряет действующее значение (RMS) выходного напряжения  $U_d$  и управляет силовой частью в соответствии с интегралом отклонения RMS от номинала, синхронизация осуществляется по первой гармонике выходного напряжения.

Входное напряжение  $U_{вх}$  подается на вход силовой части стабилизатора. Блок RMS вычисляет действующее значение выходного напряжения  $U_{вых}$ .

Интегратор – интегрирующий усилитель – усиливает и интегрирует поступающий на его вход сигнал разности уставки (заданного управляющего потенциала) и RMS выходного напряжения. Результат интегрирования подается на один вход компаратора. Блоки интегратора и компаратора реализуют фазоимпульсную модуляцию (ФИМ). На второй его вход поступает пилообразный сигнал, синхронизированный по фазе с первой гармоникой напряжения  $U_{вых}$ . Выходной сигнал компаратора управляет тиристорами силовой части. Таким образом, система управления обеспечивает заданные параметры выходного напряжения ( $U_d$ ,  $\delta U$ ) стабилизатора.

Далее в работе рассмотрено устройство блоков, приведены виды сигналов, проанализированы причины ухудшения выходных параметров ( $\delta U$ ,  $K_g$ , КПД), предложены методы устранения недостатков системы управления.

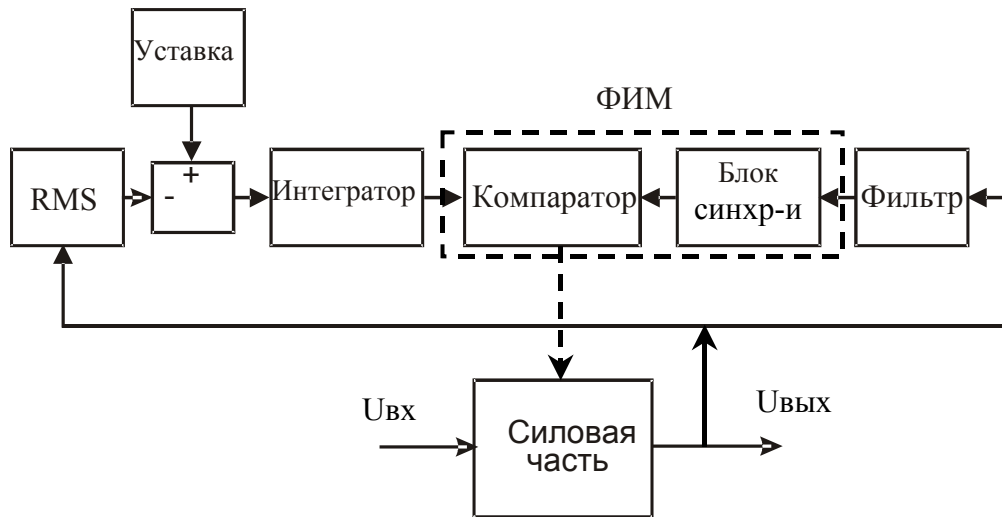


Рис.1 Структурная схема системы управления стабилизатором переменного напряжения  
 Для адекватной настройки системы управления проведен анализ свойств объекта регулирования - силовой части. Принципы ее работы поясняет схема рис.2. Оценены области применимости данной схемы, как по параметрам входного напряжения, так и по характеру нагрузки.

Силовая часть построена по так называемой схеме управляемого резонанса (по полурезонансной схеме), в которой резонанс в цепи "вольтодобавочный дроссель – вольтодобавочный конденсатор" управляется с помощью коммутируемого дросселя и симистора. Изменение угла открывания симистора изменяет выходное напряжение, и это позволяет поддерживать его на заданном уровне. Подключение коммутируемого дросселя приводит к изменению формы тока вольтодобавочного дросселя, а следовательно и к искажению формы выходного напряжения. Вследствие чего в выходном напряжении возникают высшие гармоники. Эти искажения формы выходного напряжения устраняются фильтрами.

Регулирование напряжения осуществляется изменением фазового угла включения симистора (встречно-параллельно включенных тиристоров) VT, что позволяет осуществлять частичное включение коммутируемого дросселя  $L_{ком}$ . Для управления симистором VT используется блок фазового управления БФУ (система управления).

В результате исследований выявлено, что для определения значений параметров настройки системы управления необходимо использовать математическое моделирование, поскольку аналитический расчет работы предложенной схемы трудоемок в связи с ее сложностью, нелинейностью и наличием многих параметров для настройки. Большинство погрешностей в номиналах элементов не вносят значительного вклада в точность выходных параметров из-за конструктивных особенностей схемы устройства. Основным источником погрешностей является вычислитель среднего значения выходного напряжения.

Следует отметить, что использование среднего значения вместо действующего (в связи со сложностью точного вычисления последнего) значительно ускоряет процесс регулирования, но требует дополнительной корректировки процесса регулирования (коэффициент формы не постоянен и зависит от разных факторов), что возможно при введении дополнительного контура управления, который компенсирует указанную погрешность.

**В третьей главе** на основе разработанной структурной схемы (рис.1) построена функциональная схема (рис.3) – функционально-полная (гибридная) модель системы управления и объекта регулирования, иллюстрирующая работу стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом. Моделирование проводилось при помощи MathWorks MATLAB 7.7.

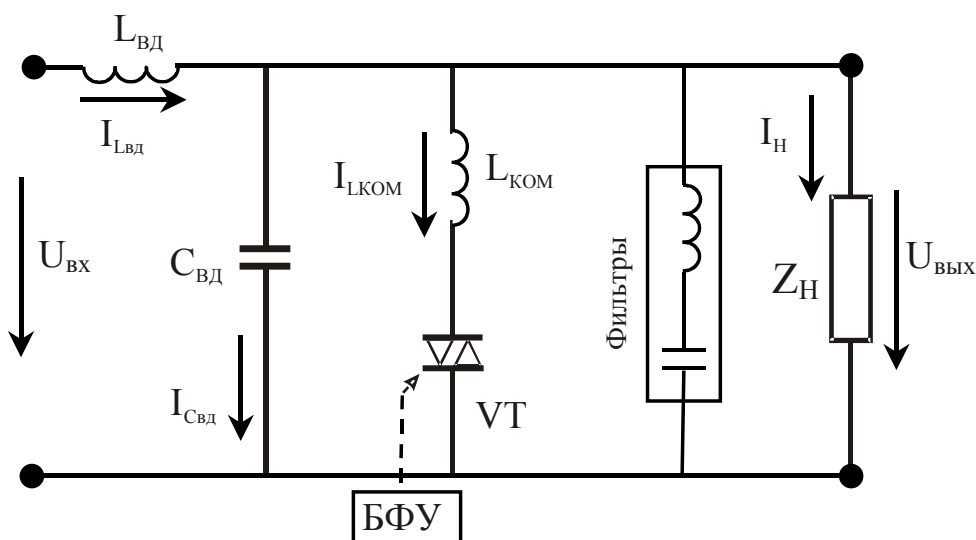


Рис. 2. Принципиальная схема силовой части стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом, где :  $L_{вд}$  — вольтодобавочный дроссель;  $L_{ком}$  — коммутируемый дроссель;  $C_{вд}$  — вольтодобавочный конденсатор; Фильтры — фильтры высших гармоник; VT — оптосимистор (встречно-параллельно включенные тиристоры); БФУ — блок фазового управления – система управления;  $Z_n$  – сопротивление нагрузки.

Далее описаны блоки модели, их устройство и принцип работы, приведены виды сигналов на их выходах.

Силовая часть модели (блок 1), представленной на рис. 3, соответствует принципиальной схеме рис 2. Входное напряжение подается на вход стабилизатора источником переменного напряжения  $U_{in}$ . Выходное напряжение снимается с узла  $U_{out}$ . Блок 3 (RMS), вычисляет действующее значение выходного напряжения, измеренное блоком 2 – вольтметром.

Блок 6 – интегрирующий усилитель – усиливает и интегрирует поступающий на его вход с блока 5 сигнал разности уставки (блок 4) и RMS (блок 3) выходного напряжения. Результат работы блока 6 подается на 2-й вход компаратора 9.

Блок 7 – фильтр – выделяет первую гармонику выходного напряжения, формирует сигнал для цепи синхронизации. Он имеет передаточную функцию активного неинвертирующего фильтра, построенного на основе конверторов полного сопротивления.

Блок 8 – синхронизатор – формирует пилообразный сигнал, поступающий на блок 9 (компаратор), который сравнивает синхронизирующий сигнал, с постоянным напряжением на выходе интегратора 6.

Таким образом, происходит управление тиристорным блоком 10, который осуществляет подключение коммутируемого дросселя  $L_{drcom}$  в силовой части.

На основе электрической схемы силовой части и блок-схемы системы управления построена модель с применением MATLAB-SIMULINK, которая позволяет оценить влияние параметров электронных компонентов на выходные параметры устройства. При помощи Simscare оценено влияние погрешностей параметров электронных компонентов на угол включения оптоотиристоров и на гармонический состав выходного напряжения. Для приближения объекта регулирования к реальности в его модель введен нелинейный дроссель, что дало возможность оценить влияние его нелинейности на работу системы управления и на выходные параметры устройства в целом. Для учета нелинейности объекта регулирования был разработан метод моделирования нелинейных дросселей с произвольной формой магнитопровода с использованием систем моделирования MATLAB и ANSYS.



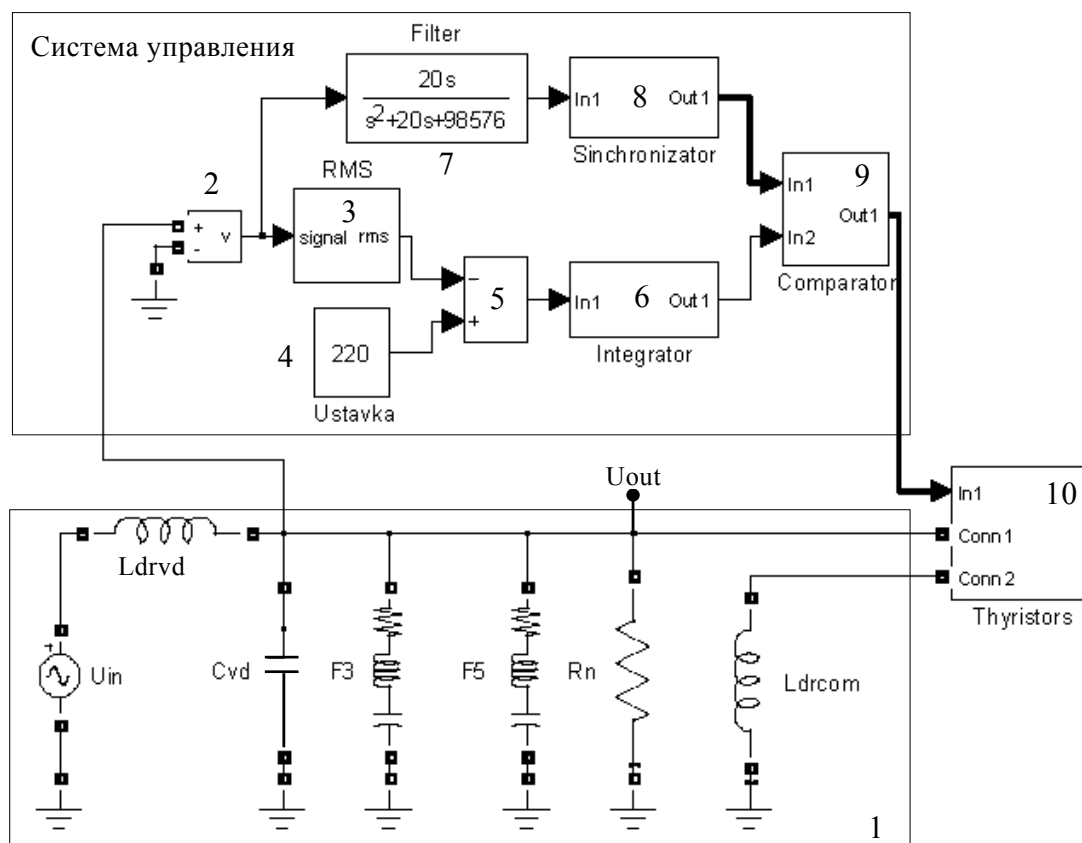


Рис. 3. Функциональная схема системы управления в составе гибридной модели стабилизатора переменного напряжения в среде MATLAB

В процессе исследования показано, что сигналы, формируемые в модели из стандартных блоков (использованы как линейные звенья, так и типовые нелинейные элементы) идентичны сигналам в модели, построенной с использованием аналогов электронных компонентов. Также исследованы динамические характеристики модели, при этом выявлены особенности поведения устройства (в частотной области) при изменении входного напряжения и коммутации нагрузки. В результате проведенного анализа доказана адекватность функциональной модели стабилизатора при моделировании различных режимов работы.

Вместе с тем, при практическом использовании модели стабилизатора важны вопросы обеспечения заданных характеристик – устойчивости, точности выходных параметров, и т.д. Для решения указанных задач традиционно применяются частотные методы анализа. С целью приложения указанных методов к анализу рассматриваемой модели, последняя должна быть сведена к явному математическому виду, чему посвящена следующая глава.

**В четвертой главе** рассмотрены и использованы методы идентификации систем применительно к переходным процессам в системе управления стабилизатором переменного напряжения.

Для идентификации анализируемого устройства была построена измерительная система, структурная схема которой представлена на рис.4.

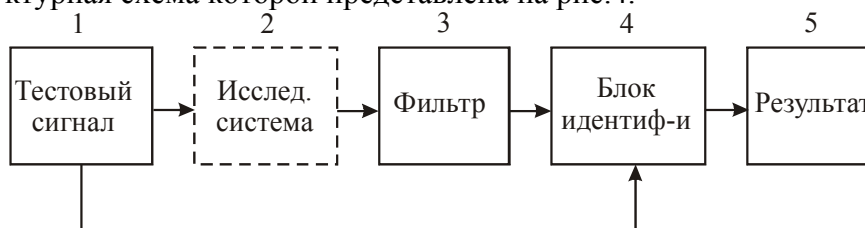


Рис. 4. Структурная схема измерительной системы для идентификации стабилизатора

Для упрощения решения задачи идентификации передаточные функции системы искались в линейной области, которая выбиралась как по входному напряжению для силовой части, так и по амплитуде сигналов в системе управления.

Поиск передаточных функций производился по виду переходных процессов (например, рис.5) и соответствие аналитического описания с экспериментом оценивалось при помощи интегрального модульного критерия.

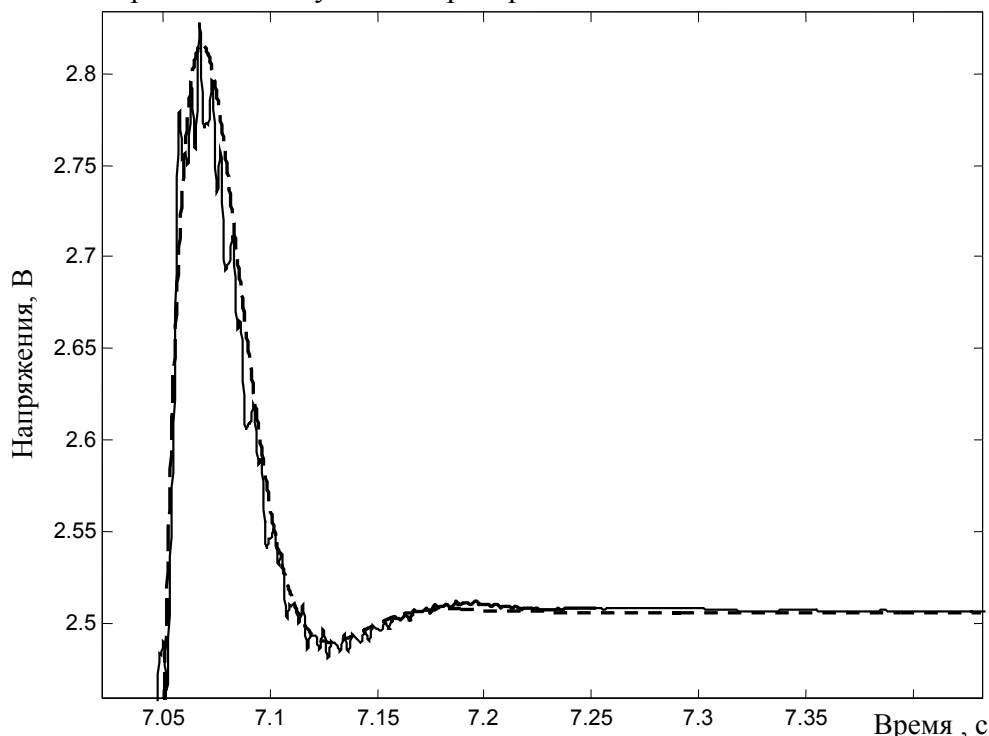


Рис. 5. Вид переходного процесса по стабилизирующему каналу TF1. --- математическое описание; — эксперимент.

Передаточной функции TF1 по стабилизирующему каналу соответствует диаграмма Найквиста рис. 6. С помощью амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) рис.6 были оценены характеристики и определены области работоспособности стабилизирующего звена TF1.

С использованием найденных передаточных функций и стандартных нелинейных звеньев была построена структурная схема (рис.7) математической модели стабилизатора.

На вход структурной схемы подается синусоидальное переменное напряжение, (частота первой гармоники – 50Гц). На выходе модели формируется сигнал изменения RMS выходного напряжения стабилизатора.

Для построения математической модели в окончательном виде, описывающей динамику отклонений RMS от номинала при фиксированной нагрузке, был использован численный метод сшивания передаточных функций TF1, TF2, Delay.

Звено TF1 имеет передаточную функцию  $W_{TF1}$ :

$$W_{TF1}(s) = K_1 * \frac{1 + T_3 * s}{(T_1 * s)^2 + T_2 * s + 1}$$

$$T_1 = 0.01478; T_2 = 0.00975; T_3 = -0.0002731; K_1 = 1$$

Где  $T_1, T_2, T_3$  – постоянные времени составляющих колебательного процесса,  $K_1$  – коэффициент усиления звена TF1.

Звено TF2 имеет передаточную функцию  $W_{TF2}$ :

$$W_{TF2}(s) = \frac{K_2}{s(1 + T_4 * s)}$$

$K_2 = -28.144$ ;  $T_4 = 0.016803$ ;

где  $K_2$  - коэффициент усиления звена TF2;  $T_4$  - постоянная времени звена TF2.

Звено запаздывания Delay имеет передаточную функцию  $W_{\text{delay}}$ :

$$W_{\text{delay}}(s) = \exp(-T_d \cdot s)$$

$T_d$  - время запаздывания ;  $T_d = 0.006$ .

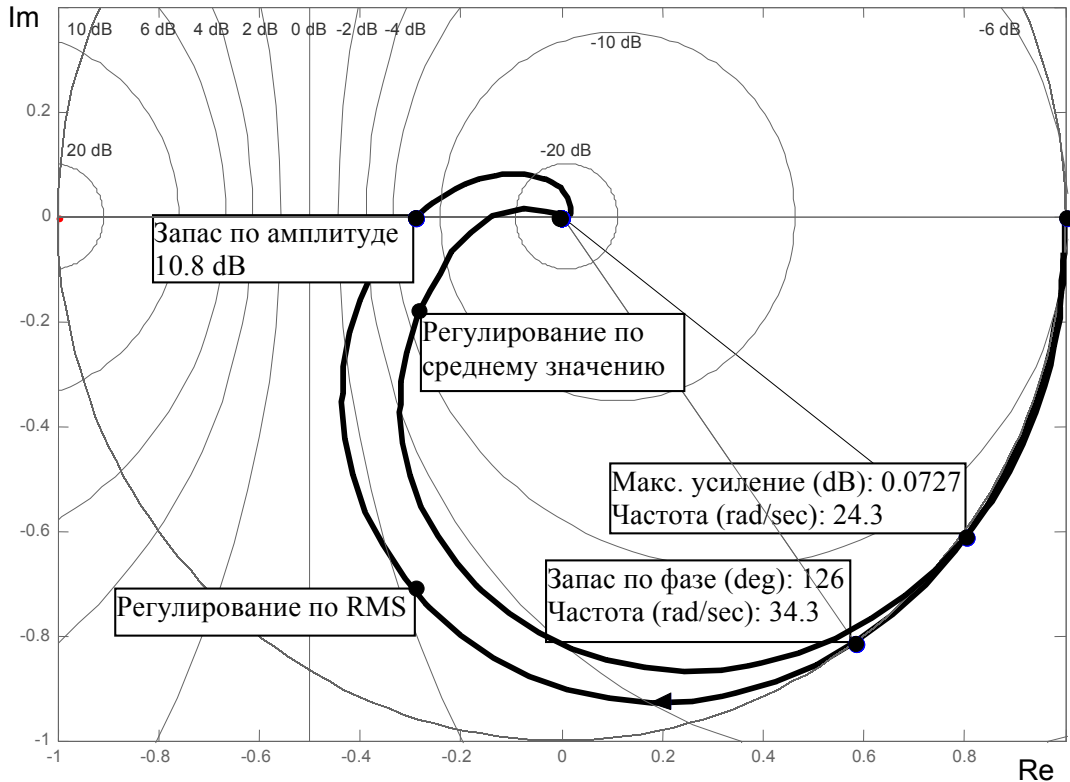


Рис. 6. АФЧХ аналитически подобранной передаточной функции по стабилизирующему каналу.

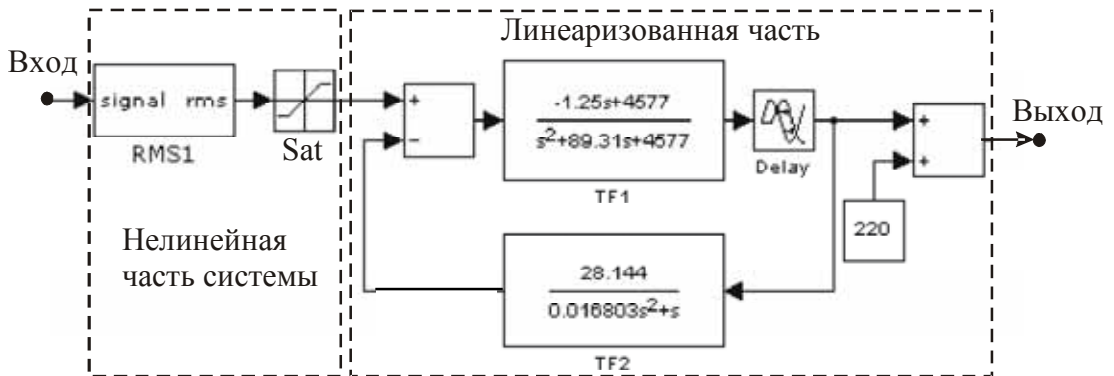


Рис. 7. Структурная схема математической модели стабилизатора на основе передаточных функций

Звено насыщения имеет передаточную функцию  $W_{\text{sat}}$ :

$$W_{\text{sat}} = \begin{cases} x, & |x| \leq 22 \\ 22 \operatorname{sign}(x), & |x| > 22 \end{cases}$$

Результат сшивания линеаризованной части представлен в стандартном виде общей теории САУ:

$$\begin{cases} dx/dt = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

Где:  $x$  – обобщенный вектор состояния, размером  $N_x=4$ ;  $u(x,t)$  – вектор входного сигнала, размером  $N_u=1$ ;  $y(x,t)$  – вектор выходного сигнала, размером  $N_y=1$ ;

$A$  - квадратная матрица размером  $N_x \times N_x$ ;  $B$  - матрица размером  $N_x \times N_u$ ;

$$A = \begin{bmatrix} -89.31 & -71.52 & 0 & -209.4 \\ 64 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 286.1 & -59.51 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$C$  - матрица размером  $N_y \times N_x$ ;  $C = [-0.1563 \ 8.939 \ 0 \ 0]$ ;

$D$  - матрица размером  $N_y \times N_u$ ;  $D = [0]$ .

В построенной модели учитывается аппроксимированная фазой внутренняя задержка  $T_d = 0.006$ .

Было проведено исследование характеристик построенной математической модели с применением диаграмм Боде, Найквиста, корневых методов исследования устойчивости.

С помощью построенной математической модели было оценено влияние задержек и коэффициента усиления в каналах передачи сигнала на устойчивость системы управления. Также были разработаны математические модели для описания поведения системы при различных нагрузках и частотах сетевого напряжения.

В этой главе при построении математической модели стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом на основе передаточных функций было показано, что исследуемая система имеет область линейности, в которой она хорошо описывается найденной передаточной функцией. Из анализа диаграмм Найквиста, карт нулей и полюсов для найденных передаточных функций сделан вывод о том, что система имеет область устойчивости с достаточным запасом по фазе и коэффициенту усиления.

Полученное аналитическое описание соответствует ранее построенной модели из стандартных звеньев и является удобным инструментом для анализа реальных устройств при изменении их параметров (частота, нагрузка). Это позволит оптимизировать способы формирования RMS и построить соответствующую схему цифрового уточняющего контура, рассмотренную в следующем разделе.

**В пятой главе** рассмотрены и реализованы методы повышения точности выходных параметров. Построен дополнительный уточняющий контур – ЦАОС, воздействующий на значение уставки основного аналогового контура стабилизации. Описаны основные принципы его функционирования. Приведена структурная схема алгоритма прошивки микроконтроллера (рис.8). Параметры шагов 16 и 18 выбирались по результатам анализа математической модели.

Для проверки принципа работы уточняющего контура был собран макет с использованием дешевого, серийно выпускаемого микроконтроллера Atmel Mega8.

Также была разработана методика тонкой настройки фильтра для силовой части на основе специальной программы для автоматического сбора, обработки и анализа информации о переменном напряжении, построенной с помощью средств MATLAB 7.7 и Velleman SDK.

Результатом работы программы является построенный на базе экспериментальных данных график зависимости количества гармоник в выходном напряжении от емкости фильтра (рис.9).



Рис.8. Алгоритм работы управляющей программы микроконтроллера в ЦАОС.

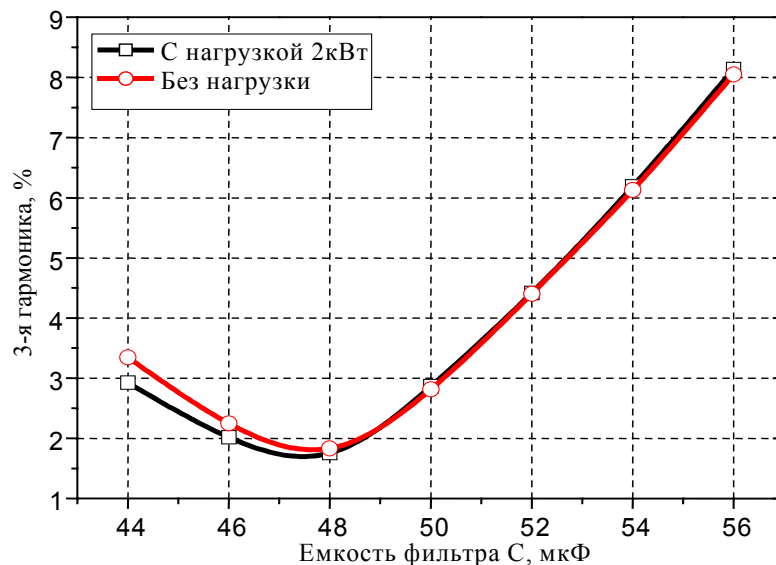


Рис.9. Зависимость уровня 3-й гармоники в выходном напряжении от емкости фильтра

В этой главе показано (в т.ч. экспериментально), что существует несколько методов повышения точности параметров выходного напряжения. В том числе, компенсация падения напряжения на диодах, введение цифрового уточняющего контура (ЦАОС) и метод тонкой подстройки ФНЧ силовой части. Наиболее эффективными методами, дающими значительное улучшение качества выходного напряжения, являются ЦАОС и тонкая подстройка параметров ФНЧ. Также в главе показано, что применение моделирования значительно упрощает процесс разработки методов уточнения выходных параметров.

**В шестой главе** рассмотрено экспериментальное оборудование, применявшееся для исследований, представлены фотографии экспериментального образца и экспериментальных стендов.

Проведено исследование основных эксплуатационных характеристик экспериментального образца и лабораторного макета.

Таблица 1.

Характеристики стабилизатора напряжения ИСН-05-1

Входное напряжение	220 ± 22 В
Выходное напряжение	220 ± 1.1 В
Частота входного напряжения	50 Гц
Количество высших гармоник в выходном напряжении	не более 3%
Номинальная мощность	5 кВт
Минимальный коэффициент мощности нагрузки	0.75 при Pmax
Время перерегулирования	0.5 с
Вес	не более 55 кг
Рабочий диапазон температур	-15 - +45°C
Срок службы	не менее 7 лет
Защита от короткого замыкания	да
Режим работы	непрерывный
Класс защиты	IP20
Изменение нагрузки	0-100%
Перегрузочная способность	150% в течение 5 минут

Также рассмотрен измерительный комплекс для автоматического контроля параметров переменного напряжения с графическим интерфейсом на базе ПК и осциллографической приставки Velleman PCSU-1000.

В дополнение приведен пример использования стабилизатора и разработанного метода частотного анализа для улучшения качества светотехнической продукции.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по работе.

**В приложениях** 1 и 2 даны примеры программ получения данных измерительного комплекса и частотного анализа линейных систем, соответственно.

### **Основные результаты и выводы**

1. Создана функционально-полная (гибридная) модель стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом с использованием электронных компонентов и стандартных звеньев ТАУ, позволяющая исследовать поведение системы при варьировании параметров элементов.

2. Показано, что в исследуемой системе управления переходные процессы наиболее адекватно описываются передаточной функцией, построенной на основе колебательного звена.

3. Построена математическая модель стабилизатора на основе передаточных функций, полученных методами идентификации, позволяющая применять частотные методы в процессе настройки.

4. Построен и внедрен в производство (подтверждено актом внедрения) опытный образец, экспериментально исследованы предложенные экспериментальные методы улучшения характеристик за счет совершенствования системы управления.

5. Улучшены характеристики стабилизатора переменного напряжения с управляемым резонансом за счет современных методов моделирования, идентификации и анализа сложных нелинейных систем автоматического управления, в результате чего статическая погрешность стабилизации снижена на порядок.

6. Предложенный метод стабилизации переменного напряжения с использованием управляемого резонанса способен обеспечить требуемое по ГОСТ Р МЭК 923-98 качество питающего напряжения при проведении измерений.

#### **Список публикаций**

1. Краснопольский А.Е. Левин К.Ю. и др. Прецизионные стабилизаторы напряжения для светотехнических измерений. Практическая силовая электроника N31, 2008 М.: ММП-Ирбис, с.37-41.
2. Левин К.Ю. Создание портативного измерительного комплекса для контроля параметров источников переменного напряжения. - Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. №9/2009, М.: НАУЧТЕХИЗДАТ, 2009, с.20-23.
3. Левин К.Ю. Прецизионный стабилизатор напряжения для светотехнических измерений. Электроника НТБ, №5, 2010 – М.: РИЦ “Техносфера”, с.86–88.
4. Краснопольский А.Е. Левин К.Ю. Прецизионные стабилизаторы напряжения. Труды Российской светотехнической конференции 2009г. с.269-272.
5. Левин К.Ю. и др. Выбор оптимальной магнитной системы для сепарации магнитоуправляемых сорбентов. Сборник трудов Всероссийской конференции “Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы”, 2010 – М.: изд. ИПРИМ. с.35–40.
6. Тезисы докладов Всероссийской конференции “Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред””, 2010 – М.: изд. ИПРИМ. с.98.
7. Левин К.Ю., Левин Ю.К. Выбор оптимальной магнитной системы для сепарации магнитоуправляемых сорбентов. Тезисы докладов Всероссийской конференции “Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы”, 2009 – М.: изд. ИПРИМ.
8. Левин К.Ю. Отчет о научно-исследовательской работе (заключительный). Оценка возможности и эффективности методов изменения физических характеристик приповерхностного слоя (шифр - "Редукция-133-РАН") (этап 3). //Разделы 4.3, 4.4 – разработка методики автоматического анализа сигналов в частотной области. – М.: изд. ИПРИМ, 2010, с.55-67.
9. Левин К.Ю. ОТЧЕТ о научно-исследовательской работе. Разработка алгоритмов обработки гидроакустической информации с целью определения расстояния до объекта. //Раздел 7. Исследование и разработка принципов построения и путей создания многоканальных гидроакустических систем освещения обстановки с цифровой пространственно-временной обработкой, устанавливаемых на самолетах-амфибиях и судах в интересах повышения эффективности проведения поисково-спасательных и гидрографических работ (шифр - "Веер-РАН") (этап 2). - М.: изд. ИПРИМ, 2007.
10. Левин К.Ю. ОТЧЕТ о научно-исследовательской работе. Аэрогидродинамические аспекты физико-химических процессов в гетерофазных газожидкостных и полижидкостных средах при воздействии различных физических полей (заключительных этап). //Раздел 5.7. - разработка методов частотного анализа временных сигналов. – М.: изд. ИПРИМ, 2008.