

На правах рукописи



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

Москва – 2018

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
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 «___» _____ 2018 г. в ___ часов ___ 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 «___» _____ 20__ года.

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 все 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 надежности функционирования устройств вычислительной техники, с учетом их роли в современном мире, бесспорно, является крупнейшей современной научно-технической проблемой. Среди направлений повышения безотказности устройств вычислительной техники специфическую важную роль играет проблема надежности 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 устройств вычислительной техники (СУЭ УВТ) 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 УВТ, синтеза

их новых более эффективных поколений, разработки принципиально новых **СУЭ УВТ** с улучшенными техническими характеристиками. Ввиду обоснованной целесообразности использования **СУЭ УВТ** 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 надежности **СУЭ УВТ** в определяющей мере связана с обеспечением безотказности централизованной части системы вторичного электропитания (**ЦЧ СВЭП**) за счет 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 недостаточной степени разработанности и перспектив дальнейшего развития представляют сегодня наибольший интерес в контексте обеспечения надежности устройств 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 ее работоспособности.

Приведенные соображения свидетельствуют о важности дальнейших теоретико-экспериментальных исследований в области разработки и совершенствования моделей анализа и структурных методов обеспечения надежности функционирования **ЦЧ СВЭП** устройств вычислительной техники, а также об актуальности темы данной диссертационной работы, посвященной исследованию общих свойств и принципов функционирования систем вторичного электропитания устройств вычислительной техники с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик, разработке, моделях, методов и алгоритмов обеспечения надежности функционирования систем вторичного электропитания устройств вычислительной техники.

Объект исследования – модели, методы и алгоритмы обеспечения надежности функционирования систем электропитания устройств 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 надежности и усовершенствованного модернизированного алгоритма резервирования применительно к задаче безотказного функционирования централизованной части системы вторичного электропитания устройств 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 классификации существующих способов построения **ЦЧ СВЭП** устройств вычислительной техники, методов и алгоритмов управления процессами повышения безотказности **ЦЧ СВЭП**.

2. Осуществлена разработка усовершенствованной версии теоретической модели отказов **ЦЧ СВЭП**, включающей описание рабочих процессов и структурной схемы надежности, описание множества критериев возникновения и процессов развития отказов **ЦЧ СВЭП**.

3. Разработан адаптированный структурный метод расчёта показателей безотказности функционирования 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 надежности применительно к условиям ограниченной аппаратной избыточности **ЦЧ СВЭП**.

5. Осуществлена практическая реализация результатов исследований по разработке моделей и методов повышения надежности функционирования **ЦЧ СВЭП**, в рамках которой внедрен 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 аппаратов, 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 надежности **ЦЧ СВЭП**, основанная, в отличие от аналогов, на графоаналитическом описании процесса развития её отказа с использованием структурной схемы надёжности, 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 математическом описании с помощью однородного марковского процесса, адаптированный к **ЦЧ СВЭП**, и отличающийся от известного метода расчёта безотказности резервируемых невосстанавливаемых систем дополнительным учетом 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 си-

ловых 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 исследований определяется тем, что их использование позволяет повысить показатели безотказности **ЦЧ СВЭП**, предназначенных для применения в устройствах вычислительной техники, к надёжности 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 результатов теоретических исследований 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 электротехники; 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 их 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 объем диссертационного исследования

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

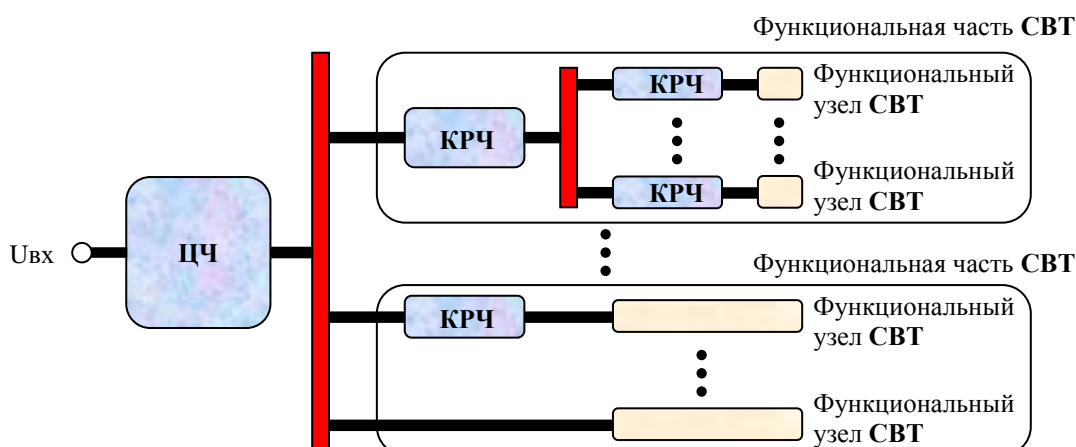
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи диссертационной работы, показана научная новизна полученных результа-

тов, 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.

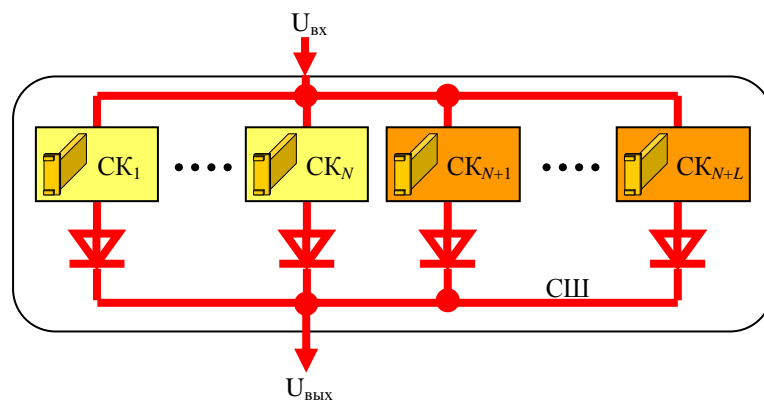


ЦЧ – централизованная часть; КРЧ – компонент распределённой части

Рис. 1 – Увеличенная структура комбинированной СВЭП

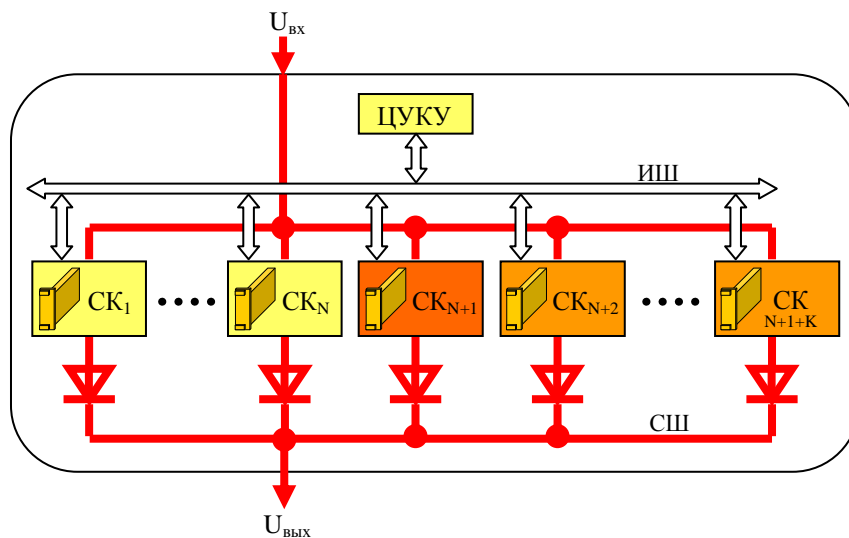
Учитывая сложность построения и большую значимость для СВЭП в целом, именно ЦЧ СВЭП требует принятия большего числа мер по повышению безотказности. Согласно предложенной классификации можно выделить ЦЧ СВЭП с моноблочной, модульной и магистрально-модульной архитектурой построения, а методы повышения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

Установлено, что для обеспечения в ЦЧ СВЭП требуемой безотказности и максимального снижения влияния человеческого фактора в процессе эксплуатации, 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). Показано, что для модульной архитектуры целесообразно применять нагруженное скользящее резервирование, а для магистрально-модульной архитектуры – смешанное скользящее резервирование, при котором один из резервных СК находится в нагруженном режиме, а остальные – в ненагруженном режиме.



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

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 расчетного периода её эксплуатации, соответствующего годовому межрегламентному ресурсу времени.

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

Анализ известных структурных методов, применимых для расчета 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 N условно 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 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).

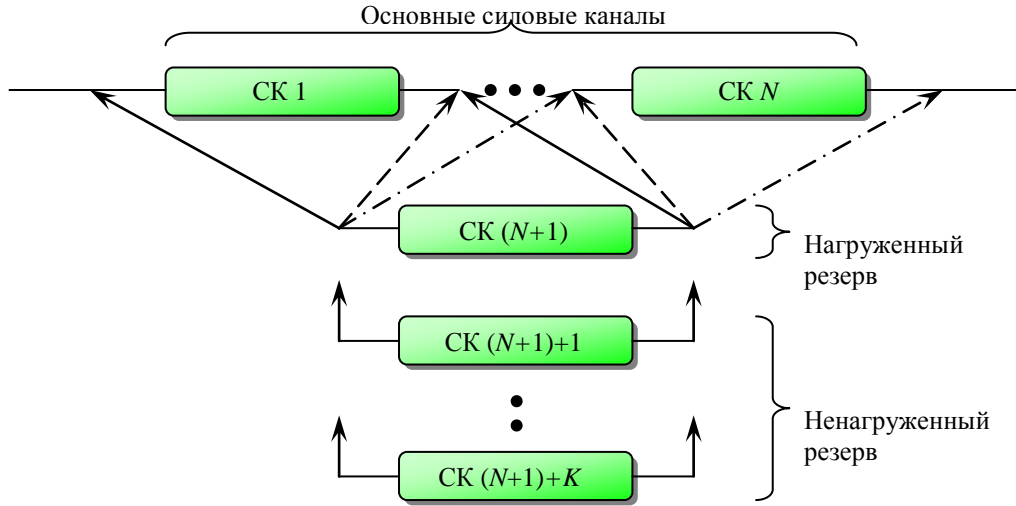
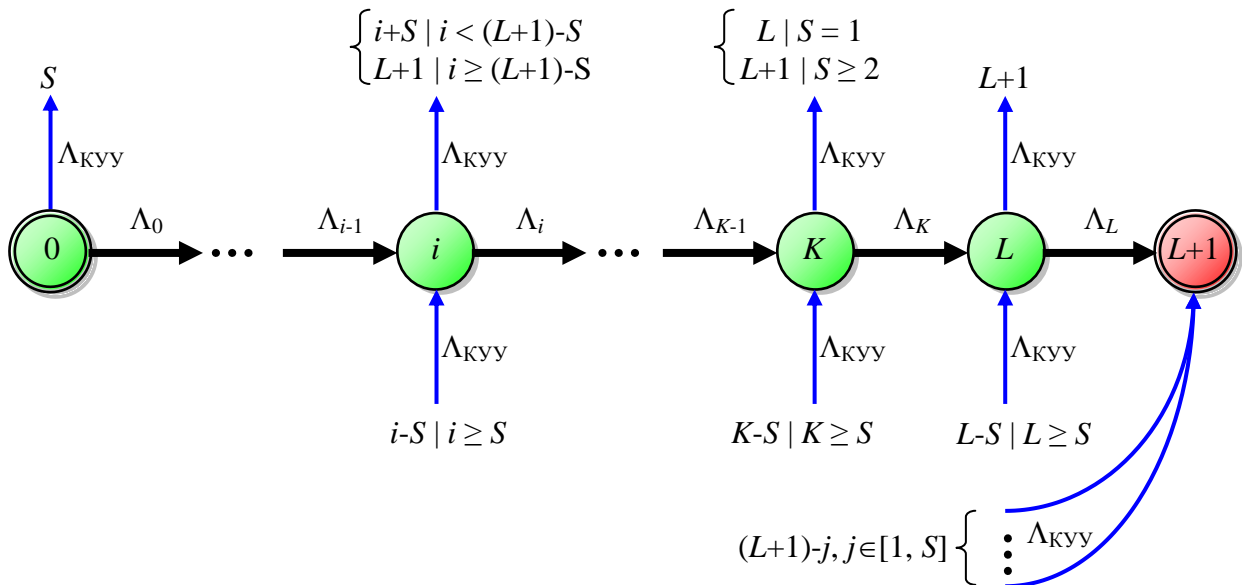


Рис. 4 – Структурная схема надежности ЦЧ СВЭП



$0 \dots L$ – состояния работоспособности; $L+1$ – поглощающее состояние (состояние отказа ЦЧ СВЭП); $\Lambda_0 \dots \Lambda_L$ – интенсивности перехода при отказе СК; $\Lambda_{кву}$ – интенсивность перехода при отказе КУУ; S – количество СК с общим КУУ

Рис. 5 – Граф переходов ЦЧ СВЭП в возможные состояния

Представленному графу соответствует система дифференциальных уравнений:

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

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 .

Вышеупомянутая адаптации 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 **СК**. Соответственно, полученные выражения для интенсивностей перехода имеют вид:

а) для нагруженного резерва:

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

б) для ненагруженного резерва:

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

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

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

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

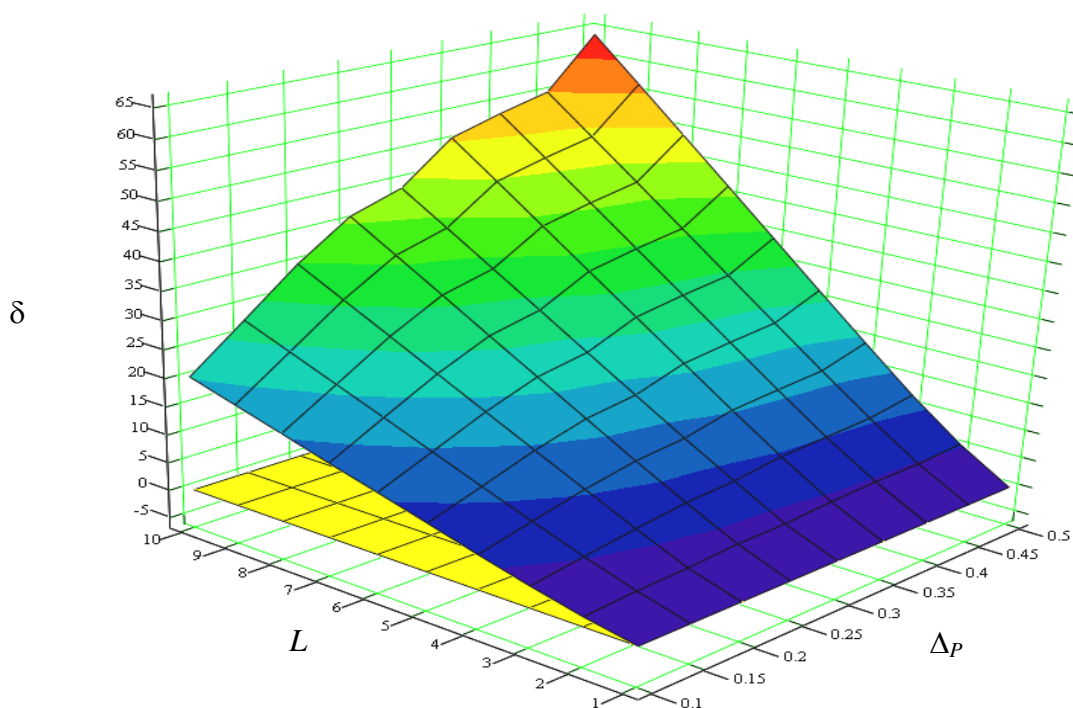
Здесь индекс AR означает – нагруженный резерв; индекс SR означает – ненагруженный резерв; E_a – энергия активации; K_B – Постоянная Больцмана; t_C – температура окружающей среды; Δt_{II} – отклонение температуры преобразователя от проектной температуры t_{II} ; Δ – отклонение выходного тока преобразователя от расчетного значения; ζ – коэффициент подобия, характеризующий долю интенсивности отказов **СК**, приходящуюся на компоненты, не зависящие от его нагруз-

ки; коэффициент подобия ξ – коэффициент подобия, характеризующий долю интенсивности отказов СК, приходящуюся на КУУ.

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.

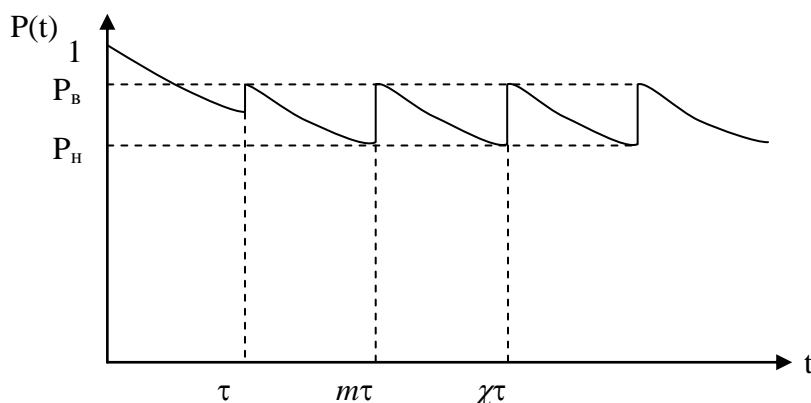
Определены значения гамма-процентной наработки до отказа для двух вариантов ЦЧ СВЭП, в которых применены способы резервирования, соответственно, « $N+L$ » (все резервные СК находятся в нагруженном режиме) и « $N+1+K$ » (один резервный СК находится в нагруженном режиме, а остальные резервные СК – в ненагруженном).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



ΔP – доля мощности одного силового канала от суммарной выходной мощности

Рис. 6 – Относительное отклонение, характеризующее эффективность способа резервирования « $N+1+K$ »

Анализ данной зависимости показал, что наибольшей эффективностью обладает способ резервирования « $N+1+K$ ». Однако при наличии ограничений 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 способа « $N+1+K$ » путём введения временной и ситуационной ротации основных и резервных **СК**. Характер распределения наработки до отказа при временной ротации **СК** приведен на рис. 7.



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

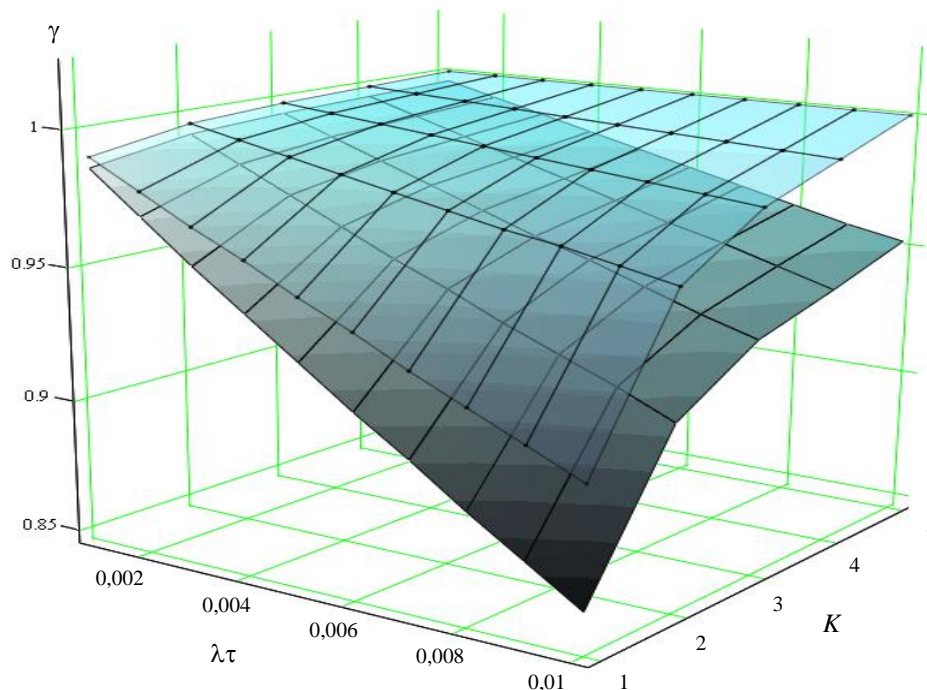
Рис. 7 – Распределение наработки до отказа **ЦЧ СВЭП** при временной ротации её силовых каналов

Для данного режима определены верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы **ЦЧ СВЭП** (см. рис. 8):

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

$$P_{\hat{I}} = \lim_{t \rightarrow ((\chi+1) \cdot \tau)^-} P(t) = \begin{cases} \prod_{j=1}^{N+1} P_j(\tau), & N+1 \leq K, \\ \prod_{j=1}^{N+1} P_j(r_j \cdot \tau), & N+1 > K; \end{cases} \quad (8)$$

где χ – количество отработанных интервалов τ к моменту времени t ; r – количество периодов τ непрерывной работы каждого **СК**.



γ – задаваемое значение вероятности безотказной работы; λ – интенсивность отказов одного силового канала; τ – 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

Полезный эффект от применения предложенной временной и ситуационной ротации заключается в том, что за счёт автоматического изменения значений периода τ (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 автором 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).

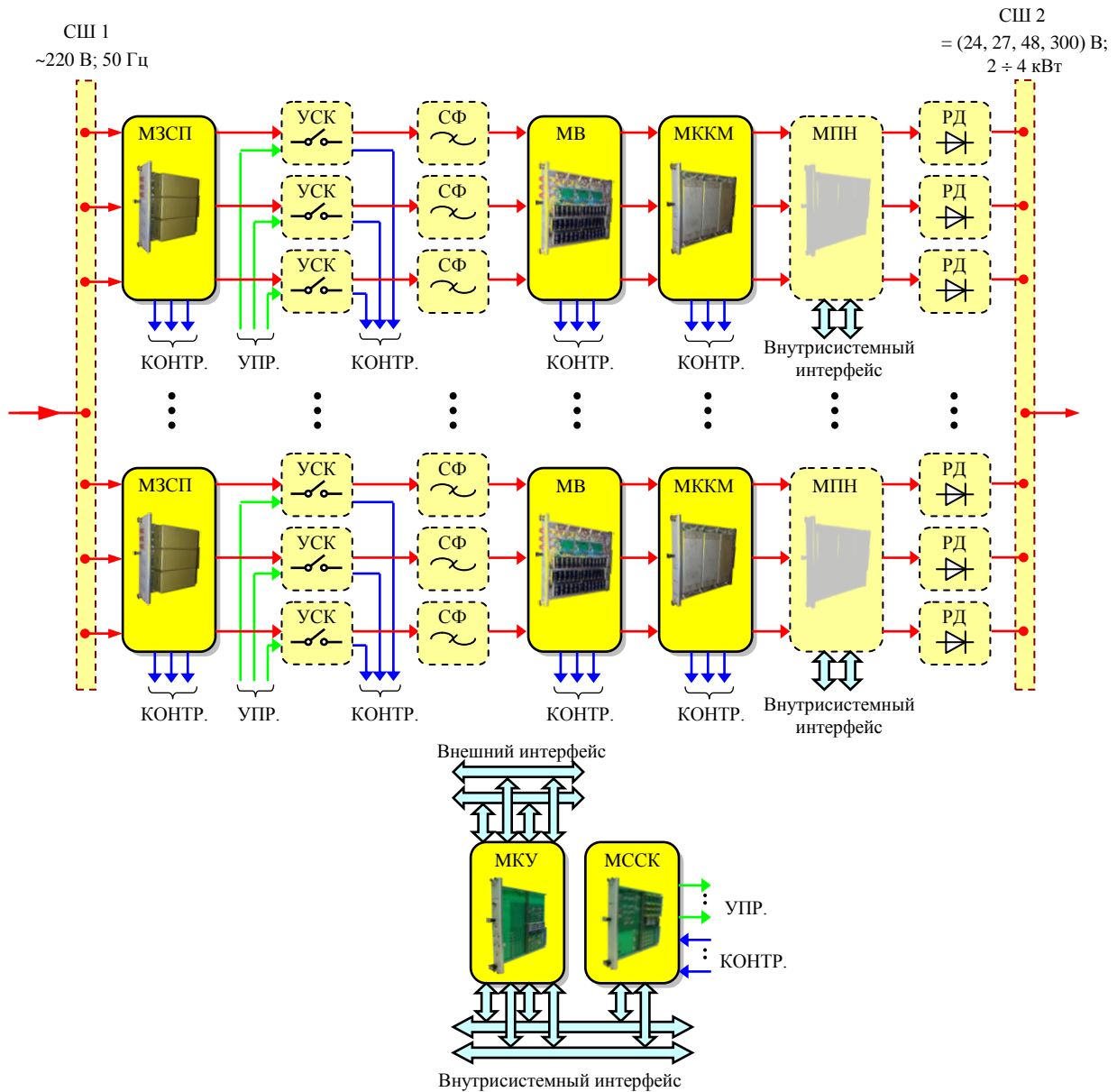


Рис. 9 – Применение модулей, разработанных в ОКР «Мегалит-Б-ВК», при создании ЦЧ СВЭП с магистрально-модульной архитектурой



Рис. 10 – Система преобразования электрической энергии СПЭ-Б-27/2



Рис. 11 – Система энергообеспечения для ростовой установки кристаллов монокристаллического кремния
221УМК 090



Рис. 12 – Источник асимметричного тока для энергообеспечения гальвано-плазменных технологий
ИАТ 200-1-1000

В данных устройствах благодаря применению предложенных технических и методических решений получены значения показателей безотказности существенно превышающие показатели аналогичных устройств. Так, например, расчётное значение гамма-процентной наработки до отказа системы вторичного электропитания, полученное с использованием предложенной автором модели отказов и адаптированного метода расчёта, составило 75 тысяч часов с вероятностью 95%, что примерно в три раза больше значения, полученного для такой же системы без применения предложенных способов повышения безотказности. При этом значение вероятности безотказной работы этой системы за годовой межрегламентный период эксплуатации составило 99,9975% против 99,88% для традиционной системы.

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 оптимизированное решение, имеющее важное народно-хозяйственное значение, научно-технической проблемы создания усовершенствованных способов построения и алгоритмов управления **СВЭП** высокопроизводительных **СВТ**, обладающих повышенными эксплуатационными показателями безотказности, должно базироваться на концепции **СВЭП** комбинированного класса при корректном учете номенклатуры и влияния существующих уровней совместимости, и использовании магистрально-модульной архитектуры с информационно-управляющей частью и параллельно работающими на общую выходную шину силовыми каналами.

2. Показано, что в качестве критерия выбора способа резервирования и управляющего алгоритма замещения в **СВЭП** комбинированного класса целесообразно использовать соображение о том, что **ЦЧ СВЭП** должна обеспечивать безотказную работу в непрерывном круглосуточном режиме с заданным уровнем вероятности в течение расчетного времени её эксплуатации, соответствующего годовому межрегламентному периоду.

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

4. Показано, что сформулированные в работе базовые критерии для определения количества основных и резервных **СК** позволяют упростить решение задачи оптимизации состава **ЦЧ СВЭП**.

5. В результате проведенных исследований разработана методика оценки эффективности децентрализации контрольно-управляющих узлов, которая позволяет для различных вариантов состава основных и резервных **СК** выбрать способ построения подсистемы контроля и управления, обеспечивающий наилучшие значения показателей безотказности **ЦЧ СВЭП**.

6. В рамках исследования рассматриваемой проблемы синтезирована версия модели отказов **ЦЧ СВЭП** с произвольным количественным составом и структур-

ной взаимосвязью **СК** и **КУУ**, и 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 в виде завышения показателей безотказности. Синтезированная модель отказов и предложенный адаптированный метод расчёта показателей безотказности обеспечивают возможность сравнения различных способов резервирования, применимых для **ЦЧ СВЭП**, и определения наиболее эффективного из них.

7. Получено и обосновано заключение о том, что из рассмотренных способов резервирования, применяемых в **ЦЧ СВЭП**, наибольшей эффективностью обеспечения её безотказности обладает способ « $N+1+K$ », дополняемый предложенной модификацией алгоритма замещения.

8. Показано, что модернизация способа резервирования « $N+1+K$ » путём введения временной ротации основных и резервных **СК** позволяет достичь требуемых показателей безотказности **ЦЧ СВЭП** в межрегламентные периоды эксплуатации в условиях ограниченной аппаратной избыточности, и полученные результаты в части модернизированного способа резервирования « $N+1+K$ » рекомендуются к использованию при реализации **ЦЧ СВЭП**, предназначенных для применения в новых поколениях **СВТ**, к безотказности которых предъявляются повышенные требования.

9. Основным результатом, достигнутым при практической реализации разработанного автором способа повышения безотказности **ЦЧ СВЭП СВТ**, принципиально применимого и во многих других научно-технических отраслях, является введение алгоритмизированного режима управления ситуационной ротацией силовых каналов, что обеспечивает увеличение показателей безотказности, повышение «живучести», снижение потерь потребляемой мощности, уменьшение количества резервных компонентов, создает возможности для оперативной и малозатратной модернизации.

10. На основе предложенного в работе комплекса методологических приемов повышения безотказности **ЦЧ СВЭП** высокопроизводительных устройств вычислительной техники создана серия унифицированных модулей и систем преобразования электроэнергии (**СПЭ**) со свойством «параметрической многовариантности», заключающемся в возможности оперативного создания на ее основе новых исполнений **СПЭ** с другими значениями основных параметров выходной мощности, наработки до отказа и предельной рабочей температуры окружающей среды.

11. Совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что цель работы, заключающаяся в исследовании проблемы повышения безотказности **ЦЧ СВЭП** устройств вычислительной техники, разработке способа, позволяющего обеспечивать задаваемый уровень её безотказности и внедрении полученных результатов в практику разработки перспективных средств вторичного электропитания **СВТ**, достигнута.

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