

Четин Андрей Николаевич

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ  
ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ВТОРИЧНОГО  
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АППАРАТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность: 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной  
техники и систем управления

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в  
Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт  
вычислительных комплексов им. М.А. Карцева»  
(АО «НИИВК им. М.А. Карцева»), г. Москва

Научный руководитель: **Сорокин Сергей Александрович**,  
кандидат технических наук, генеральный конструктор  
Акционерного общества «Научно-исследовательский  
институт вычислительных комплексов им. М.А. Кар-  
цева» (АО «НИИВК им. М.А. Карцева»), г. Москва

Официальные оппоненты: **Жуков Дмитрий Олегович**,  
доктор технических наук, профессор, заместитель  
директора по научной работе института комплексной  
безопасности и специального приборостроения Феде-  
рального государственного бюджетного образователь-  
ного учреждения высшего образования «Московский  
технологический университет» (МИРЭА), г. Москва

**Заика Петр Никанорович**,

кандидат технических наук, главный специалист Об-  
щества с ограниченной ответственностью  
«НТЦ АКТОР» (ООО «НТЦ АКТОР»), г. Зеленоград

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Научно-  
производственное объединение «Алмаз»  
(ПАО «НПО «Алмаз»), г. Москва

Защита диссертации состоится «26» апреля 2018 г. в 14 часов 00 мин. на  
заседании диссертационного совета Д.217.047.01 в Федеральном государственном  
унитарном предприятии «Научно-исследовательский и экспериментальный инсти-  
тут автомобильной электроники и электрооборудования» (ФГУП НИИАЭ) по  
адресу: 105187, г. Москва, ул. Кирпичная, д. 39-41.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГУП НИИАЭ по  
адресу: 105187, г. Москва, ул. Кирпичная, д. 39-41.

Автореферат разослан «06» марта 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 217.047.01,  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник



Варламов О.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Устройства вычислительной техники в современных условиях в абсолютном большинстве случаев играют первостепенную по важности роль базовых элементов промышленного оборудования, инфраструктуры связи, транспорта, систем управления отраслями народного хозяйства и финансово-экономической сферой, находят всё большее применение в сферах медицины и при решении разнообразных задач наращивания потенциала обороноспособности страны. И в ближайшей перспективе эта роль будет только возрастать в связи с дальнейшими задачами информатизации всех сфер жизни и переходом к цифровой экономике. Сбои в работе устройств вычислительной техники и последующие, даже кратковременные, отказы в функционировании систем управления энергетическими и оборонными объектами, оборудования металлургических и химических производств, способны нанести крайне весомый материальный и социально-экономический ущерб, а, в ряде случаев, привести к катастрофическим последствиям как локального, так и глобального масштаба.

Поэтому всестороннее решение задач дальнейшего повышения безотказности функционирования устройств вычислительной техники, с учётом их роли в современном мире, бесспорно, является крупнейшей современной научно-технической проблемой. Среди направлений повышения безотказности устройств вычислительной техники специфическую важную роль играет проблема безотказности систем управления электропитанием, в свою очередь, имеющая целый ряд аспектов, связанных как с особенностями функционирования, рабочими параметрами и назначением вычислительных устройств, так и с особенностями структуры и конфигурации систем их электропитания. В этой связи, важными и перспективными направлениями исследований и разработок в этой области являются синтез и анализ усовершенствованных моделей, описывающих особенности функционирования систем управления электропитанием (СУЭ) аппаратуры вычислительной техники (АВТ) с точки зрения обеспечения безотказности. В свою очередь, разработка подобных моделей является необходимым звеном в последующем решении задач оптимального выбора существующих схем и параметров СУЭ АВТ, синтеза их новых более эффек-

тивных поколений, разработки принципиально новых **СУЭ АВТ** с улучшенными техническими характеристиками. Ввиду обоснованной целесообразности использования **СУЭ АВТ** комбинированного класса с централизованной (**ЦЧ**) и распределенной (**РЧ**) частями, первая из которых обеспечивает многоуровневое сопряжение с системой электроснабжения объекта и формирует промежуточную шину постоянного тока с высококачественными показателями электроэнергии, проблема повышения безотказности **СУЭ АВТ** в определяющей мере связана с обеспечением безотказности **ЦЧ** системы вторичного электропитания (**СВЭП**) за счёт разработки и применения различных методологий резервирования и алгоритмов управления резервированием. При условном делении существующих методов повышения безотказности **ЦЧ СВЭП** на технологические, эксплуатационные и структурные методы, именно последние, опирающиеся на возможности создания и применения высокоэффективных схем резервирования с инновационными алгоритмами управления процессами замещения, ввиду перспектив дальнейшего развития и недостаточной степени разработанности, представляют сегодня наибольший интерес в контексте обеспечения безотказности аппаратуры вычислительной техники и систем управления. Немаловажной является роль разработки высокоэффективных схем резервирования на базе усовершенствованных моделей безотказности **ЦЧ СВЭП** и для решения задачи максимального снижения доли оперативного участия обслуживающего персонала в восстановлении её работоспособности.

Приведённые соображения свидетельствуют о важности дальнейших теоретико-экспериментальных исследований в области разработки и совершенствования моделей анализа и структурных методов обеспечения безотказности **ЦЧ СВЭП АВТ**, а также об актуальности темы данной диссертационной работы, посвящённой исследованию общих свойств и принципов функционирования **ЦЧ СВЭП АВТ** с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик, а также разработке моделей, методов и алгоритмов обеспечения их безотказности.

**Объект исследования** – модели, методы и алгоритмы обеспечения безотказности централизованной части системы вторичного электропитания аппаратуры вычислительной техники.

**Предмет исследования** – теоретические модели и структурные методы повышения безотказности централизованной части системы вторичного электропитания аппаратуры вычислительной техники на основе совершенствования схем резервирования и алгоритмов замещения.

### **Цель работы**

Целью работы является разработка модели отказов, адаптированного структурного метода расчета показателей безотказности и усовершенствованного модернизированного алгоритма резервирования применительно к задаче безотказного функционирования централизованной части системы вторичного электропитания аппаратуры вычислительной техники.

### **Задачи работы**

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие научные задачи:

1. На базе аналитического обзора опубликованных результатов теоретических исследований и прикладных разработок по рассматриваемой проблематике осуществлены систематизация, сравнительный анализ и классификация существующих способов построения **ЦЧ СВЭП** аппаратуры вычислительной техники, методов и алгоритмов управления процессами повышения безотказности **ЦЧ СВЭП**.

2. Синтезирована усовершенствованная версия теоретической модели отказов **ЦЧ СВЭП**, включающая описание рабочих процессов и структурной схемы надёжности, описание множества критериев возникновения и процессов развития отказов **ЦЧ СВЭП**.

3. Разработан адаптированный структурный метод расчёта показателей безотказности резервируемых систем с различными алгоритмами управления применительно к **ЦЧ СВЭП** в условиях отсутствия её оперативного обслуживания в межрегламентные периоды эксплуатации.

4. На базе синтезированной модели и предложенной версии метода расчёта показателей безотказности реализован анализ эффективности различных способов построения, схем резервирования **ЦЧ СВЭП** и алгоритмов обеспечения их безотказности, реализован выбор модифицированной алгоритмической схемы резервирования, оптимизированной по критериям безотказности применительно к условиям ограниченной аппаратной избыточности **ЦЧ СВЭП**.

5. Осуществлена практическая реализация результатов исследований по разработке моделей и методов повышения безотказности **ЦЧ СВЭП**, в рамках которой внедрён предложенный модернизированный способ резервирования и оптимизированный алгоритм замещения, позволяющие обеспечить заданный уровень безотказности в условиях ограниченной аппаратной избыточности и отсутствия оперативного обслуживания в межрегламентные периоды эксплуатации.

**Методы исследования** базируются на апробированных положениях теории электрических цепей, использовании методов теории вероятностей, стохастического анализа, теории марковских процессов, а также методов линейного программирования и компьютерно-математического моделирования в программном пакете MathCAD.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Синтезирована модель надёжности **ЦЧ СВЭП**, основанная, в отличие от аналогов, на графоаналитическом описании процесса развития её отказа с использованием структурной схемы надежности, направленного графа переходов и системы дифференциальных уравнений с начальными условиями, учитывающая произвольный количественный состав и структурную взаимосвязь силовых каналов и контрольно-управляющих узлов.

2. Разработан структурный метод расчёта безотказности с использованием направленного графа переходов и его математического описания с помощью однородного марковского процесса, адаптированный к **ЦЧ СВЭП**, и отличающийся от известного метода расчёта безотказности резервируемых невосстанавливаемых систем дополнительным учётом значения и распределения электрической нагрузки между включёнными силовыми каналами.

3. Предложен способ смешанного скользящего резервирования « $N+1+K$ » с соответствующим управляющим алгоритмом замещения, отличающийся использованием режима временной и ситуационной ротации основных и резервных силовых каналов для обеспечения заданной безотказности **ЦЧ СВЭП** в условиях её ограниченной аппаратной избыточности и отсутствия оперативного обслуживания в межрегламентные периоды эксплуатации.

**Теоретическая значимость** результатов исследований заключается в дополнении базы научных знаний в области создания и исследования общих

свойств и принципов функционирования схем вторичного электропитания комбинированного класса с повышенными показателями безотказности централизованной части для устройств вычислительной техники, включая модель отказов с учетом произвольного количественного состава и структурной взаимосвязи силовых каналов и контрольно-управляющих узлов, а также структурный метод расчёта показателей безотказности, учитывающий уровень и распределение электрической нагрузки между силовыми каналами.

**Практическая ценность** результатов, представленных в работе, определяется тем, что их использование позволяет повысить показатели безотказности **ЦЧ СВЭП**, предназначенных для применения в средствах вычислительной техники, к безотказности которых предъявляются повышенные требования.

Практическая значимость основных результатов работы подтверждена актом внедрения, а отдельные результаты в области создания перспективных средств вторичного электропитания с повышенными показателями безотказности защищены 4 патентами на полезные модели.

**На защиту выносятся:**

1. Модель отказов **ЦЧ СВЭП**, учитывающая произвольный количественный состав и структурную взаимосвязь силовых каналов и контрольно-управляющих узлов, позволяющая применить её к любым вариантам реализации **ЦЧ СВЭП**.

2. Структурный метод расчёта показателей безотказности, адаптированный к **ЦЧ СВЭП**, учитывающий значения и распределение электрической нагрузки между её силовыми каналами и обеспечивающий повышение достоверности результатов расчёта по сравнению с известными методами.

3. Способ смешанного скользящего резервирования и усовершенствованный алгоритм замещения по оптимизированной схеме « $N+1+K$ » **ЦЧ СВЭП** с использованием режима временной и ситуационной ротации основных и резервных силовых каналов, обеспечивающий заданную безотказность **ЦЧ СВЭП** в условиях её ограниченной аппаратной избыточности и отсутствия оперативного обслуживания в межрегламентные периоды эксплуатации.

4. Результаты практической реализации основных положений и выводов теоретических исследований, полученные при разработке системы преобразования электроэнергии типа **СПЭ-Б-27/2** для высокопроизводительных

устройств вычислительной техники, с подтверждением эффективности предложенного способа резервирования и управляющего алгоритма замещения по критерию показателя безотказности.

**Достоверность** выводов и рекомендаций подтверждается использованием в исследованиях апробированных моделей теории электрических цепей; строгих корректных методов математической физики, методов теории вероятностей, стохастического анализа, теории марковских процессов и корректностью применяемых математических преобразований; применением апробированных методов компьютерно-математического моделирования в среде MathCAD; отсутствием противоречий с известными теоретическими положениями; согласованностью результатов, получаемых для предельных частных случаев, с представленными в научной литературе результатами других исследований и опытными данными.

### **Реализация результатов**

Результаты, полученные в работе, использованы при создании:

– источников вторичного электропитания в ОКР «Мегалит-Б», выполненной АО «НИИВК им. М.А. Карцева» в период с 2007 по 2010 г.г. по государственному контракту с Министерством обороны Российской Федерации;

– автоматизированной системы преобразования электрической энергии в ОКР «Перспектива-СПЭ», выполненной АО «НИИВК им. М.А. Карцева» в период с 2011 по 2013 г.г. в рамках Федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008 – 2015 годы по государственному контракту с Министерством промышленности и торговли Российской Федерации.

– интеллектуальных систем энергообеспечения и управляемых источников питания модульного типа, разработанных ООО «Компания промышленная электроника», для технологического оборудования, обеспечивающего реализацию технологий, основанных на быстропротекающих физических процессах.

### **Публикации**

По теме диссертации автором опубликована 31 работа, в том числе 11 публикаций в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, и 4 патента на полезные модели.



## **Апробация работы**

Основные положения работы были представлены автором в виде докладов на 2 семинарах и 4 конференциях:

– Научно-техническом семинаре «Перспективные системы вторичного электропитания на основе модулей из состава унифицированной компонентной базы, разрабатываемой в ОКР «Мегалит-Б-ВК», (г. Санкт-Петербург, ОАО «Авангард», 2009 г.);

– Научно-техническом семинаре «Электронные модули вторичного электропитания», (г. Санкт-Петербург, ОАО «Авангард», 2010 г.).

– Десятой научно-технической конференции «Системы и источники вторичного электропитания и элементная база для них», (г. Москва, Группа компаний «Электронинвест», 2010 г.);

– Всероссийской научно-технической конференции «Научно-технические проблемы электропитания» (г. Москва, НИУ «Московский авиационный институт», 2011 г.);

– Всероссийской научно-технической конференции «Электропитание-2011» (г. Москва, НИУ «Московский энергетический институт», 2011 г.);

– Всероссийской научно-технической конференции «Электропитание-2012» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, 2012 г.).

## **Структура и объём диссертационного исследования**

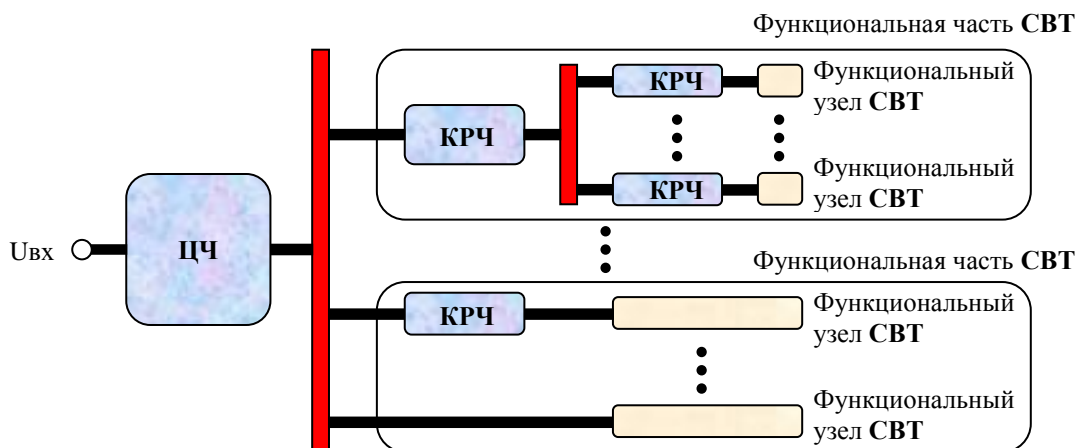
Диссертация изложена на 157 страницах общего текста и состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения; содержит 34 рисунка и список литературы из 105 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи диссертационной работы, показана научная новизна полученных результатов, практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту и сведения об апробации работы.

В первой главе проведены обзор, сравнительный анализ и классификация существующих способов построения и методов повышения безотказности СВЭП аппаратуры вычислительной техники.

Централизованные, распределенные и комбинированные СВЭП, относящиеся к одноимённым классам этих систем, имеют свои достоинства и недостатки и могут быть оптимальными в определенных областях применения. В ответственных средствах вычислительной техники (СВТ), к безотказности которых предъявляются повышенные требования, целесообразно использование СВЭП комбинированного класса (см. рис. 1), содержащих централизованную (ЦЧ) и распределенную (РЧ) части, с организацией между ними промежуточной силовой шины постоянного тока с повышенными показателями качества электроэнергии.



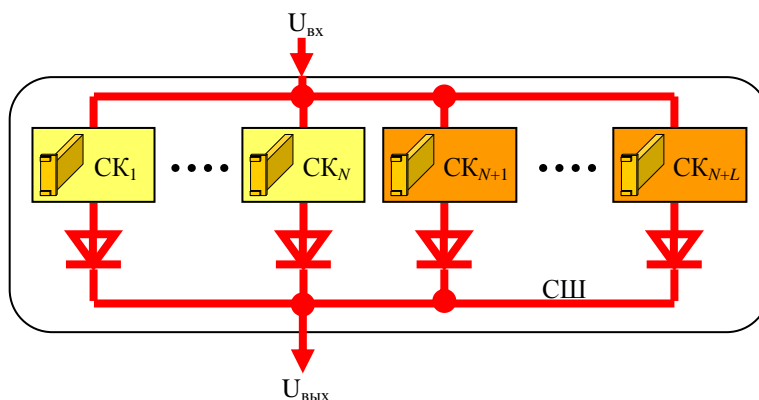
ЦЧ – централизованная часть; КРЧ – компонент распределённой части

Рис. 1 – Укрупненная структура комбинированной СВЭП

Учитывая сложность построения и большую значимость для СВЭП в целом, именно ЦЧ СВЭП требует принятия большего числа мер по повышению безотказности. Согласно предложенной классификации можно выделить ЦЧ СВЭП с моноблочной, модульной и магистрально-модульной архитектурой построения, а методы повышения безотказности СВТ, вообще, и ЦЧ СВЭП, в частности, условно разделены на технологические, структурные и эксплуатационные методы.

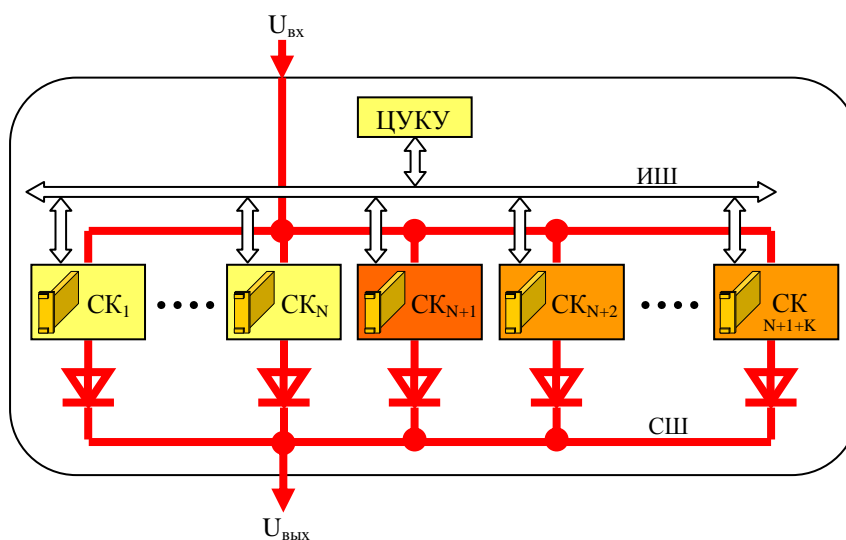
Установлено, что для обеспечения в ЦЧ СВЭП требуемой безотказности и максимального снижения влияния человеческого фактора в процессе эксплуа-

тации, наилучшим образом подходят модульная (см. рис. 2) и магистрально-модульная (см. рис. 3) архитектуры построения, а из методов повышения безотказности – структурные методы, основанные на резервировании мощности отдельных силовых каналов (СК).



СК – силовой канал; СШ – силовая шина

Рис. 2 – ЦЧ СВЭП с модульной архитектурой



СК – силовой канал; СШ – силовая шина; ИШ – информационная шина;

ЦУКУ – центральный узел контроля и управления

Рис. 3 – ЦЧ СВЭП с магистрально-модульной архитектурой

Выявлено, что для модульной архитектуры целесообразно применять нагруженное скользящее резервирование СК, а для магистрально-модульной архитектуры – смешанное скользящее резервирование СК, при котором один из резервных СК находится в нагруженном режиме, а остальные – в ненагруженном режиме.

Для дальнейшей оценки и выбора способа резервирования и управляющего алгоритма замещения критерием выступает соображение о том, что **ЦЧ СВЭП** должна обеспечивать безотказную работу в непрерывном круглосуточном режиме с заданным уровнем вероятности в течение расчётного времени, соответствующего годовому межрегламентному периоду её эксплуатации.

**Во второй главе** выполнены синтез модели отказов, выбор и адаптация структурного метода расчёта показателей безотказности применительно к **ЦЧ СВЭП**.

Анализ известных структурных методов, применимых для расчёта показателей безотказности **ЦЧ СВЭП**, таких как: метод прямого перебора состояний, метод минимальных путей, метод минимальных сечений и метод расчёта систем, поведение которых описывается «схемой гибели» – показал, что наилучшим образом подходит последний. Модель отказов, используемая в данном методе, включает в себя структурную схему надёжности и направленный граф переходов, описываемый однородным марковским процессом.

При синтезе модели отказов принято следующее:

- **ЦЧ СВЭП** содержит  $M$  идентичных параллельных **СК**, из которых условно  $N$  являются основными, а  $L$  – резервными;
- **ЦЧ СВЭП** может содержать до  $M$  идентичных контрольно-управляющих узлов (**КУУ**) **СК**, являющихся внешними по отношению к **СК** и входящих в подсистему контроля и управления **ЦЧ СВЭП**;
- элементы, входящие в состав **СК** и **КУУ**, имеют экспоненциальный закон распределения наработки до отказа;
- рассматривается период непрерывной работы до отказа **ЦЧ СВЭП**, в течение которого восстановление её отказавших составных частей не проводится.

Установлено, что расчёт показателей безотказности выбранным методом с использованием синтезированной модели отказов, на основе рекомендаций справочников по расчёту надёжности и других аналогичных источников, приводит к возникновению методической ошибки и получению недостоверных результатов. В связи с этим проведена адаптация модели и метода расчёта применительно к **ЦЧ СВЭП** с учетом её особенностей, связанных с параллельной работой **СК** и особенностей структуры самих **СК**. В результате этого получены структурная схема надёжности (рис. 4) и направленный граф переходов (рис. 5).

На рис. 5 использованы следующие обозначения:  $0 \dots L$  – состояния работоспособности;  $L+1$  – поглощающее состояние (состояние отказа **ЦЧ СВЭП**);  $\Lambda_0 \dots \Lambda_L$  – интенсивности перехода при отказе **СК**;  $\Lambda_{\text{КУУ}}$  – интенсивность перехода при отказе **КУУ**;  $S$  – количество **СК** с общим для них **КУУ**.

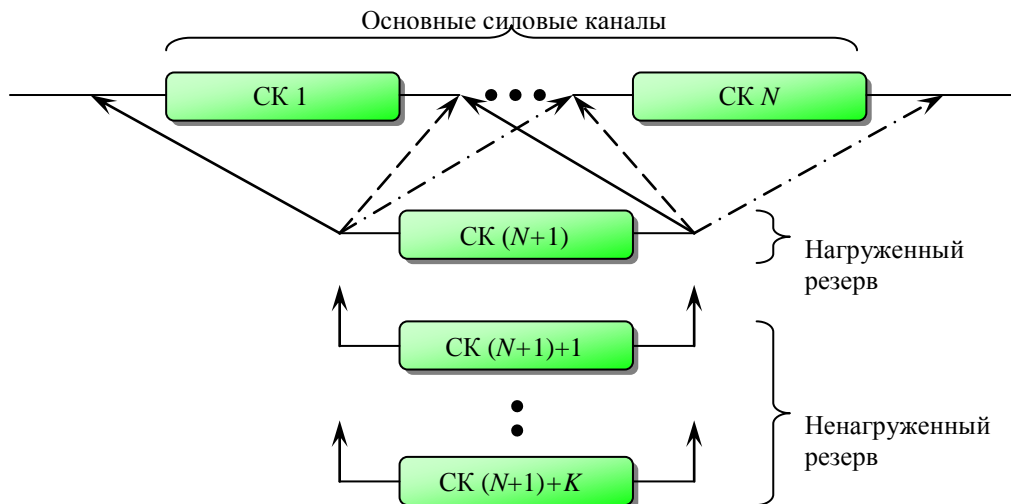


Рис. 4 – Структурная схема надёжности ЦЧ СВЭП

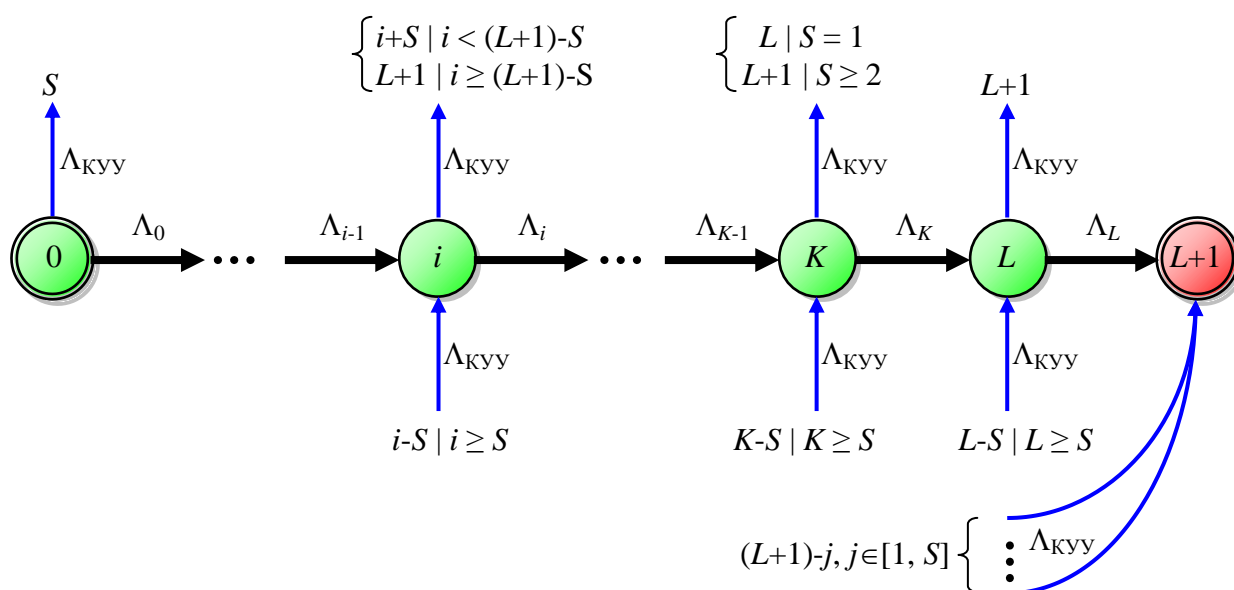


Рис. 5 – Граф переходов ЦЧ СВЭП в возможные состояния

Представленному графу соответствует система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d p_0(t)}{dt} = -(\Lambda_0 + \Lambda_{кву}) \cdot p_0(t); \\ \frac{d p_i(t)}{dt} = -(\Lambda_i + \Lambda_{кву}) \cdot p_i(t) + \Lambda_{i-1} \cdot p_{i-1}(t) + ([\Lambda_{кву} \cdot p_{i-S}(t)] | i \geq S), \quad i \in [1, L]; \\ \frac{d p_{L+1}(t)}{dt} = \Lambda_L \cdot p_L(t) + \Lambda_{кву} \cdot \sum_{j=1}^S p_{L+1-j}(t), \end{cases} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$\begin{cases} p_0(0) = 1; \\ p_i(0) = 0, \quad i \in [1, L+1]. \end{cases} \quad (2)$$

где  $p_i(t)$  – вероятность того, что ЦЧ СВЭП находится в состоянии  $i$ .

Адаптации структурного метода расчёта показателей безотказности применительно к **ЦЧ СВЭП** заключается в том, что при составлении графа переходов и системы дифференциальных уравнений учтены зависимые отказы **СК**, вызванные отказами **КУУ**, а при вычислении интенсивностей переходов учтено распределение токов нагрузки между включенными **СК**.

Полученные выражения для интенсивностей перехода имеют вид:

а) для нагруженного резерва (способ резервирования « $N+L$ »):

$$A^{AR}_i = \lambda \sum_{j=1}^{N+L-i} \left( \left( \frac{N}{N+L-i} + \Delta_j \right) (1-\zeta) + \zeta \right) \cdot e^{\frac{E_a}{K_B} \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{t_C + \Delta t_{II} \cdot \Delta_j + 273} \right)}, \quad i \in [0; L], \quad (3)$$

б) для ненагруженного резерва (способ резервирования « $N+1+K$ »):

– если есть хотя бы один резервный **СК**:

$$A^{SR}_i = \lambda \left[ \sum_{j=1}^{N+1} \left( \left( \frac{N}{N+1} + \Delta_j \right) (1-\zeta) + \zeta \right) \cdot e^{\frac{E_a}{K_B} \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{t_C + \Delta t_{II} \cdot \Delta_j + 273} \right)} + \right. \\ \left. + (N+1) \xi e^{\frac{E_a}{K_B} \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{t_C + 273} \right)} \right], \quad i \in [0; K]. \quad (4)$$

– если не осталось ни одного резервного **СК**:

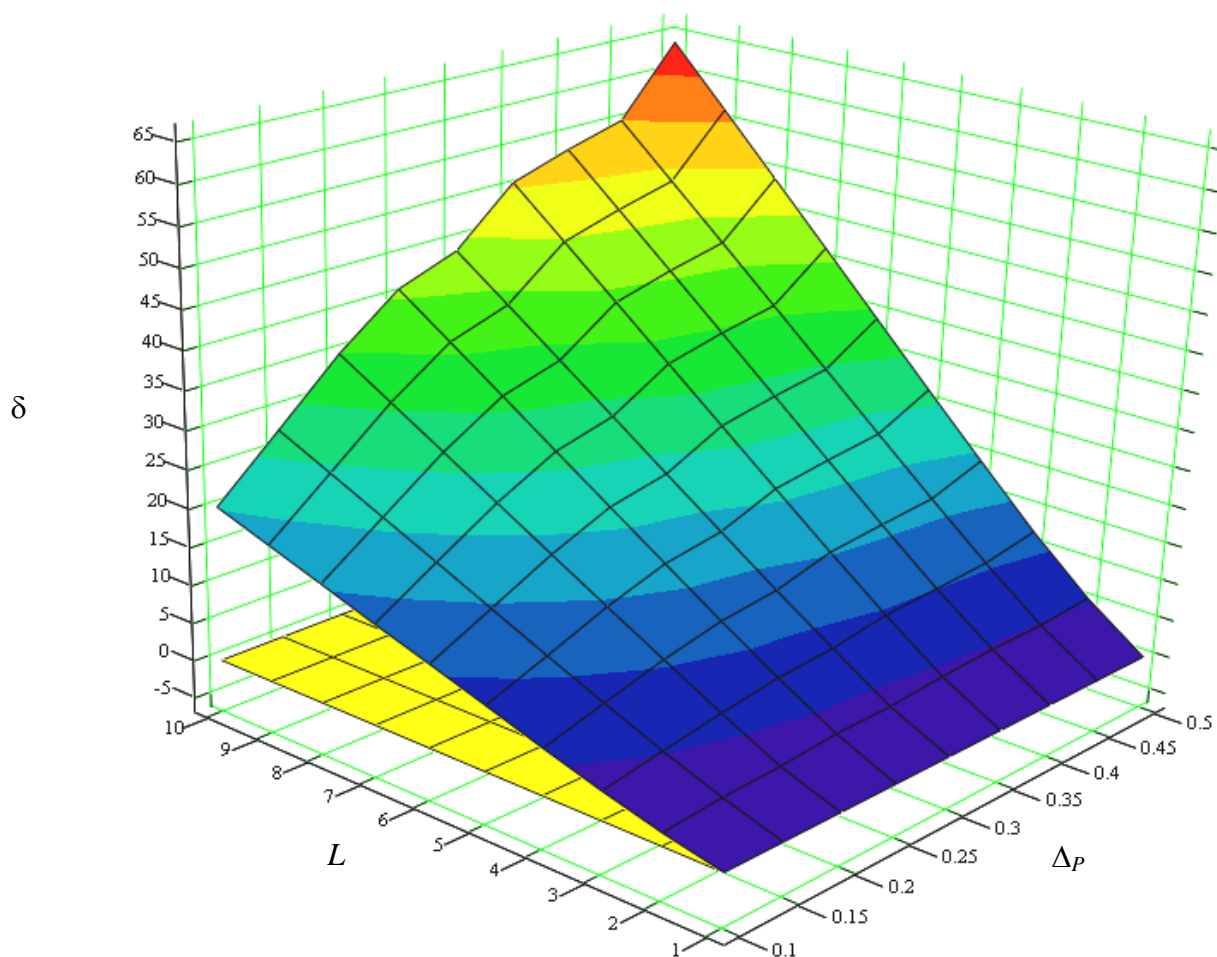
$$A^{SR}_i = \lambda \left[ \sum_{j=1}^N \left( (1 + \Delta_j) (1-\zeta) + \zeta \right) \cdot e^{\frac{E_a}{K_B} \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{t_C + \Delta t_{II} \cdot \Delta_j + 273} \right)} + \right. \\ \left. + N \xi e^{\frac{E_a}{K_B} \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{t_C + 273} \right)} \right], \quad i = L. \quad (5)$$

Здесь индексы  $AR$  и  $SR$  означают, соответственно, нагруженный и ненагруженный резерв;  $E_a$  – энергия активации;  $K_B$  – постоянная Больцмана;  $t_C$  – температура окружающей среды;  $\Delta t_{II}$  – отклонение температуры **СК** от проектной температуры  $t_{II}$ ;  $\Delta$  – отклонение выходного тока **СК** от расчетного значения;  $\zeta$  – коэффициент подобия, характеризующий долю интенсивности отказов **СК**, приходящуюся на компоненты, не зависящие от его нагрузки;  $\xi$  – коэффициент подобия, характеризующий долю интенсивности отказов **СК**, приходящуюся на **КУУ** этого **СК**.

Отличительной особенностью синтезированной модели отказов и адаптированного метода расчёта является их применимость для **ЦЧ СВЭП** с любым количеством и структурной взаимосвязью **СК** и **КУУ** независимо от выбранного для них способа резервирования.

**Третья глава** посвящена оценке эффективности ранее выделенных способов резервирования ЦЧ СВЭП и модернизации наиболее эффективного из них применительно к условиям ограниченной аппаратной избыточности ЦЧ СВЭП.

Определены значения гамма-процентной наработки до отказа для двух вариантов ЦЧ СВЭП, в которых применены способы резервирования, соответственно, « $N+L$ » (все резервные СК находятся в нагруженном режиме) и « $N+1+K$ » (один резервный СК находится в нагруженном режиме, а остальные резервные СК – в ненагруженном). Для оценки эффективности способа резервирования использована величина  $\delta$ , равная относительному отклонению гамма-процентной наработки до отказа ЦЧ СВЭП со способом резервирования « $N+1+K$ » от аналогичного показателя ЦЧ СВЭП со способом резервирования « $N+L$ » (рис. 6).

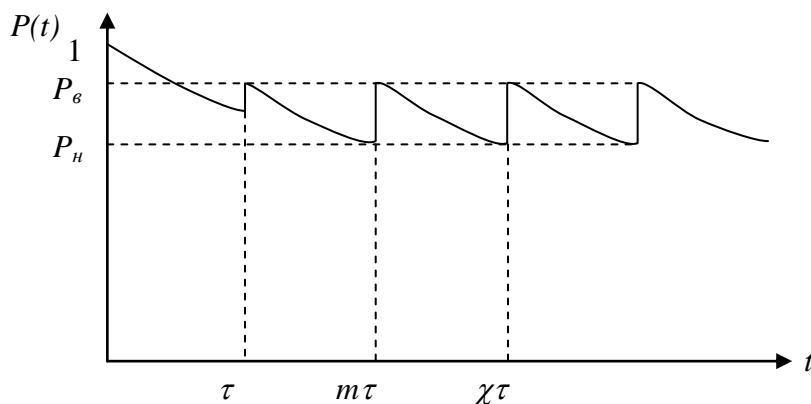


$\Delta_p$  – доля мощности одного силового канала от суммарной выходной мощности

Рис. 6 – Оценка эффективности способов резервирования « $N+1+K$ » и « $N+L$ »

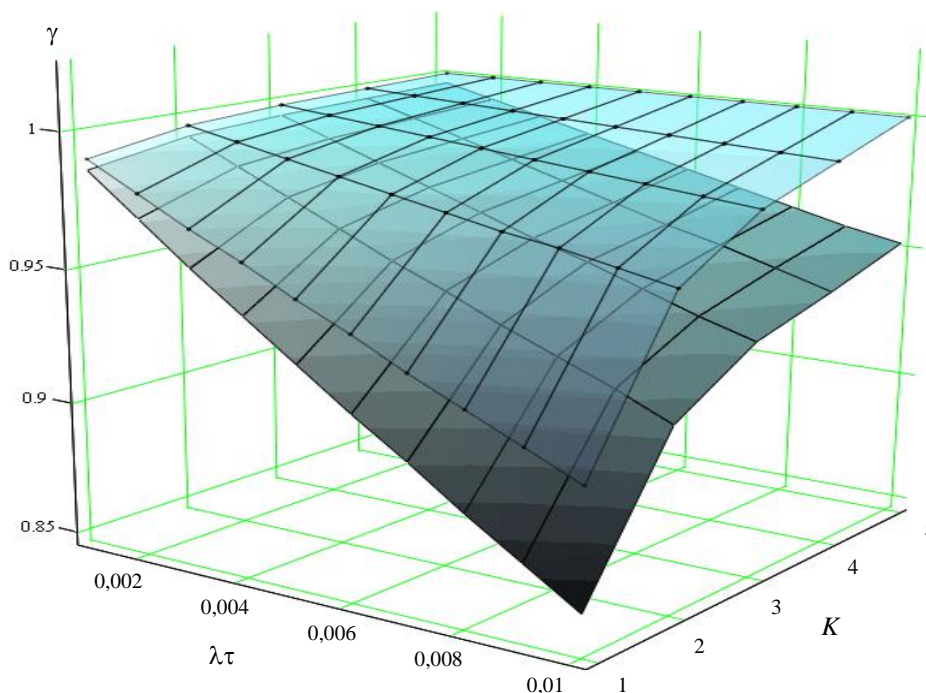
Анализ данной зависимости показал, что наибольшей эффективностью обладает способ резервирования « $N+1+K$ ». Однако при определенных ограничениях на стоимость и массогабаритные показатели ЦЧ СВЭП количество резервных СК будет также ограничено, и оно может оказаться недостаточным

для обеспечения требуемой безотказности. Для устранения этого недостатка предложена модернизация алгоритма управления замещением в способе «N+1+K» путём введения временной и ситуационной ротации основных и резервных СК (см. рисунки 7 и 8).



$P_B, P_H$  – верхняя и нижняя границы изменения вероятности безотказной работы  $P(t)$ ;  
 $\tau$  – период временной ротации;  $m$  – количество периодов ротации, за которое данный процесс переходит в установившийся режим;  $\chi$  – количество отработанных периодов ротации к текущему моменту времени  $t$ .

Рис. 7 – Распределение наработки до отказа ЦЧ СВЭП при временной ротации её силовых каналов



$\gamma$  – задаваемое значение вероятности безотказной работы;  $\lambda$  – интенсивность отказов одного силового канала;  $\tau$  – период временной ротации;  $K$  – количество работоспособных ненагруженных резервных силовых каналов

Рис. 8 – Верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы ЦЧ СВЭП при временной и ситуационной ротации



Для данного режима определены верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы **ЦЧ СВЭП**, соответственно:

$$P_B = \lim_{t \rightarrow (\chi+1)\tau} P(t) = \begin{cases} 1, & N+1 \leq K, \\ \prod_{j=1}^{K-N} P_j(r_j \cdot \tau), & N+1 > K, \end{cases} \quad (6)$$

$$P_H = \lim_{t \rightarrow ((\chi+1)\tau)^-} P(t) = \begin{cases} \prod_{j=1}^{N+1} P_j(\tau), & N+1 \leq K, \\ \prod_{j=1}^{N+1} P_j(r_j \cdot \tau), & N+1 > K, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\chi$  – количество отработанных интервалов  $\tau$  к моменту времени  $t$ ;  $r$  – количество периодов  $\tau$  непрерывной работы каждого СК.

Полезный эффект от применения предложенной временной и ситуационной ротации заключается в том, что за счёт автоматического изменения значений периода  $\tau$  (конкретные значения определяются заранее по вышеприведенным зависимостям вероятности безотказной работы) обеспечиваются расчётные показатели безотказности **ЦЧ СВЭП** при ограниченном количестве резервных СК и отказах включённых СК (пока имеется хотя бы один ненагруженный резервный СК), а также при изменении условий эксплуатации и режимов работы **ЦЧ СВЭП**.

**В четвёртой главе** приведено описание практической реализации способа повышения безотказности **ЦЧ СВЭП**.

Результаты проведенных исследований повышения безотказности **ЦЧ СВЭП**, практически реализованы в работах АО «НИИВК им. М.А. Карцева» (г. Москва) и ООО «Компания промышленная электроника» (г. Томск) по созданию: комплекта модулей для средств вторичного электропитания (рис. 9), системы преобразования электрической энергии (рис. 10) а также систем энергообеспечения для технологий, основанных на быстропротекающих физических процессах (рис. 11, 12).

В данных устройствах благодаря применению предложенных технических и методических решений удалось достичь существенно повышенные показатели безотказности. Так, например, расчётное значение гамма-процентной наработки до отказа, составило 75 тысяч часов с вероятностью 95%, что примерно в три раза превышает значение для той же системы до применения предложенных методов повышения безотказности. При этом значение вероятности отказа системы за годовой период эксплуатации было снижено более чем на два порядка и составило 0,0025% против 0,12% для традиционной системы.

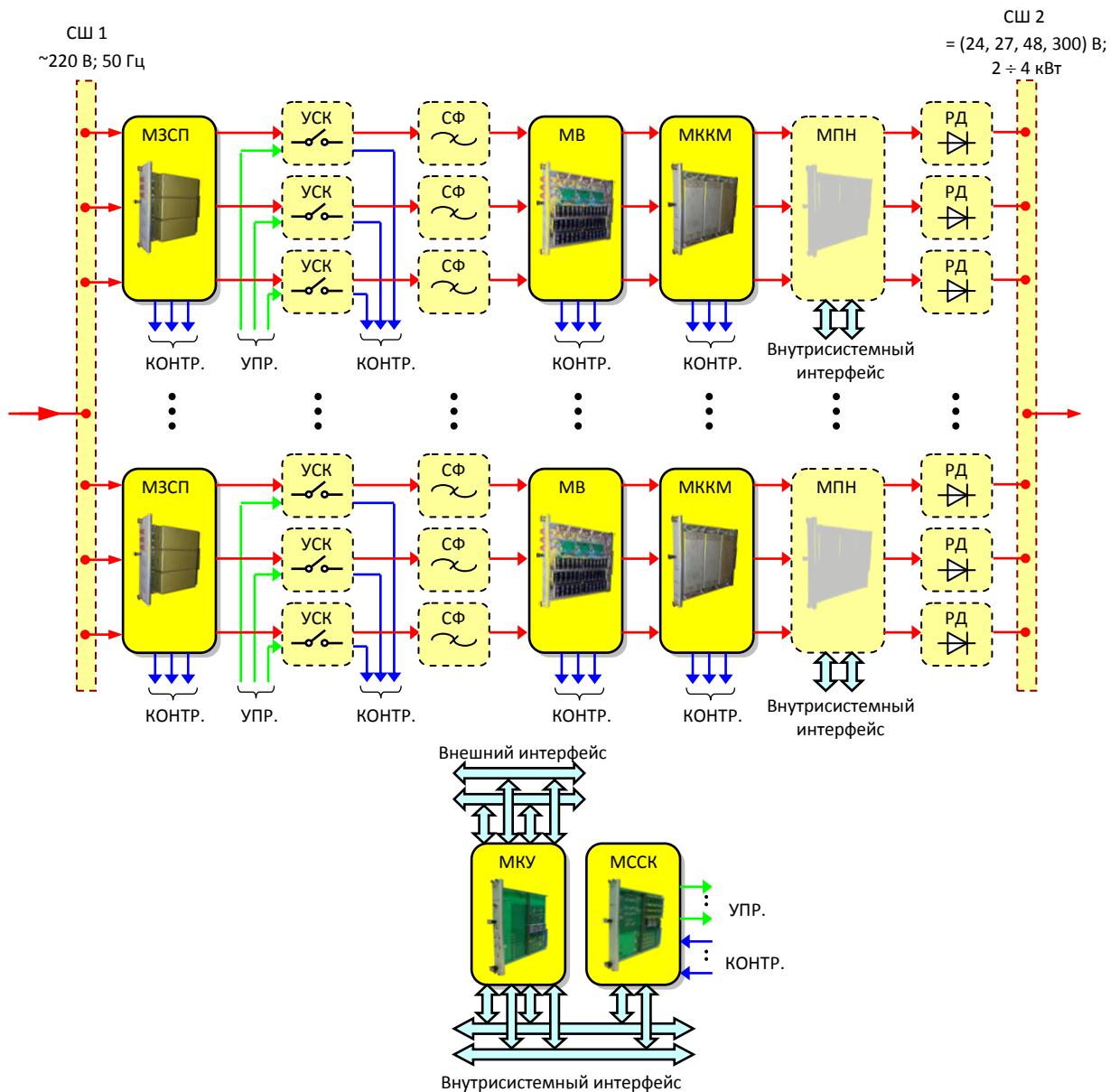


Рис. 9 – Применение модулей, разработанных в ОКР «Мегалит-Б-ВК», при создании ЦЧ СВЭП с магистрально-модульной архитектурой



Рис. 10 – Система  
СПЭ-Б-27/2



Рис. 11 – Система  
221УМК 090



Рис. 12 – Источник  
ИАТ 200-1-1000

Заложенные в данные изделия принципы, способствующие повышению их безотказности, позволили определить пути их дальнейшего развития в части создания унифицированного ряда этих устройств, повышения их «живучести» и реализации в них режима «динамической шины» с целью повышения эффективности энергопреобразования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что создание усовершенствованных способов построения и алгоритмов управления **СВЭП** высокопроизводительных **СВТ** с повышенной безотказностью должно базироваться на концепции **СВЭП** комбинированного класса, учете выявленных уровней совместимости, использовании магистрально-модульной архитектуры с информационно-управляющей частью и параллельно работающими на общую выходную шину силовыми каналами.

2. Выявлено, что с учетом характера введенных ограничений и критериев отказа **ЦЧ СВЭП** и её основных компонентов, а также при использовании принципа параллельной работы силовых каналов (**СК**), наиболее эффективным является применение структурного метода расчёта показателей безотказности резервируемых невосстанавливаемых систем, поведение которых описывается «схемой гибели».

3. Сформулированы базовые критерии для определения количества основных и резервных **СК**, а также разработана методика оценки эффективности децентрализации контрольно-управляющих узлов (**КУУ**), которая позволяет для различных вариантов состава основных и резервных **СК** выбрать способ построения системы управления электропитанием (**СУЭ**), обеспечивающий наилучшие значения показателей безотказности **ЦЧ СВЭП**, что позволяет упростить решение задачи оптимизации состава **ЦЧ СВЭП**.

4. Синтезирована модель отказов **ЦЧ СВЭП**, учитывающая произвольный количественный состав и структурную взаимосвязь **СК** и **КУУ**, позволяющая применить её к любым вариантам реализации **ЦЧ СВЭП**.

5. Предложен адаптированный структурный метод расчёта показателей безотказности **ЦЧ СВЭП**, отличающийся от известного метода расчёта показателей безотказности резервируемых невосстанавливаемых систем дополнительным учётом данных о значениях и распределениях токов нагрузки между её **СК**, использование которых способствуют повышению достоверности результатов расчёта показателей безотказности **ЦЧ СВЭП**, в то время как отсутствие учёта этих данных приводит к появлению методической погрешности, приводящей к завышению показателей безотказности на величину до нескольких единиц процентов.

6. Получено и обосновано заключение о том, что из рассмотренных способов резервирования наибольшей эффективностью обеспечения безотказности **ЦЧ СВЭП** обладает способ смешанного скользящего резервирования замещением « $N+1+K$ », при котором все СК условно разделены на  $N$  основных, 1 резервный в нагруженном режиме и  $K$  резервных в ненагруженном режиме, дополняемый предложенной модификацией алгоритма замещения, заключающейся во введении временной и ситуационной ротации основных и резервных СК. Данный модифицированный способ в отличие от традиционно применяемого способа постоянного нагруженного резервирования « $N+L$ », при котором все СК условно разделены на  $N$  основных и  $L$  резервных в нагруженном режиме, дает преимущество по ключевым показателям безотказности до нескольких десятков процентов, что позволяет достичь требуемых показателей безотказности **ЦЧ СВЭП** в межрегламентные периоды эксплуатации в условиях ограниченной аппаратной избыточности и рекомендуется к использованию в новых поколениях **СВТ**, к безотказности которых предъявляются повышенные требования.

7. Установлено, что основным результатом, подтвержденным практической реализацией разработанных методов повышения безотказности **ЦЧ СВЭП СВТ**, принципиально применимых и к другим классам аппаратуры, является введение алгоритмизированного режима управления ситуационной ротацией СК, что обеспечивает повышение безотказности, «живучести», снижение потерь потребляемой мощности и уменьшение количества резервных компонентов, а также позволяет оперативно с малыми затратами модернизировать данную аппаратуру благодаря свойству «параметрической многовариантности», заключающемуся в возможности взаимного изменения значений основных параметров: выходной мощности, наработки до отказа и предельной рабочей температуры окружающей среды.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Либенко Ю.Н. Источники электропитания для устройств на базе открытых стандартов / Ю.Н. Либенко, А.А. Петровичев, А.Н. Четин // Практическая силовая электроника. - 2016. - №2 (62). - С.48-52.

2. Либенко Ю.Н. Некоторые вопросы создания отечественных источников электропитания для устройств на базе открытых стандартов / Ю.Н. Либенко, А.А. Петровичев, А.Н. Четин // Практическая силовая электроника. - 2016. - №4 (64). - С.8-13.

3. Либенко Ю.Н., Михальченко Г.Я., Четин А.Н. Специфические возможности систем вторичного электропитания с магистрально-модульной архитектурой // Доклады ТУСУРа – 2011 – №2 (24), часть 1 – стр. 264-268.

4. Четин А.Н. Базовые критерии оптимизации структуры силовой части в резервированных системах электропитания // Вопросы радиоэлектроники. – 2016. – №7. – Серия ЭВТ. – Вып. 1. – С. 120-122.

5. Четин А.Н. Влияние структуры управляющей части на надежность системы электропитания // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ. – 2012. – выпуск 2. – С. 162-170.

6. Четин А.Н. Оценка уровня безотказности системы вторичного электропитания с магистрально-модульной архитектурой // Доклады ТУСУРа – 2011 – №2 (24), часть 1 – стр. 253-257.

7. Четин А.Н. Параллельная работа и безотказность преобразователей напряжения // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ. – 2013. – выпуск 2. – С. 156-161.

8. Четин А.Н. Применение метода ротации силовых каналов для повышения безотказности многоканального преобразователя напряжения // Практическая силовая электроника. – 2013. – №49(1). – С. 33-36

9. Четин. А.Н. Анализ модулей класса DC/DC, обеспечивающих параллельную работу на общую нагрузку // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ – 2010 – выпуск 2, стр. 152-157.

10. Четин. А.Н. Разработка модуля преобразователя напряжения для высоконадежной системы вторичного электропитания // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ – 2009 – Вып. 1. – С. 148-155.

11. Четин. А.Н. Технологическая платформа магистралей связи // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ – 2011 – выпуск 4, стр. 181-189.

#### **Патенты:**

1. Многофазный преобразователь напряжения (варианты): пат. 115980 Рос. Федерация: МПК H02M3/325, H02M3/335 / Либенко Ю.Н., Четин А.Н., Михальченко Г.Я., Бородин К.В., Русанов В.В., Михальченко С.Г.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – № 2011136063/07; заявл. 29.08.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. №13.

2. Система воздушного охлаждения для устройства силовой электроники: пат. 129702 Рос. Федерация: МПК H01C1/082, H05K7/20, G12B15/02 / Либенко Ю.Н., Четин А.Н., Либенко Л.А.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева». – № 2013101758/07; заявл. 16.01.2013; опубл. 27.06.2013, Бюл. №18.

3. Токовый коллектор для параллельного подключения выходов однотипных силовых каналов преобразователя напряжения постоянного тока: Пат.

142070 Рос. Федерация: МПК H02M7/00 / Либенко Ю.Н., Четин А.Н., Либенко Л.А.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева». – № 2014103173/07; заявл. 31.01.2014; опубл. 20.06.2014, Бюл. №17.

4. Устройство воздушного охлаждения: пат. 153464 Рос. Федерация: МПК H05K7/20, H02M9/00 / Либенко Ю.Н., Четин А.Н.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева». – № 2014139914/28; заявл. 02.10.2014; опубл. 20.07.2015, Бюл. №20.

### **В других изданиях:**

1. Колосов В.А. СВЭП с повышенной надежностью для формирования промежуточных напряжений электропитания СВТ / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2009. – №1. – С. 8-12.

2. Колосов В.А., Либенко Ю.Н., Четин А. Н. Результаты выполнения ОКР «Мегалит-Б-ВК» // Электропитание – 2010 – № 3.

3. Либенко Ю.Н. О создании комплекта унифицированных силовых компонентов для СВЭП на основе магистрально-модульной архитектуры / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2011. – № 1.

4. Либенко Ю.Н. Особенности реализации материального макета СВЭП с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Научно-технические проблемы электропитания. – Труды Всероссийской научно-техн. конф. – М.: ЗАО «ММП-Ирбис», 2011. – С. 92-101

5. Либенко Ю.Н. Практическая реализация адаптивной базовой системы преобразования электроэнергии с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2013. – № 1. – С. 4-10.

6. Либенко Ю.Н. Состояние разработки электронных модулей для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание – 2009 – № 4.

7. Либенко Ю.Н. Технологические платформы для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой. Технологическая платформа магистралей связи (ТПМС) / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание – 2009 – № 4. – С. 50-53.

8. Либенко Ю.Н. Технологические платформы для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой. Технологическая платформа магистралей связи (ТПМС) (продолжение) / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание – 2010 – № 1. – С. 58-61

9. Либенко Ю.Н. Электронные модули второго уровня разукрупнения в системе преобразования с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2013. – № 2. – С. 10-14.

10.Либенко Ю.Н. Электронные модули первого уровня разукрупнения информационно-управляющей части системы преобразования с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2013. – № 4. – С. 29-34.

11.Либенко Ю.Н. Электронные модули первого уровня разукрупнения силовой части системы преобразования с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2013. – № 3. – С. 27-33.

12.Либенко Ю.Н., Четин А.Н. Пути повышения безотказности систем вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры // Электропитание. – 2010. – №4. – С. 10-21.

13.Либенко Ю.Н., Четин А.Н. Технологические платформы для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой. Технологическая силовая платформа (ТСП) (продолжение) // Электропитание – 2010 – № 2. – С. 52-54

14.Либенко Ю.Н., Четин А.Н. Технологические платформы для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой. Технологическая силовая платформа (ТСП) (продолжение) // Электропитание – 2010 – № 4. – С. 57-59

15.Михальченко Г.Я. Новая технология мягкой коммутации транзисторов силовых полупроводниковых преобразователей / Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, А.Н. Четин // Научно-технические проблемы электропитания / Труды Всероссийской научно-техн. конф. – М.: ЗАО «ММП-Ирбис», 2011. – С. 57-61

16.Четин А.Н. Безотказность преобразователя напряжения с параллельными резервированными силовыми каналами // Современная электроника. - 2018. - №2. – С. 44-48.

Подписано в печать: \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.20\_\_

Формат бумаги 60×84/16

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. Л. 1,0 Тираж 100, Заказ № \_\_\_\_\_

Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в

АО «НИИВК им. М.А. Карцева»,

117437, г. Москва, кл. Профсоюзная, д. 108