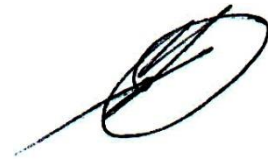


На правах рукописи



ВОРОНКОВ Антон Александрович

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИНВЕРТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ
ОПАСНОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ТОКОВЫХ
ПЕРЕГРУЗКАХ И В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва»

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент Бардин Вадим Михайлович
Официальные оппоненты:	Григорьев Максим Анатольевич доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод» Калистратов Николай Александрович кандидат технических наук, НПЦ «Электронные системы» АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз», г. Саратов, начальник отдела 120 НПК «Модульные системы»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится «01» июля 2021 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.242.10 при ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.» по адресу: 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корпус 1, ауд. 319.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, СГТУ имени Гагарина Ю.А., ученому секретарю диссертационного совета Миргородской Екатерине Евгеньевне и по электронной почте: mee85@inbox.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке СГТУ имени Гагарина Ю.А. и на сайте: <http://www.sstu.ru>

Автореферат разослан «___» апреля 2021 г.

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



Миргородская Екатерина Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Силовые *IGBT* и *MOSFET* транзисторы и модули на их основе в настоящее время широко применяются при создании преобразователей электрической энергии различного назначения и для различных областей техники. Мощность таких преобразователей находится в диапазоне от единиц до десятков и сотен киловатт, а в электроэнергетике – мегаватт. К таким устройствам предъявляются высокие требования по надежности работы, в том числе и при возникновении различных аварийных ситуаций в цепи нагрузки.

Исследованию схемотехнических решений преобразователей, анализу происходящих в них процессов при взаимодействии преобразователя с нагрузкой посвящено достаточно много работ как теоретического, так и экспериментального характера. Однако есть круг вопросов, которые явно недостаточно исследованы. Один из таких вопросов – это работа инверторных преобразователей при возникновении различных форс-мажорных ситуаций, например коротких замыканий (КЗ) в цепи нагрузки. Силовые полупроводниковые приборы (СПП), которые являются основными составляющими элементами преобразователей, весьма чувствительны к таким процессам. Возникающие при КЗ сверхтоки приводят к быстрому локальному перегреву транзисторов, и даже при наличии различных устройств защиты транзисторы могут выйти из строя, что приведет к потере работоспособности преобразователя в целом. Для устранения данного недостатка разработчики преобразовательных устройств должны хорошо понимать суть происходящих в преобразователе процессов и предусматривать меры по исключению негативных последствий.

В данной работе проведены исследования электрических переходных процессов в инверторных преобразователях при возникновении КЗ в цепи нагрузки с целью определения величины токовых перегрузок аварийного характера.

Но мало определить, какова динамика развития тока КЗ, протекающего через транзисторы, и до какой амплитуды может вырасти его величина до момента отключения. Желательно знать, какой ток может выдержать транзистор без разрушения до момента его отключения, и как подобрать транзисторы по их параметрам при комплектовании транзисторных сборок, чтобы быть уверенным, что транзисторы способны выдержать такой ток без повреждения.

Такой подход требует не только понимания происходящих процессов при возникновении КЗ в инверторных преобразователях, но и знаний комплекса электрических, тепловых и других параметров и характеристик транзисторов, необходимых для комплектования силовых модулей инверторных преобразователей.

Такой комплексный подход по решению задачи улучшения эксплуатационных характеристик инверторных преобразователей определяет актуальность и новизну диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования. Проблема улучшения эксплуатационных характеристик инверторных преобразователей сохраняется на всем протяжении развития силовой полупроводниковой электроники. Её с разных позиций и разными способами пытались решить многие исследователи. Одним из частных вопросов в рамках общей проблемы является обеспечение безотказной работы полупроводниковых модулей в преобразователях при воздействии на транзисторы импульсных токовых перегрузок (ударных токов).

Большинство специалистов, активно работавших в области силового полупроводникового приборостроения в 70-х – 90-х годах прошлого столетия и объектом исследования которых были силовые диоды и тиристоры, сошлись во мнении, что независимо от физических механизмов отказа СПП главным критерием является температура полупроводниковой структуры. Поэтому часть публикаций была посвящена теоретическому исследованию тепловых процессов в приборах с целью определения связи внутренних параметров приборов с критической величиной ударного тока. К числу ранних и наиболее значимых работ следует отнести работы специалистов того времени в области полупроводников: Кузьмина В.В., Чеснокова Ю.А., Евсеева Ю.А., Пашенцева И.Д., Ашкинази Л.А. и ряда других.

Решение проблемы ударных токов не ограничивается только попытками теоретически или экспериментально оценить критическую температуру полупроводниковой структуры СПП, но и затрагивает ряд других вопросов, таких как поиск зависимостей между измеряемыми параметрами прибора и его потенциальной способностью выдерживать токовые перегрузки, оценка ресурсных показателей при воздействии на прибор ударных токов различной амплитуды и длительности, создание методики неразрушающей оценки ударного тока при классификации приборов на группы по этому показателю. Решение частных прикладных задач предлагалась в целом ряде работ различных авторов: Бартанова А.Б., Бардина В.М., Пономарева Е.Е., Синегуба Г.А., Григорьева А.М., Шпера В.В., Веревкина В.В. и других. Но все эти публикации относятся к силовым диодам и тиристорам.

Проводились также исследования влияния ударного тока на температуру кристалла *IGBT* модулей зарубежными специалистами: Xiuing Zhang, Meiyu Wang, Xin Li, Fang Chao, An Tong, Qin Fei, Bie Xiaorui, Zhao Jingyi, Vanessa Smet, Francois Forest, Jean-Jacques Huselstein, Frédéric Richardeau и др. Но данные вопросы рассматривались с точки зрения улучшения технологии их изготовления.

Из отечественных специалистов в области обеспечения безопасной работы силовых транзисторов большая работа проводится в АО «Ангстрем» (Колпаков А.И.) и ПАО «Электровыпрямитель» (Мартыненко В.А.). Но в их работах приводятся результаты решения частных вопросов, например по групповой работе *IGBT* транзисторов или по механизмам их отказов при перегреве как полупроводниковых кристаллов, так и их электрических соединений.

Полностью исключить вероятность повреждения транзисторов при возникновении форс-мажорных ситуаций невозможно, но снизить этот показатель можно за счет грамотного проектирования и эксплуатации

преобразователя. Любые деградиционные изменения в транзисторах независимо от их причины приводят к ухудшению эксплуатационных показателей преобразовательных устройств; к числу наиболее важных из них следует отнести: гарантийный срок работы, вероятность безотказной работы в течение заданного времени, межрегламентный период проведения профилактических работ, время восстановления работоспособности.

При общем понимании смысла этих показателей оценить или подтвердить их количественные показатели можно только на основании экспериментальных статистических данных, полученных в процессе эксплуатации аппаратов. К сожалению, сбор и обработка такой информации организованы недостаточно хорошо.

С учетом этих соображений были сформулированы цель и конкретные задачи, решению которых посвящена данная диссертационная работа.

Цель работы – обеспечение условий для улучшения эксплуатационных характеристик инверторных преобразователей путем проведения комплексного изучения процессов в системе: «транзисторный инвертор – нагрузка» при коротких замыканиях в цепи нагрузки.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование переходных процессов в цепях с силовыми транзисторами при возникновении коротких замыканий на участке: инверторный преобразователь – нагрузка для оценки возможной величины ударного тока через транзисторы инвертора и определение условий, при выполнении которых короткие замыкания не приводят к разрушению транзисторов силового модуля инверторного преобразователя;

2. Разработка методики и технических устройств для экспериментальной оценки перегрузочной способности транзисторов по ударному току.

3. Разработка методики подбора транзисторов по комплексу измеряемых параметров для комплектования силовых модулей инверторных преобразователей по критериям теплового режима.

4. Разработка устройства и метода контроля параметров транзисторов для отбраковки потенциально ненадежных образцов и оценки наступления предотказного состояния транзисторов в процессе их эксплуатации.

Объектом исследования являются транзисторный инвертор и его транзисторный модуль (сборка).

Предметом исследования является комплекс условий для обеспечения безотказной работы транзисторов в случае возникновения короткого замыкания в нагрузке.

Методы и средства исследования. В диссертационной работе были использованы методы компьютерного моделирования процессов в схеме инвертора при возникновении короткого замыкания в цепи нагрузки, методы корреляционного анализа и статистической обработки количественных данных, методы теории планирования многофакторных экспериментов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Получены результаты, позволяющие оценить степень влияния параметров-факторов электрической цепи, а также системы управления

инверторного преобразователя на скорость нарастания и амплитуду тока через транзистор при возникновении коротких замыканий.

2. Предложена методика, позволяющая получить информацию о статистическом законе распределения транзисторов по предельной (разрушающей) величине ударного тока, необходимой для определения минимальной границы величины ударного тока для этих приборов.

3. Предложена методика неразрушающей оценки критической (разрушающей) величины ударного тока для отдельных транзисторов, в том числе и с целью отбраковки потенциально ненадежных образцов.

4. Предложен способ комплектования транзисторных модулей из совокупности транзисторов, позволяющий обеспечить приемлемое равенство их тепловых режимов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Предложенная компьютерная модель преобразователя позволяет исследовать переходные процессы в системе «инвертор – нагрузка» для оценки скорости нарастания и амплитуды тока КЗ в любых схемах транзисторных инверторов.

2. Предложены методики и устройства для оценки ряда предлагаемых информативных параметров транзисторов, что позволяет еще до монтажа транзисторных сборок оценить потенциальные возможности транзисторов выдерживать импульсные токовые перегрузки технологического и аварийного характера и исключить потенциально ненадежные образцы.

3. Предложен способ отбора транзисторов для комплектования транзисторных сборок с учетом требования по их тепловому режиму, что позволяет обеспечить безопасную работу транзисторных сборок и инверторного преобразователя в течение длительного времени.

Диссертация соответствует области исследования:

1 – Разработка научных основ создания схем и устройств силовой электроники, исследование свойств и принципов функционирования элементов схем и устройств;

3 – Оптимизация преобразователей, их отдельных функциональных узлов и элементов;

4 – Математическое и схемотехническое моделирование преобразовательных устройств.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Предложенная упрощенная модель цепи «транзисторный инвертор – нагрузка» позволяет исследовать переходные процессы при возникновении короткого замыкания в нагрузке (или в соединительных кабелях) и получить адекватные оценки возможной величины ударного тока и скорости его нарастания при коротком замыкании, а также определить допустимые условия, при выполнении которых токи короткого замыкания не приводят к разрушению транзисторов силового модуля инверторного преобразователя.

2. Предложенный способ комплектования транзисторных сборок из партии транзисторов позволяет обеспечить приемлемое равенство их тепловых режимов при номинальном режиме работы.

3. Предложенный способ экспресс-оценки теплового сопротивления R_{th} силовых транзисторов позволяет существенно сократить время измерения этой величины и отбраковать приборы с аномально высокими значениями теплового сопротивления.

4. Разработанная аппаратура и полученные с её помощью результаты экспериментальных исследований *IGBT* транзисторов позволяют определить зону и границы безопасной работы этих транзисторов при воздействии на них импульсных токовых перегрузок по опытным данным об амплитуде и длительности ударного тока и расположению зоны распределения безусловных отказов.

Достоверность, обоснованность результатов обеспечивается использованием профессиональных пакетов прикладных программ моделирования и сходимостью результатов моделирования и физического эксперимента.

Апробация работы. Результаты работы, а также отдельные её части представлялись и обсуждались на различных научно-практических конференциях: XX научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва (Саранск, МГУ им. Н.П. Огарева, 2016); X Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, МГПИ им. М.Е. Евсевьева, 2017); V Всероссийской научно-технической конференции «РТИ Системы ВКО – 2017» (Москва, АО «РТИ», 2017); XLVI Научная конференция «Огаревские чтения» (Саранск, МГУ им. Н.П. Огарева, 2017); IV Международная молодежная научная конференция «Молодежь в науке: новые аргументы» (Липецк, 2018); XXII Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Саранск, МГУ им. Н.П. Огарева, 2018); XLVII Научная конференция «Огаревские чтения» (Саранск, МГУ им. Н.П. Огарева, 2018); XLVIII Научная конференция «Огаревские чтения» (Саранск, МГУ им. Н.П. Огарева, 2019); Международная научно-техническая конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2020 (Саратов, СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2020).

Реализация и внедрение результатов работы

Полученные теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы в части проектирования транзисторных модулей инверторных преобразователей были использованы на ПАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 работы в единой реферативной базе данных *Scopus*, получен 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора заключается в выполнении исследований, представленных в работе, в разработке математических моделей, разработке и проведении испытаний на физическом макете для исследования переходных процессов в транзисторном инверторе при КЗ, разработке, сборке и отладке оборудования для измерения электрофизических и тепловых параметров силовых транзисторов, проведении измерений на разработанном

оборудовании, анализе и обобщении полученных результатов. Работа выполнялась в период с 2016 до 2020 г.

Структура и объем диссертации. Работа включает введение, четыре главы основного материала, заключение, список использованной литературы, список сокращений и условных обозначений, приложение. Объем работы составляет 118 страниц, в том числе 43 иллюстрации, 17 таблиц и 1 приложение. Список использованной литературы содержит 113 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны актуальность диссертационной работы, её научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе приведены распространенные схемы транзисторных инверторов и выполнен анализ особенностей их работы. Описаны основные причины и характер токовых перегрузок в транзисторном инверторе, а также способы защиты транзисторных элементов от их разрушения в случае возникновения токовых перегрузок. Рассмотрены различные типы защит: «медленная», «быстрая» и «мгновенная» – и приведен расчет амплитуды тока короткого замыкания в нагрузке на примере инверторного преобразователя частоты. Описаны основные механизмы отказа и разрушения транзисторов при токовых перегрузках и введены внутренние и внешние факторы, влияющие на данные процессы. Произведен анализ научных работ, связанных с темой диссертации. Сформулированы основные проблемы обеспечения надежной работы транзисторов в силовых модулях преобразователей.

В результате сделаны следующие выводы:

- однофакторные модели не позволяют с приемлемой достоверностью оценить амплитуду тока короткого замыкания;
- заранее неизвестны возможности применяемых транзисторов по токовым перегрузкам каждого транзистора при комплектовании силового модуля;
- отсутствуют методики для проведения контрольно-измерительных и профилактических мероприятий для обеспечения безаварийной работы силового модуля в течение длительного времени эксплуатации.

Определены основная цель диссертационной работы и задачи для её достижения.

Во второй главе приводятся результаты исследования зависимости тока короткого замыкания от факторов электрической цепи в системе «инвертор-нагрузка» путем компьютерного моделирования и на физическом макете в однофакторной, двухфакторной и трехфакторной среде с применением теории планирования многофакторного эксперимента.

Короткие замыкания в электрической системе «инвертор – нагрузка» могут возникать:

- непосредственно на выходе инвертора;
- при пробое кабеля, соединяющего инвертор с нагрузкой;
- при коротком замыкании в нагрузке.

Величина амплитуды тока короткого замыкания $I_{КЗ}$ зависит от скорости нарастания тока через транзисторы di/dt и времени срабатывания защиты t_3

$$I_{КЗ} \approx \frac{di}{dt} t_3. \quad (1)$$

Количественные значения показателей, входящих в данную формулу, зависят от следующих факторов:

- величины напряжения питания инвертора E_n ;
- индуктивности кабеля от транзистора до места короткого замыкания L_k ;
- сопротивления кабелей R_k ;
- напряжения управления на затворах транзисторов U_3 .

Для анализа влияния перечисленных факторов на скорость нарастания тока через транзистор и его величину схему любого инвертора можно свести к электрической схеме цепи, состоящей из одного транзистора, активного и реактивного сопротивлений кабелей и сопротивления нагрузки (рисунок 1).

В программе *Microcap* была построена модель данной системы и были проведены исследования зависимости величин $I_{КЗ}$ и di/dt от одного, двух и трех факторов. После проведенных исследований был выбран диапазон факторов (таблица 1), при которых зависимости приближены к линейным, что является необходимым условием для повышения сходимости результатов при проведении многофакторных экспериментов.

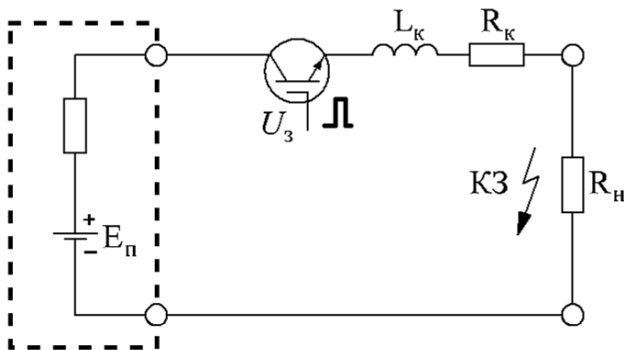


Таблица 1 – Факторы электрической цепи

Величина	Фактор		
	$I_{к}, м$	$E_n, В$	$U_3, В$
	x_1	x_2	x_3
нижняя	20	248	14
средняя	25	310	15
верхняя	30	372	16

Рисунок 1 – Исследуемая электрическая цепь

На рисунке 2 приведены результаты моделирования величин $I_{КЗ}$ и di/dt от одного фактора при постоянных значениях остальных, а на рисунке 3 – одновременно от двух при фиксированном третьем. Время срабатывания защиты выбрано равным 10 мкс.

Для оценки одновременного влияния трех факторов и более на амплитуду и скорость нарастания тока короткого замыкания невозможно применить графическое представление полученных результатов.

Для решения данной задачи было предложено использовать теорию многофакторного эксперимента. В работе описана методология многофакторного эксперимента и получены уравнения для di/dt и $I_{КЗ}$ для трехфакторного эксперимента:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = 6,3396 - 1,3990 \cdot x_1 + 1,2709 \cdot x_2 + 0,0012 \cdot x_3 - 0,2803 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ \quad + 0,0004 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0006 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0002 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \\ I_{K3} = 93,887 - 14,055 \cdot x_1 + 18,824 \cdot x_2 + 0,015 \cdot x_3 - 2,816 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ \quad + 0,005 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,005 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,002 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \end{cases} \quad (2)$$

где x_1 , x_2 и x_3 являются относительными показателями факторов I_K , E_{II} и U_3 , соответственно. Для перехода к натуральным количественным показателям факторов использовалась формула пересчета:

$$X_i = \frac{x_i - x_i^0}{\Delta x_i}, \quad (3)$$

где x_i^0 – начальный (нулевой) уровень фактора, x_i – текущее значение фактора, Δx_i – шаг варьирования.

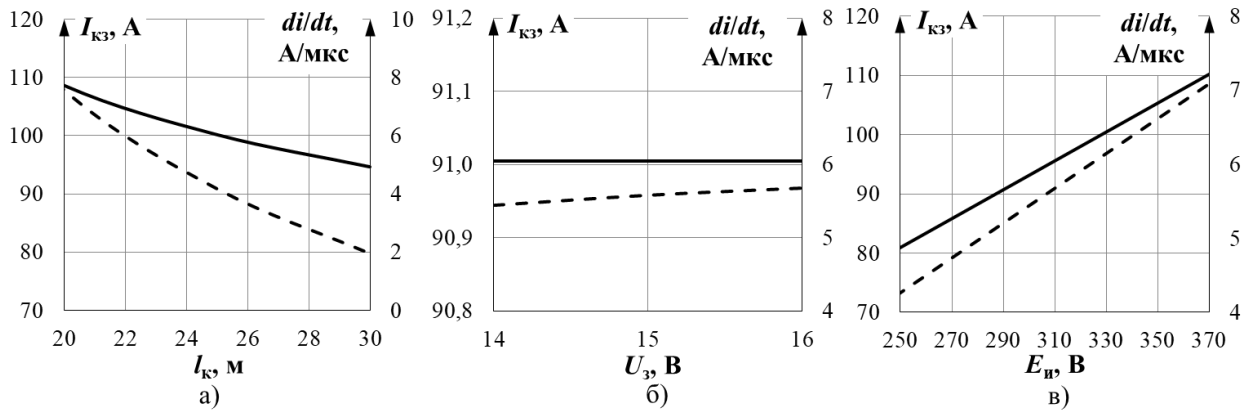


Рисунок 2 – Зависимости скорости нарастания тока di/dt (сплошная линия) и величины I_{K3} (штриховая линия) от факторов цепи

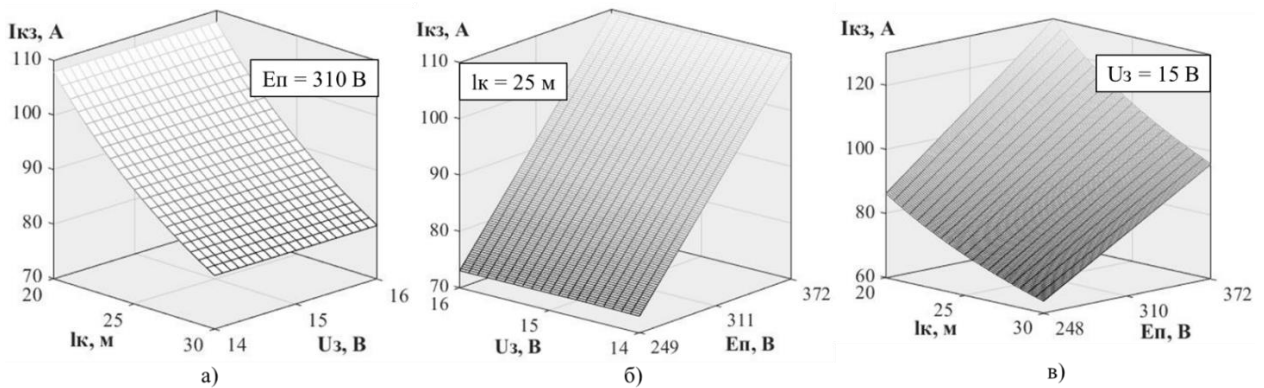
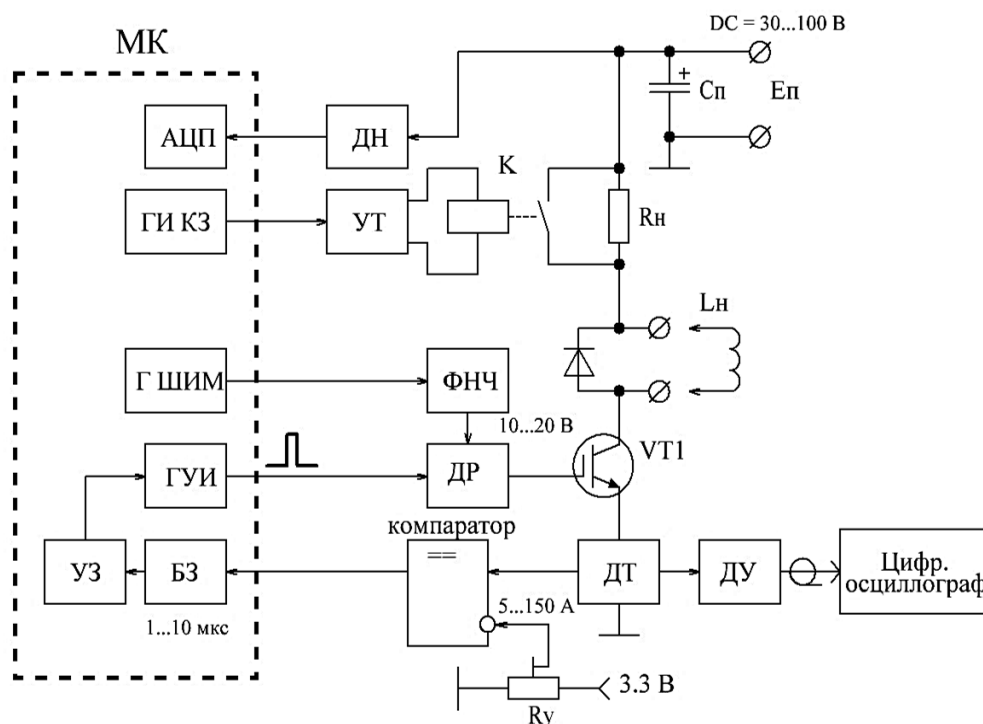


Рисунок 3 – Двухфакторные диаграммы зависимости амплитуды тока I_{K3}

Подстановка в (2) средних значений факторов из таблицы 1 позволяет оценить возможную величину тока короткого замыкания через транзистор преобразователя до срабатывания защиты:

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= 6,34 \text{ А/мкс}, \\ I_{K3} &= 94,25 \text{ А}. \end{aligned}$$

Для подтверждения результатов компьютерного моделирования был разработан физический макет устройства, который позволяет имитировать короткое замыкание нагрузки с помощью реле при различных факторах цепи: I_K , U_3 и E_{II} . Структурная схема данного устройства представлена на рисунке 4.



АЦП - аналого-цифровой преобразователь, ДН - делитель напряжения, ГИ КЗ - генератор импульса короткого замыкания, УТ - усилитель тока, Г ШИМ - генератор ШИМ сигнала, ФНЧ - фильтр нижних частот, ГУИ - генератор импульсов управления, ДР - IGBT драйвер, БЗ - блок задержки, УЗ - устройство защиты, ДТ - датчик тока, ДУ - дифференциальный усилитель.

Рисунок 4 – Структурная схема стенда физического макета элементарной электрической цепочки

С помощью макета были проведены испытания. Транзистор для испытаний был выбран марки *STGW20NC60VD* (максимальный постоянный ток коллектора равен 60 А, максимальное напряжение коллектор – эмиттер равно 600 В). Диапазон изменений факторов приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы электрической цепи для физического макета

Величина	Фактор		
	$I_{кз}, \text{ м}$	$E_{п}, \text{ В}$	$U_{з}, \text{ В}$
	x_1	x_2	x_3
нижняя	11	50	14
средняя	14	70	15
верхняя	17	90	16

По результатам физических испытаний с применением методологии многофакторного эксперимента была построена математическая модель (4) в форме полинома:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = 2,3825 - 0,6875 \cdot x_1 + 0,6825 \cdot x_2 - 0,0225 \cdot x_3 - 0,2075 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ \quad - 0,0125 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0175 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0125 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \\ I_{кз} = 29,725 - 6,875 \cdot x_1 + 8,525 \cdot x_2 - 0,225 \cdot x_3 - 2,075 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ \quad - 0,125 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,175 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,125 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \end{cases} \quad (4)$$

Так как технические возможности спроектированного стенда ограничены по диапазону изменения параметров $E_{п}$ и $I_{кз}$ по сравнению с приведенной ранее компьютерной моделью, для корректного сравнения результатов физического

эксперимента с результатами, полученными при компьютерном моделировании, решено пересчитать полиномы (2) под новые диапазоны изменения факторов (таблица 2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di}{dt} = 2,7668 - 0,7686 \cdot x_1 + 0,8005 \cdot x_2 + 0,0010 \cdot x_3 - 0,2228 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ \quad - 0,0002 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0007 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \\ I_{K3} = 34,456 - 7,766 \cdot x_1 + 9,961 \cdot x_2 + 0,006 \cdot x_3 - 2,246 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ \quad + 0,001 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \end{array} \right. \quad (5)$$

При подстановке в (4) и (5) средних значений факторов из таблицы 2 получили следующие результаты.

Для моделирования:

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= 2,77 \text{ А/мкс}, \\ I_{K3} &= 34,46 \text{ А}. \end{aligned}$$

Для физического макета:

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= 2,38 \text{ А/мкс}, \\ I_{K3} &= 29,73 \text{ А}. \end{aligned}$$

В заданном диапазоне изменений величин воздействия факторов I_K , E_{Π} , U_3 различие в результатах не превышает 15 %. Таким образом, подтверждена возможность использования методов теории факторного планирования экспериментов, для проектирования любых устройств транзисторной силовой электроники.

Третья глава посвящена оценке предельных величин ударного тока через транзистор, при которых наступает условный и безусловный отказ прибора. Безусловным считается отказ, связанный с полным повреждением транзистора; под безусловным понимался отказ, при котором не менее чем на 30 % снижалась величина блокирующего напряжения или возрастал ток утечки.

Испытания проводились на специально изготовленном стенде, позволяющем формировать стабилизированные импульсы тока заданной амплитуды (до 350 А) и длительности (от 100 до 1000 мкс) (рисунок 5). Предельная величина амплитуды тока обусловлена технической возможностью стенда.

Предложена методика проведения ресурсных испытаний с помощью разработанного стенда:

1. Комплектуется выборка транзисторов одного типа из одной партии в количестве не менее 50 шт.

2. При температуре окружающей среды (25 °С) измеряются информативные параметры (R_{th} , τ , Ш, $U_{бл}$, $I_{ут}$) и заносятся в таблицу.

3. Каждый транзистор подвергается испытаниям на воздействие одиночных импульсов тока с постепенным нарастанием его амплитуды. Начальное значение I_{TSM} устанавливается равным $1,5 \cdot I_{ном}$. Следующий одиночный импульс имеет приращение амплитуды $0,5 \cdot I_{ном}$.

4. После каждого импульса измеряются параметры: предельное блокирующее напряжение ($U_{бл}$) и ток утечки ($I_{ут}$). Данные заносятся в таблицу.

5. Увеличение амплитуды импульса тока I_{TSM} продолжается до тех пор, пока транзистор не выйдет из строя: короткое замыкание или обрыв между выводами коллектор – эмиттер.

6. По результатам испытаний строятся гистограммы распределения отказов и определяется функция огибающей – закон распределения отказов.

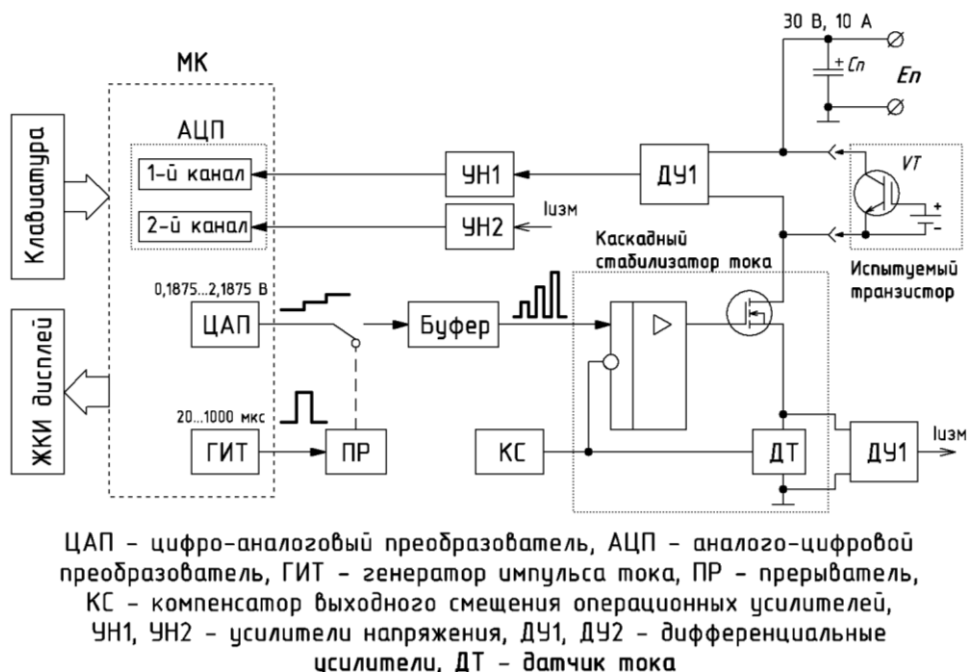


Рисунок 5 – Структурная схема устройства для проведения ресурсных испытаний IGBT транзисторов на воздействие ударных токов

Воздействие на транзисторы единичного импульса ударного тока амплитудой 350 А и длительностью 100 мкс не привело к отказам транзисторов. Поэтому было принято решение увеличить длительность импульсов тока при сохранении значения максимальной амплитуды 350 А. Предложена формула перерасчета импульса тока с амплитудой 350 А в расчетную условную амплитуду импульса с длительностью 100 мкс:

$$I = I_{\max} \cdot \sqrt{\Delta t_1 / \Delta t_0}, \quad (6)$$

где I – расчетная амплитуда импульса ударного тока, $I_{\max} = 350$ А – максимальная амплитуда импульса тока для стенда, $\Delta t_0 = 100$ мкс – заданная длительность импульса, Δt_1 – расчетная длительность импульса тока с амплитудой $I_{\max}$.

Гистограммы распределений I_{TSM} по условным и безусловным отказам приведены на рисунке 6.

Значения длительности 100 мкс и амплитуды, например, в 830 А импульса ударного тока являются не типичными для применения на практике при разработке преобразователя. Разработчику удобнее пользоваться значением I^2t при расчете необходимой амплитуды импульса тока, полученной при компьютерном моделировании или теоретическом расчете, и его длительности для оценки опасности повреждения транзистора, и расчете времени срабатывания защиты. Поэтому на гистограммах введена вторая ось ординат – I^2t .

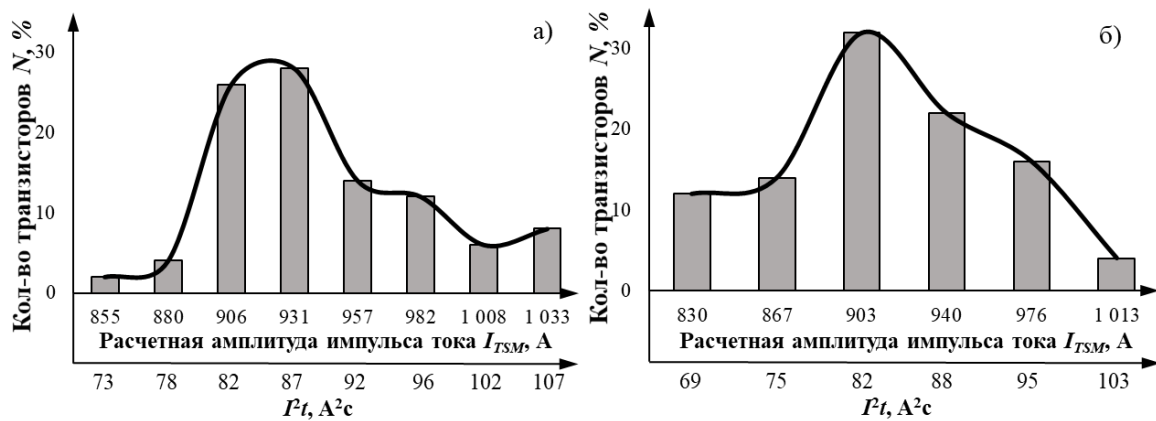


Рисунок 6 – Гистограммы распределения и их огибающие по условным отказам (а) и безусловным отказам (б)

По результатам эксперимента произведена оценка корреляционной связи между I_{TSM} и информативными параметрами ΔU , R_{th} , Π и τ , измеренными перед началом испытаний.

Наиболее заметна корреляционная связь между расчетным ударным током I_{TSM} и падением напряжения ΔU (рисунок 7). Значение коэффициента корреляции, равное 0,51, соответствует средней корреляционной связи между этими параметрами.

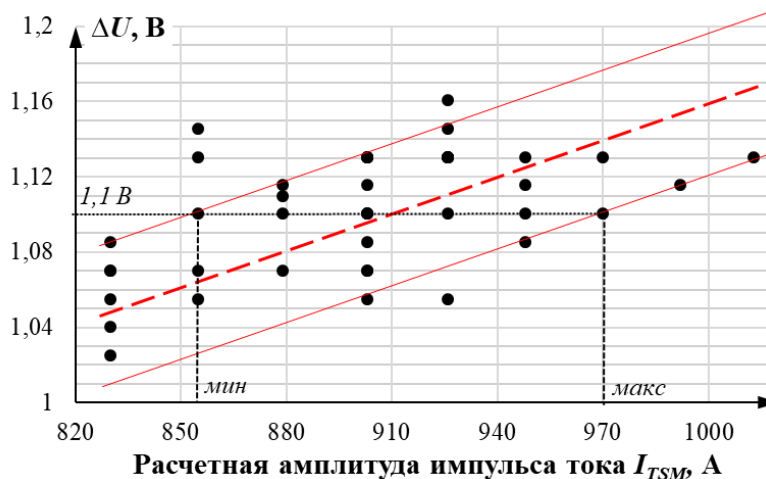


Рисунок 7 – Зависимость падения напряжения ΔU от расчетной амплитуды импульсов ударного тока, на которых наступил условный отказ

Определен коридор допустимого изменения падения напряжения ΔU транзистора на определенном рассчитанном ударном токе. Данный коридор имеет размер 0,076 В, и на графике его границы изображены сплошными линиями. Штриховой линией обозначено среднее значение ΔU в коридоре. Значения ΔU , которые не попадают в данный коридор, считаются выбросами, которые отрицательно влияют на корреляционную связь.

По верхней границе коридора можно оценить, какой минимальный расчетный ударный ток выдержит IGBT транзистор с таким значением падения напряжения ΔU . Нижняя граница позволяет оценить максимально возможное значение расчетной амплитуды ударного тока, который может выдержать транзистор. Таким образом можно оценить диапазон расчетных ударных токов, на которых с большей вероятностью произойдет отказ IGBT транзистора.

С помощью графического анализа зависимости I_{TSM} от R_{th} сделан вывод, что большое тепловое сопротивление транзистора увеличивает вероятность выхода его из строя на меньшей амплитуде импульса тока.

Какой-либо существенной линейной корреляционной зависимости между I_{TSM} и R_{th} , β , τ не обнаружено. Очевидно, это связано с малой длительностью импульса тока. За время действия импульса длительностью не более 870 мкс кристалл транзистора не успевает передать тепло корпусу, что приводит к ослаблению влияния параметров, связанных с тепловым сопротивлением кристалл – корпус. Такой подход позволяет грубо отбраковать потенциально ненадежные образцы (ПНО).

В четвертой главе предложены способ комплектования транзисторов по тепловому критерию и метод отбраковки потенциально ненадежных образцов на этапе их комплектования.

Для произвольно набранной партии однотипных транзисторов марки *IRG4PH50VD* приводятся результаты расчетной оценки температуры каждого транзистора с учетом выделяемой в нем мощности потерь и его теплового сопротивления. Показано, что температуры транзисторов в выборке при одинаковом нагрузочном токе могут различаться на 14-15 градусов, что весьма существенно влияет на их ресурсные показатели. Поэтому при комплектовании транзисторных сборок рекомендовано осуществлять подбор транзисторов с учетом критерия допустимого различия их температур. На рисунке 8 приведена зависимость числа транзисторов из партии (50 единиц), которые могут быть соединены для параллельной работы с учетом ограничения на разницу их температур.

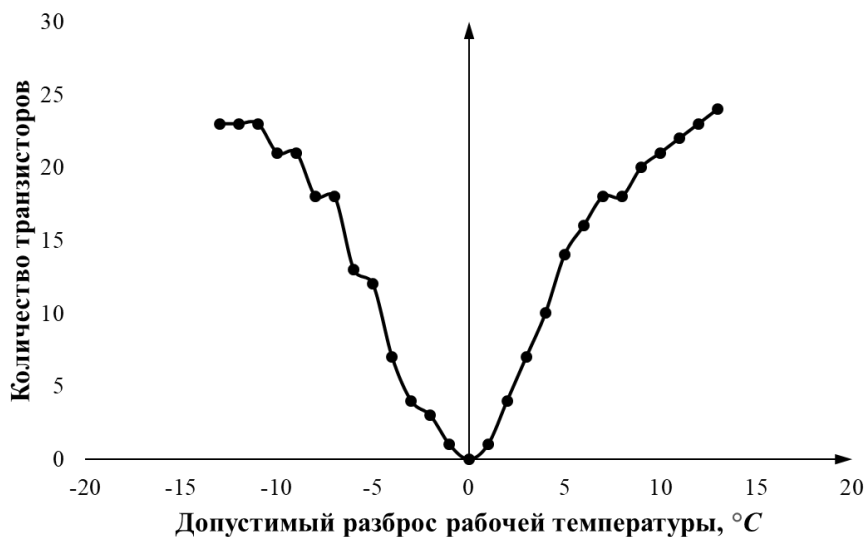


Рисунок 8 – Зависимость количества транзисторов в сборке от величины допустимого различия в их температурах относительно средней температуры п/п структуры $T_{cp} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$

Такая зависимость справедлива для всего диапазона средних значений рабочих температур, кроме зоны вблизи предельно допустимой температуры.

Подбор транзисторов при комплектовании сборок по тепловому критерию – процесс достаточно сложный и длительный. Объясняется это, прежде всего, трудоемкостью измерения теплового сопротивления у каждого транзистора. Однако решение этой проблемы можно существенно упростить,

если измерение теплового сопротивления заменить процедурой оперативной отбраковки транзисторов с повышенным значением этого параметра.

Автором была предложена прогнозная модель оценки величины R_{th} . За основу принята электротепловая модель прибора в форме экспоненциальной зависимости термочувствительного параметра (ТЧП) транзистора от времени нагрева. По измеренным значениям ТЧП на начальном участке экспоненты на интервале времени в несколько секунд можно экстраполировать эту зависимость на более длительный интервал вплоть до достижения установившегося теплового состояния. Поскольку прогнозная величина ТЧП связана с величиной теплового сопротивления прибора, это позволяет количественно оценить величину R_{th} . В результате исследований обнаружена четкая корреляционная связь между прогнозными и реальными величинами R_{th} (рисунок 9).

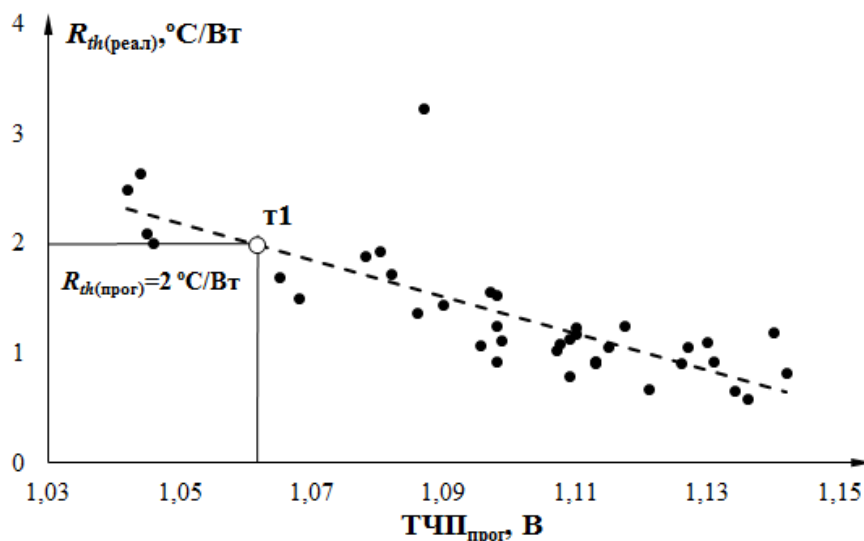


Рисунок 9 – Зависимость реальных R_{th} , полученных традиционным способом, от прогнозных значений ТЧП

Средний коэффициент коррекции для исследуемой партии приборов (50 единиц) оказался равным 0,88, что подтверждает хорошую сходимость результатов. Средняя погрешность такой методики оценки величины R_{th} не превышает 10 %.

В качестве дополнительных параметров для отбраковки приборов по тепловым критериям могут служить ширина Π или площадь S петли теплового гистерезиса (ПТГ) ПВАХ транзистора и его тепловая постоянная τ .

Первый параметр отображает величину тепловой энергии, выделяемой в приборе, второй – скорость её передачи от структуры к корпусу прибора и далее к охладителю. Чем больше площадь S или ширина Π ПТГ, тем больше энергии выделяется в приборе и должен быть больше его нагрев.

Можно было предположить, что параметры S и τ должны иметь корреляционную связь с разрушающей величиной ударного тока I_{TSM} . Однако такое предположение экспериментально не подтвердилось. Поэтому параметры Π , S и τ могут быть полезны только для отбраковки ПНО при близких к номинальным режимах работы, т. е. при учете средней температуры.

Более приемлемыми для решения поставленной задачи отбраковки ПНО являются такие параметры как блокирующее напряжение и ток утечки транзисторов. В рамках данной работы при участии автора был разработан и изготовлен достаточно простой, надежный и удобный в работе измеритель параметров ВАХ транзистора в закрытом состоянии. Прибор позволяет измерять блокирующее напряжение $U_{бл}$ транзисторов в диапазоне 100 – 1500 В и токи утечки $I_{ут}$ в диапазоне 1 – 1000 мкА. Структурная схема приведена на рисунке 10.

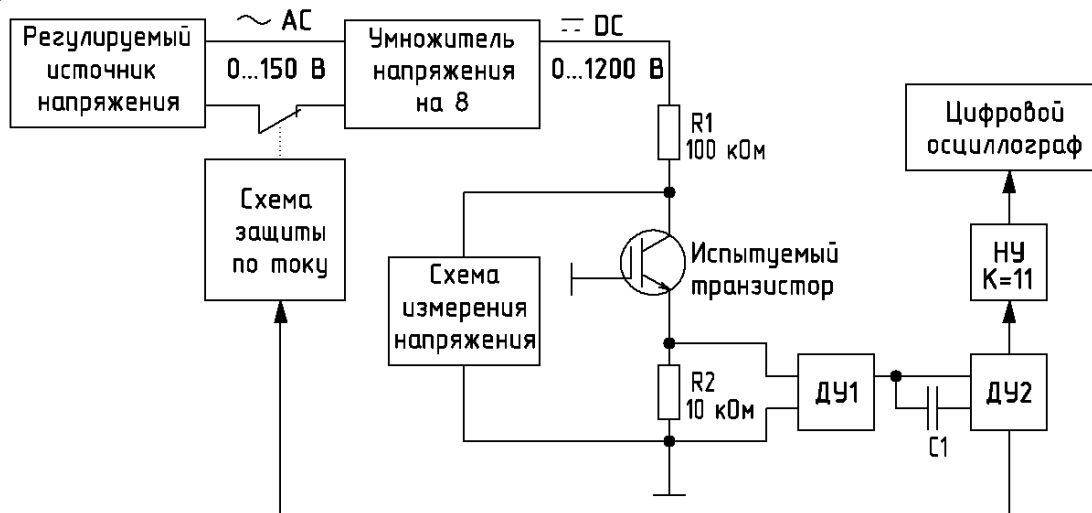


Рисунок 10 – Структурная схема стенда для измерения тока утечки и блокирующего напряжения транзисторов

В процессе испытания транзисторов при действии импульсов тока большой амплитуды, но малой длительности выявлено, что в критической зоне ударного тока I_{TSM} запирающие свойства транзисторов ($U_{бл}$) начинают быстро снижаться, а ток утечки – возрастать (рисунок 11). Поэтому периодические измерения этих параметров в процессе эксплуатации аппаратов позволяют определить момент наступления предотказного состояния транзистора и принять соответствующие меры.

За предотказное состояние (условный отказ) принималось снижение величины блокирующего напряжения транзистора на 30 % от измеренного до проведения испытаний (синяя штриховая линия). Если в преобразователе блокирующее напряжение IGBT транзистора меньше либо равно уровню «Предотказное состояние» (синяя штриховая линия), то такой прибор необходимо заменить.

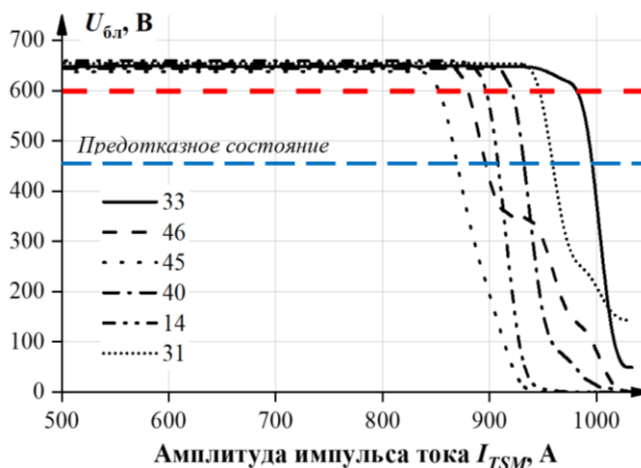


Рисунок 11 – Зависимость блокирующего напряжения IGBT транзисторов от расчетной амплитуды импульса ударного тока (случайная выборка транзисторов из партии 50 штук)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложенная методика для расчётной оценки величины тока короткого замыкания на этапе проектирования преобразовательного устройства позволяет сформулировать требования к быстродействию устройств защиты по току и обоснованному выбору силовых транзисторов. В основу методики были заложены принципы планирования многофакторных экспериментов. Такой подход в сфере проектирования преобразовательных устройств ранее не применялся. Показано, что наиболее значимыми факторами, влияющими на величину тока короткого замыкания $I_{кз}$, являются длина кабеля от преобразователя до нагрузки I_k , величина напряжения питания преобразователя E_n и амплитуда импульса на затворе транзисторов в инверторе U_3 . Результаты расчётной оценки величины тока короткого замыкания были проверены путем проведения физического эксперимента. Различие в результатах не превышает 15 %. Поэтому такая методика расчётной оценки величины тока короткого замыкания может быть рекомендована при проектировании не только инверторной техники, но и других видов преобразователей.

2. Разработан и изготовлен стенд для проведения ресурсных испытаний силовых транзисторов при воздействии ударных токов и предложена методика испытаний. На стенде проведены испытания партии силовых транзисторов в количестве 50 штук. Полученные распределения отказов (условных и безусловных) позволяют определять зону и границы безопасных для транзисторов режимов работы по величине ударных токов.

3. Оценены значения коэффициентов корреляции между величиной ударного тока (I_{TSM}) и рядом информативных параметров транзисторов (ΔU , R_{th} , β и τ), измеренных до начала испытаний. Показано, что наиболее информативным является параметр ΔU (падение напряжения на транзисторе в состоянии высокой проводимости). Предложен способ отбраковки потенциально ненадежных образцов по сочетанию двух параметров (R_{th} и ΔU).

4. Предложен новый способ экспресс-оценки теплового сопротивления R_{th} силового транзистора, позволяющий сократить время такой оценки в несколько раз по сравнению с традиционной методикой, предполагающей этап построения градуировочной зависимости.

5. Показано, что разница в нагреве отдельных транзисторов при их параллельном соединении в силовом модуле преобразователя может достигать 14-15° С, что в предельных значениях токовой нагрузки может оказаться критическим для работоспособности приборов. Для снижения такой опасности предложен способ комплектования транзисторных модулей (сборок) из отдельных корпусированных транзисторов по тепловому критерию, когда разница в температуре приборов не будет превышать заранее заданного значения (например, в 5, 10, 15 или 20° С).

6. В процессе длительной эксплуатации транзисторов в них происходит накопление различных деградиационных изменений в параметрах и характеристиках. Это проявляется, в том числе, в снижении запорных (блокирующих) свойств транзисторов. Предложено устройство для текущего

оперативного измерения этих параметров и определения необходимости проведения профилактических измерений.

Таким образом, результаты, полученные в процессе выполнения диссертационной работы, дают возможность при проектировании и эксплуатации преобразователей принять комплекс мер для обеспечения их высоких эксплуатационных возможностей.

Предложенные в диссертационной работе модели и методы могут использоваться при построении широкого класса транзисторных преобразовательных устройств.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Воронков, А.А. Способы измерения тепловых сопротивлений силовых полупроводниковых приборов / В.М. Бардин, А.А. Воронков // Практическая силовая электроника. – 2017. – № 3 (67). – С. 38-41.

2. Воронков, А.А. Ещё раз о проблеме группового соединения IGBT транзисторов в силовых модулях преобразователей / В.М. Бардин, А.А. Воронков, П.Ю. Карпунин // Практическая силовая электроника. – 2017. – № 4 (68). – С. 43-46.

3. Воронков, А.А. Зависимость тока короткого замыкания в транзисторном инверторе от факторов электрической цепи / В.М. Бардин, А.А. Воронков, Д.В. Пьянзин // Практическая силовая электроника. – 2018. – № 1 (69). – С. 46-48.

4. Воронков, А.А. Способ экспресс-оценки величины теплового сопротивления силовых полупроводниковых приборов / В.М. Бардин, А.А. Воронков, Н.И. Кривошеев // Практическая силовая электроника. – 2019. – № 1 (73). – С. 45-48.

В изданиях, входящих в базу цитирования Scopus

5. Voronkov, A.A. The application of the theory of multifactorial experiment to determine the value of the short-circuit current in a transistor inverter / A.A. Voronkov, V.M. Bardin, D.V. Pyanzin // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2020, pp. 290-294.

6. Voronkov, A.A. Methods of Improving the Reliability of Power Transistor Modules in Electric Energy Converters at the Stage of Completion / V.M. Bardin, A.A. Voronkov // Russian Electrical Engineering. – 2020. – № 10. – Vol. 91. – P. 634-637.

7. Voronkov, A.A. The dependence of short-circuit current in a transistor inverter on the parameters of an electric circuit / V.M. Bardin, A.A. Voronkov, D.V. P'yanzin // Russian Electrical Engineering. – Vol. 91. – №10. – 2020. – P. 634-637.

Патент

8. Пат. 2655736 Российская Федерация, МПК G01R 31/26. Способ оценки тепловой постоянной силового полупроводникового прибора / Бардин В.М., Воронков А.А.; заявитель и патентообладатель МГУ им. Н.П. Огарева. – № 2017130896; заявл. 01.09.2017; опубл. 29.05.2018, Бюл. № 16. – 9 с.

В других изданиях

9. Воронков, А.А. Моделирование процессов в транзисторном инверторе при коротких замыканиях / А.А. Воронков // Материалы XX научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва. – Саранск, 2016. – С. 23-25.

10. Воронков, А.А. Переходные процессы в цепях с силовыми транзисторами при внешних коротких замыканиях / А.А. Воронков // Фундаментальные и прикладные проблемы физики: материалы X Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск, 2017. – С. 72-77.

11. Воронков, А.А. Петля теплового гистерезиса вольт-амперной характеристики силового полупроводникового прибора / В.М. Бардин, А.А. Воронков, Д.П. Новиков // Силовая электроника. – 2017. – № 3 (66). – С. 20-21.

12. Воронков, А.А. Способы измерения величины теплового сопротивления силовых транзисторов / А.А. Воронков, К.В. Киреев, О.В. Душин // Молодежь в науке: новые аргументы: сб. науч. работ IV Междунар. молодеж. науч. конф. – Липецк, 2018. – С. 41-47.

13. Воронков, А.А. Оценка величины тока через транзисторы инвертора при коротком замыкании в цепи нагрузки / А.А. Воронков, А.Ю. Ивлиев // Огаревские чтения: материалы XLVI науч. конф. – Саранск, 2018. – С. 27-32.

14. Воронков, А.А. Исследовательский стенд для ресурсных испытаний силовых транзисторов / А.А. Воронков, Ю.С. Мухин // Огаревские чтения: материалы XLVII науч. конф. – Саранск, 2019. – С. 58-61.

Подписано в печать 23.04.2021

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 20

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Тел.: 8 (8452) 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru