

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ДУБОВИЦКИЙ Геннадий Петрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ  
ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Специальность 05.12.08 -  
"Электронная техника и приборы"

Автореферат диссертации на  
соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинский  
Политехнический институт  
**БИБЛИОТЕКА**

Челябинск, 1974

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок и в СПКБ.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент М.В.ГЕЛЬМАН.

Официальные оппоненты: доктор технических наук С.Д.СОКОЛОВ (г.Москва);

кандидат технических наук А.Н.САЛЫКОВ (г.Челябинск).

Ведущее предприятие - завод "Уралэлектротяжмаш" им.В.И.Ленина.

Автореферат разослан "\_\_\_" 1974 г.

Защита диссертации состоится "\_\_\_" 1974 г., в 15 часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней приборостроительного и энергетического факультетов Челябинского политехнического института им.Ленинского комсомола в ауд. \_\_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454044, г.Челябинск, 44, проспект им.В.И.Ленина, 76.

Ученый Секретарь Совета  
кандидат технических наук, доцент

 А.А.КОРОЛЕНКО/

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Выполнение решений XXIV съезда КПСС по развитию народного хозяйства страны во многом определяется успехами силовой полупроводниковой техники, занимающей ведущее место в электротехнике и определяющей научно-технический прогресс во многих областях народного хозяйства.

Силовые полупроводниковые вентили (диоды, тиристоры, симисторы) широко используются в преобразовательных устройствах для электрифицированного транспорта, электропривода постоянного и переменного тока, возбуждения гидро- и турбогенераторов и т.д.

Результаты исследований и опыт эксплуатации показали, что параметры силовых полупроводниковых вентилей (СПВ) могут значительно изменяться во время эксплуатации вследствие скрытых дефектов производства, а также вследствие их естественного износа ("старения"). Поэтому безотказная работа преобразовательных устройств во многом определяется не только правильным режимом работы СПВ, но и надлежащим контролем их параметров при изготовлении, наладке и эксплуатации преобразователей. Вместе с тем вследствие технологического разброса характеристики и параметры СПВ одного и того же типа отличаются, поэтому при замене СПВ с ухудшенными параметрами, а также аварийно-вышедших из строя целесообразно осуществлять контроль параметров вновь устанавливаемых и выдержавших аварийные перегрузки СПВ.

Таким образом, в условиях изготовления, наладки и эксплуатации преобразовательных устройств возникает потребность в приборах для контроля наиболее важных параметров СПВ. При этом наиболее удобны переносные приборы, позволяющие производить контроль непосредственно в преобразовательных установках.

Большая работа по разработке методов контроля параметров СПВ выполнена под руководством советских ученых А.Ф.Кротериса, В.А.Кузьмина, В.А.Лабунцова, И.Д.Пашенцева, С.Д.Соколова, В.Е.Челикова, Г.А.Лшкнази, В.М.Бардина, В.Б.Братолюбова, В.А.Горохова, Ю.А.Чеснокова и других. Разработку аппаратуры для контроля параметров СПВ при серийном изготовлении проводят коллективы ВЭИ им. В.И.Ленина, НИИ завода "Электровыпрямитель", Саранского завода "Электровыпрямитель", Таллинского электротехнического завода им. М.И.Калинина, ЛИИЖТа, МЭИ и других. Однако эта аппаратура неуниверсальна и в основном стационарна. Только по разработке НИИ завода "Электровыпрямитель

миттель" выпускался переносный прибор типа ПКПСВ-2. Разработка методов контроля параметров СПВ и аппаратуры проводится также в ряде зарубежных фирм, таких как Дженирал Электрик, Вестингауз, AEG, Brown Boveri и др.

Цель работы. Разработка и исследование переносных приборов для контроля параметров силовых полупроводниковых вентилей.

В связи с этим оказалось необходимым:

1/оценить существующие и выбрать наиболее приемлемые методы испытания СПВ;

2/проводить анализ принципов построения переносных приборов для контроля параметров СПВ с целью выбора оптимальных и на основе анализа сформулировать требования к генераторам испытательных импульсов;

3/проанализировать процессы в генераторах испытательных импульсов и разработать методику выбора их элементов, а также способы снижения массо-габаритных показателей приборов;

4/разработать комплект переносных приборов для контроля параметров СПВ и провести испытания СПВ с помощью разработанных приборов.

Методика выполнения исследования. Работа содержит теоретические и экспериментальные исследования. Разработка приборов производилась на основе методов научного анализа имеющихся теоретических и практических данных, по результатам которого путем сравнения выбирались оптимальные принципы построения отдельных узлов и схем, отвечающих необходимым требованиям.

Для решения отдельных вопросов применялись аналитические, графо-аналитические методы и методы математической статистики.

Построение математической модели генераторов испытательных импульсов выполнялось аналитическими методами путем анализа процессов включения тиристоров и электромагнитных процессов в отдельных генераторах с использованием ряда допущений. По результатам анализа, а также на базе экспериментальных исследований определялось влияние отдельных факторов и элементов на режим работы генераторов импульсов (ГИ) и точность контроля параметров СПВ.

Научная новизна. На основе анализа произведенного оценка и выбор наиболее рациональных принципов построения ГИ переносных приборов для контроля параметров СПВ. Проведен анализ электромагнитных процессов в ГИ с учетом предложенного способа размаг-

ничивания сердечника трансформатора, указаны пути снижения массогабаритных показателей ГИ. На основе анализа процессов включения тиристоров и электромагнитных процессов в генераторах, а также экспериментальных исследований разработаны рекомендации и методика выбора параметров элементов ГИ. Предложен ряд практических схем приборов для контроля параметров СПВ.

**Практическая ценность.** Разработанные и изготовленные в Челябинском политехническом институте приборы для контроля параметров СПВ в течение 1969-74 г.г. внедрены на ряде предприятий страны различных министерств: в ПНУ треста "Умурал - электромонтаж" и Лен ПЭО ВНИИПРОЕКТэлектромонтаж Минмонтажспецстрой, на Орско-Халиловском и Магнитогорском металлургических комбинатах Минчермета, на заводе "Уралэлектротяжмаш" им. В.И.Ленина и Таллинском электротехническом заводе им.М.И.Калинина Минэлектротехпрома.

Приказом Главэлектромонтажа и Укрглавэлектромонтажа Министерства монтажных и специальных строительных работ СССР № 134/26 от 19/18.05.71 г. принято постановление об изготовлении приборов типов ИДТ-1Б и ИДТ-2Б.

По нашим разработкам изготавливались приборы в ПНУ треста "Умуралэлектромонтаж" и ПТО "Уралэнергоцветмет". Вместе с тем по запросам высилась техническая документация на приборы в ВОИ им. В.И. Ленина, на Московский завод тепловой автоматики и другие организации.

Изготовленный в студенческом проектно-конструкторском бюро (СПКБ) ЧПИ комплект приборов типов ИДТ-1Б, ИДТ-2Б экспонировался на Всесоюзной выставке творчества молодых НТТМ-72 и на ВДНХ в павильоне "Электротехника". Комплект приборов удостоен Диплома II степени ВДНХ и Диплома Лауреата НТТМ-72.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и её отдельные разделы докладывались и обсуждались на:

научно-технической конференции по "Тиристорному управляемому асинхронному электроприводу" (г. Свердловск, 1968 г.);

заседании Технического Совета по результатам наладки стана "2500" ММК (г. Магнитогорск, 1969 г.);

научно-технической конференции Челябинского института электрификации и механизации сельского хозяйства (г. Челябинск, 1972 г.);

ежегодных научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (г. Челябинск, 1970-73 г.г.).

**Публикация.** По результатам выполненных исследований опубликовано 13 работ.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка использованной литературы и содержит 132 страницы машинописного текста, 87 рисунков, приложение (25 страниц). Список использованной литературы включает в себя 125 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе кратко рассмотрены основные характеристики и параметры СИВ, анализ их нестабильности; дан краткий критический обзор существующих методов и аппаратуры для контроля параметров СИВ.

На основе обзора основных вольтамперных характеристик (ВАХ) и параметров СИВ, анализа их нестабильности по экспериментальным и литературным данным показано, что в ходе эксплуатации имеет место "дрейф" параметров и отказы СИВ. При рассмотрении интенсивности отказов СИВ установлено, что основная масса отказов СИВ происходит в начальный период работы, в особенности при форсированном режиме. На основе анализа экспериментальных и литературных данных выяснено, что причиной отказов СИВ является снижение напряжения класса и увеличение обратного тока и тока утечки, увеличения прямого падения напряжения, теплового сопротивления, тока удержания и времени выключения, снижение отпирающего тока управления и критической скорости нарастания прямого напряжения. Поэтому для повышения надежности работы установок с СИВ целесообразно проводить периодический контроль указанных параметров вентилей, установив определенный уровень их отклонения от начальных значений, применимая для этого испытательные переносные приборы.

При контроле параметров СИВ необходимо учитывать требования ранее существовавших стандартов и технических условий на СИВ, так как по ним выпущено и находится в эксплуатации огромное количество вентилей, и требования стандартов и ГУ, разработанных в соответствии с рекомендациями СЭВ по стандартизации.

На основе анализа существующих методов и аппаратуры для испытания СИВ в запертом состоянии установлено, что процесс испытания СИВ в запертом состоянии в общем случае сводится к проверке напряжения класса, обратного тока и тока утечки. Класс СИВ определяется обратным пробивным напряжением и напряжением переключения. Так как точных критериев для определения обратного пробивно-

го напряжения в настоящее время не существует, то во избежание повреждения испытываемых вентиляй при их классификации принимают приближенные критерии, характеризующие ВАХ в районе пробоя. В качестве таких критериев используют напряжение загиба обратной ветви ВАХ или напряжение переключения; заданную достаточно малую величину обратного динамического сопротивления; заданную максимальную мощность, выделяющуюся в испытываемом вентиле при протекании обратного тока или тока утечки; заданную максимальную величину обратного тока или тока утечки. В соответствии с этими критериями применяются те или иные методы классификации СПВ. Для классификации СПВ применяются ГИ как на основе источника напряжения, выпрямленного на однополупериодном неуправляемом выпрямителе с автотрансформатором и повышающим трансформатором, так и на основе источника тока, выполненного на высоковольтном выпрямителе с нелинейным двухполюсником, работающим в режиме стабилизатора тока. Классификация СПВ с помощью ГИ, выполненных на основе однополупериодных неуправляемых выпрямителей имеет ряд недостатков: 1/не соответствует требованиям ГОСТа 14069-72 и ГОСТа 10662-73 по проверке класса СПВ у потребителей; 2/приводит к перегреву и тепловому пробою СПВ; 3/плохо использует мощность повышающего трансформатора.

ГИ с нелинейным активным двухполюсником, который может работать как в режиме стабилизатора тока, так и в ключевом режиме, имеют ряд преимуществ по сравнению с выше рассмотренными ГИ: 1/позволяют формировать испытательные импульсы с любой длительностью и частотой следования; 2/имеют повышенный коэффициент использования напряжения источника питания; 3/обеспечивают защиту СПВ от повреждений при использовании двухполюсника как быстродействующего бесконтактного ключа. При применении в ГИ с нелинейным активным двухполюсником блока защиты, настроенного на максимально допустимый ток испытываемого вентиля можно считать, что классификация СПВ осуществляется по одному из двух критериев: напряжению загиба или максимально допустимому обратному току или току утечки.

Высокую надежность и объективность определения класса СПВ имеют установки с использованием генератора серии нарастающих калиброванных импульсов напряжения с электронной защитой, в которых при классификации СПВ используется один из двух критериев: заданное обратное динамическое сопротивление или предельно допустимый обратный ток или ток утечки. Однако применение данных установок требует предварительного повреждения большого количества СПВ для получения точного качественного критерия настройки защиты. Это представляет трудный и дорогостоящий процесс.

Анализ устройств для классификации СПВ показывает, что в переносных приборах для контроля параметров СПВ в запертом состоянии наиболее приемлемо применение ГИ на основе нелинейного активного двухполюсника. Это позволяет производить классификацию СПВ по любому из рассмотренных критериев. В настоящее время для таких ГИ не обосновываются режимы работы и принципы построения, позволяющие уменьшить массо-габаритные показатели переносных приборов при допустимых погрешностях контроля параметров СПВ.

При определении критической скорости нарастания прямого напряжения наиболее перспективным является применение для формирования линейно нарастающего прямого напряжения ГИ на основе нелинейного активного двухполюсника. Однако, в настоящее время нет единого подхода к выбору величины емкости конденсатора, подключаемого параллельно испытуемому тиристору и не рассматривается вопрос определения её оптимальной величины, исходя из требований уменьшения массо-габаритных показателей переносных приборов. Не учитывается также влияние нелинейности емкости испытуемого тиристора на погрешность определения критической скорости нарастания прямого напряжения.

Существующие в настоящее время методы и аппаратура для определения прямого падения напряжения при испытании СПВ на промышленной частоте не пригодны для практического применения в условиях наладки и эксплуатации преобразователей вследствие громоздкости испытательных установок и возможности перегрева СПВ при испытании.

Уменьшение массо-габаритных показателей испытательной установки и нагрева СПВ возможно при применении пониженной частоты следования импульсов тока. Ещё в 1966–68 г. г. при изготовлении переносных приборов автором был применен этот метод. При этом ГИ тока могут быть выполнены как на основе управляемого выпрямителя, подсоединеного к питающей сети, через согласующий трансформатор, так и на основе формирователя тока, выполненного на LC колебательном контуре. Для дальнейшего уменьшения массо-габаритных показателей переносных приборов необходимо рассмотреть вопрос возможного укорочения испытательных импульсов, а также сделать анализ процессов в ГИ.

Приборы предназначенные для контроля параметров СПВ содержат ГИ тока и напряжения специальной формы и измерительные устройства. В настоящее время измерительные устройства могут быть выполнены в весьма малых объемах, поэтому массо-габаритные показатели приборов для испытания СПВ определяются показателями ГИ. В соответствии с

этим основной путь снижения массо-габаритных показателей - рациональный выбор ГИ и оптимизация их параметров.

ГИ тока и напряжения можно разделить по связи с питающей сетью на две группы: с непосредственной связью и с промежуточным емкостным накопителем. В свою очередь каждая из этих групп может быть разбита по управляемости коммутирующих элементов на подгруппы: неуправляемые, с частичным управлением и с полным управлением коммутирующих элементов. Коммутирующие элементы могут быть диодные, тиатронные, с магнитными насыщающимися элементами, тиристорные, транзисторные, электронно-ламповые. По месту включения коммутирующих элементов ГИ можно разделить на генераторы с коммутирующим элементом в первичной или вторичной цепях согласующего трансформатора. При этом на первичной стороне трансформатора могут применяться коммутирующие элементы только с частичным или полным управлением. В зависимости от режима работы ГИ делятся на генераторы тока или напряжения. По назначению их можно разделить на генераторы для контроля параметров СПВ в запертом состоянии, в проводящем состоянии и контроля критической скорости нарастания прямого напряжения.

В настоящее время из коммутирующих элементов наибольшее распространение получили диоды, транзисторы, электронные лампы, тиатроны и тиристоры. Так как ГИ на диодах и тиатронах присущ ряд недостатков, а ГИ на транзисторах, в связи с ограниченными рабочими напряжениями и мощностью применимы пока для испытания вентилей низких классов малой и средней мощности и для испытания цепей управления тиристоров, основное внимание здесь уделено более приемлемым в настоящее время тиристорным и электронно-ламповым генераторам с непосредственной связью с питающей сетью и с промежуточным емкостным накопителем. При этом электронно-ламповые генераторы (ЭЛГИ) находят применение только для контроля параметров СПВ в запертом состоянии и определения допустимой скорости нарастания прямого напряжения, тиристорные генераторы находят более широкое применение. В дальнейшем для краткости названия ГИ тиристорные генераторы с непосредственной связью будем называть тиристорно-трансформаторными (ТТГИ), с промежуточным емкостным накопителем - тиристорно-конденсаторными (ТКГИ).

Во второй главе рассматриваются результаты исследований и разработок ЭЛГИ для испытания СПВ в запертом состоянии с точки зрения снижения их массо-габаритных показателей при сохранении заданной точности контроля параметров СПВ. При этом на основе анализа погрешностей контроля параметров СПВ показано, что применение

измерительных приборов высокой точности, погрешность контроля параметров СПВ определяется погрешностью, вносимой ГИ.

На основе анализа уравнения ВАХ СПВ и её кусочно-линейной аппроксимации определены требования к режимам работы ЭЛГИ при классификации СПВ, согласно которым указывается на целесообразность работы ЭЛГИ в режиме генератора э.д.с. при определении обратного тока и тока утечки, в режиме генератора тока при определении напряжения загиба или напряжения переключения, показано влияние разброса величины внутреннего сопротивления генератора э.д.с. на погрешность поддержания испытательного напряжения.

Анализ массо-габаритных показателей ЭЛГИ, работающего в режиме генератора э.д.с. показал, что выполнение генератора без промежуточного емкостного накопителя при испытании СПВ с помощью редких импульсов неэффективно из-за высоких удельных массо-габаритных показателей и плохого использования расчетной мощности силового трансформатора. Наиболее перспективным является ЭЛГИ с промежуточным емкостным накопителем. При этом на основе анализа работы ЭЛГИ показано, что его объем и масса определяются функциональными зависимостями

$$\left. \begin{aligned} V_{ti} &= F_1(R_n, t_u, f_n, K_p, U_c, U_{Kni}) + F_3(R_n, t_u, f_n, K_p, U_t, C, U_{Kni}), \\ G_{ti} &= F_2(R_n, t_u, f_n, K_p, g_c, U_{Kni}) + F_4(R_n, t_u, f_n, K_p, g_t, C, U_{Kni}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $R_n$  - сопротивление нагрузки;

$t_u$  - длительность испытательного импульса;

$K_p$  - коэффициент разряда накопительного конденсатора;

$U_{Kni}$  - напряжение  $i$ -того класса испытываемого СПВ;

$g_c, U_c$  - удельные массо-габаритные показатели конденсатора;

$g_t, U_t$  - удельные массо-габаритные показатели согласующего трансформатора;

$f_n$  - частота следования испытательных импульсов.

В связи с тем, что все параметры, кроме  $K_p$ , заданы, а требования к выбору  $K_p$  противоречивы, задачу определения минимума массо-габаритных показателей ЭЛГИ с емкостным накопителем предложено свести к определению  $K_p$  из решения уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d G_{ti}}{d K_p} &= 0, \\ \frac{d V_{ti}}{d K_p} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Из рассмотрения зависимостей массы и объема ЭЛГИ с емкостным накопителем от коэффициента разряда, представленной на рис. I сле-

дует, что величины оптимальных коэффициентов разряда по массе и объему в общем случае отличаются друг от друга.

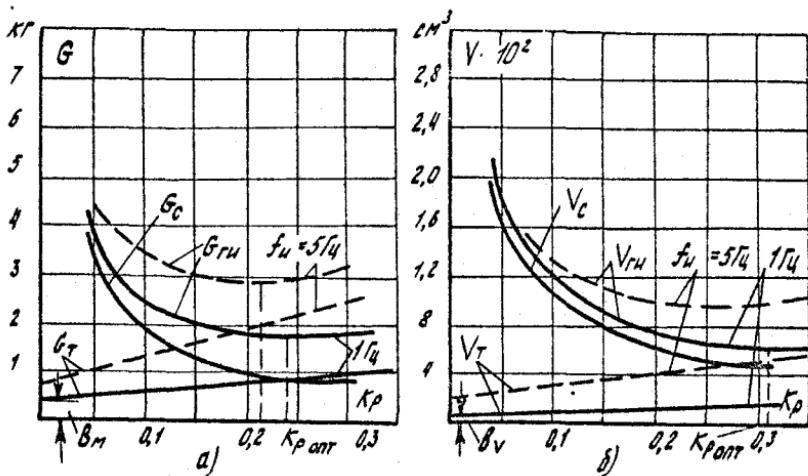


Рис. I

Проведенный анализ удельных массо-габаритных показателей ЭЛГИ показал, что эффективность использования генераторов с промежуточным емкостным накопителем выше, чем генераторов с непосредственной связью с сетью, при условии применения конденсаторов с хорошими удельными массо-габаритными показателями.

На основе анализа процесса нарастания прямого напряжения на тиристоре с учетом нелинейности дифференциальной емкости испытываемого тиристора показано, что при определении критической скорости нарастания прямого напряжения с помощью генератора э.д.с. фронт нарастания прямого напряжения на тиристоре отличается от экспоненциальной формы и скорость нарастания непостоянна.

При этом процесс нарастания прямого напряжения на тиристоре описывался с помощью уравнения фазовой траектории

$$\frac{dx}{dt} = (1-x) \frac{(1+\alpha_0 x)^{\frac{1}{3}}}{1 + \frac{C_2}{C_0} (1+\alpha_0 x)^{\frac{1}{3}}}, \quad (3)$$

а степень линейности рабочего участка с помощью коэффициента нелинейности

$$\xi = \left| 1 - \frac{\left(1 + \frac{C_2}{C_0}(1+a_0x)\right)^{\frac{1}{3}}}{\left(1-a_0x\right)\left(1+a_0x\right)^{\frac{1}{3}}\left(1+\frac{C_2}{C_0}\right)} \right|, \quad (4)$$

где  $x = \frac{U_c}{E_a}$ ;  $t = \frac{t}{T}$ ;  $T = RC_0$ ;  $a_0 = \frac{E_a}{\varphi}$ ,

$E_a$  — э.д.с. источника питания;

$U_c$  — напряжение на аноде тиристора;

$R$  — сопротивление ограничивающего резистора;  
 $C_0$  — ёмкость центрального  $p-n$  перехода тиристора при отсутствии внешнего напряжения на нем;

$\varphi$  — контактная разность потенциалов  $p-n$  перехода.

При определении критической скорости нарастания прямого напряжения на тиристоре с помощью генератора тока процесс нарастания прямого напряжения оценивался по уравнению фазовой траектории

$$\frac{dx}{dt} = \frac{R}{R_i} (b_0 \cdot x) \frac{\left(1+a_0x\right)^{\frac{1}{3}}}{1 + \frac{C_2}{C_0}\left(1+a_0x\right)^{\frac{1}{3}}}, \quad (5)$$

а степень линейности рабочего участка — с помощью коэффициента нелинейности

$$\xi = \left| 1 - \frac{b_0 \left[ 1 + \frac{C_2}{C_0} (1+a_0x)^{\frac{1}{3}} \right]}{(b_0 \cdot x)(1+a_0x)^{\frac{1}{3}} \left( 1 + \frac{C_2}{C_0} \right)} \right|, \quad (6)$$

где  $b_0 = \frac{\mu(E_{g_0} - E_{g_0})}{E_a}$ ;  $\mu = \left| \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right|_{I_a=\text{const}}$ ;  $R_i = \left| \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right|_{U_a=\text{const}}$ ,

$E_{g_0}$  — напряжение запирания электронной лампы;

$U_g = E_g - E_{g_0}$  — результирующий потенциал на п-вой сетке электронной лампы;

$E_g$  — амплитуда входного сигнала.

Из проведенного сравнительного анализа следует, что при определении критической скорости нарастания прямого напряжения для обеспечения линейности переднего фронта испытательного импульса на тиристоре, а также для уменьшения массо-габаритных показателей испытательного устройства следует применять генератор тока с интегрирующим конденсатором.

На основе проведенного анализа разработаны практические схемы ЭЛГИ для классификации СНВ и определения критической скорости нарастания прямого напряжения. Даны рекомендации по выбору пара-

метров ГИ с точки зрения снижения их массо-габаритных показателей.

Емкость конденсатора, шунтирующего испытываемый тиристор, при заданном  $\bar{x}$  для анодного напряжения на участке  $(0, I_1 - I)$   $x$  определяется по выражению

$$C_2 = C_0 \frac{\left(1-0,1 \frac{X}{6_0}\right)\left(1+0,1\alpha_0 x\right)^{\frac{1}{2}} - \left(1-\bar{x}\right)\left(1-\frac{X}{6_0}\right)\left(1+\alpha_0 x\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1+0,1\alpha_0 x\right)^{\frac{1}{2}}\left(1+\alpha_0 x\right)^{\frac{1}{2}}\left[\left(1-\frac{X}{6_0}\right)\left(1-\bar{x}\right) - \left(1-0,1 \frac{X}{6_0}\right)\right]}. \quad (7)$$

В третьей главе рассматриваются результаты исследований и разработок тиристорно-трансформаторных ГИ для испытания СПВ в прямом проводящем состоянии.

На основе анализа погрешностей измерения среднего значения прямого падения напряжения на СПВ показано, что эта погрешность обусловлена наличием в испытательных схемах нелинейных элементов и индуктивностей рассеяния согласующего силового трансформатора. Получена формула относительной погрешности измерения среднего значения прямого падения напряжения на вентиле, обусловленной искажением формы тока вентиля,

$$\delta_r = \frac{1}{\varepsilon_2(K_B + 0,5)} \left\{ \frac{1}{2\pi} [\cos \psi_1 - \cos \psi_2 - \varepsilon_1(\psi_2 - \psi_1) + \varepsilon_2 \left( \frac{1}{2\pi} - \frac{1}{2} \right)] \right\}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_1 = \frac{U_{01}}{U_{2m}}$ ;  $\varepsilon_2 = \frac{U_{02}}{U_{2m}}$ ;  $\psi_1 = \arcsin \varepsilon_1$ ;  $\psi_2 = \arcsin (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ ;  $K_B = R_{A2} \frac{I_{an}}{U_{02}}$ ,

$U_{01}$  — пороговое напряжение коммутирующего вентиля;

$U_{02}$  — пороговое напряжение испытываемого вентиля;

$R_{A2}$  — дифференциальное сопротивление прямой ВАХ испытываемого вентиля в проводящем состоянии;

$I_{an}$  — предельный ток СПВ;

$U_{2m}$  — напряжение на вторичной обмотке трансформатора;

$\lambda$  — угловая длительность тока испытываемого вентиля.

Согласно (8) для уменьшения  $\delta_r$  необходимо применять трансформатор с повышенным испытательным напряжением и малой индуктивностью рассеяния.

Для уменьшения влияния на погрешность измерения прямого падения напряжения неравномерности нагрева полупроводниковой структуры испытываемого вентиля предлагается испытания СПВ осуществлять при пониженной частоте следования испытательных импульсов тока. При этом среднее значение прямого падения напряжения определяется на основе косвенных измерений амплитуды прямого падения напряжения при двух значениях тока, соответствующих 0,5 и 1,0 амплитудного значения предельного тока, в соответствии с выражением, полу-

ченным из анализа уравнений для кусочно-линейно аппроксимированной прямой ВАХ СПВ

$$\Delta U_a = 0,136 U_{am_1} + 0,364 U_{am_2}, \quad (9)$$

где  $U_{am_1}$  - амплитуда прямого падения напряжения при токе  $0,5 I_{am}$ ;  
 $U_{am_2}$  - амплитуда прямого падения напряжения при токе  $I_{am}$ .

Вместе с тем эти измерения позволяют определить пороговое напряжение  $U_0$  и дифференциальное сопротивление прямой ВАХ  $R_d$  в соответствии с выражениями:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= 2U_{am_1} - U_{am_2}, \\ R_d &= 2 \frac{U_{am_2} - U_{am_1}}{I_{am}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

На основе статистической обработки экспериментальных данных получены числовые характеристики  $\Delta U_a$ ,  $U_0$ ,  $R_d$  для СПВ различных типоразмеров при двух способах аппроксимации прямой ветви ВАХ в проводящем состоянии при кратностях тока  $0,5$ ;  $1,0$  и  $0,5$ ;  $1,5$ . Анализ числовых характеристик  $\Delta U_a$ ,  $U_0$ ,  $R_d$  показал, что погрешность определения  $\Delta U_a$  и  $U_0$  при обоих способах аппроксимации ВАХ незначительна по отношению друг к другу и точность измерения по указанной методике можно считать удовлетворительной, по сравнению с точностью измерения  $\Delta U_a$  на предприятиях-изготовителях СПВ.

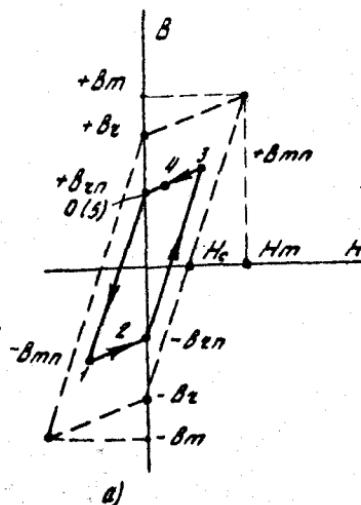
На основе анализа общего выражения ВАХ СПВ в прямом проводящем состоянии определены требования к выбору величины внутреннего сопротивления ГИ тока и точности поддержания амплитуды испытательного тока.

Формирование импульсов тока с пониженной частотой следования можно осуществлять на основе устройств, выполненных по схеме однополупериодного выпрямителя с тиристорным ключом на первичной или вторичной сторонах согласующего силового трансформатора или на основе двухполупериодного выпрямителя с тиристорным ключом на вторичной стороне трансформатора.

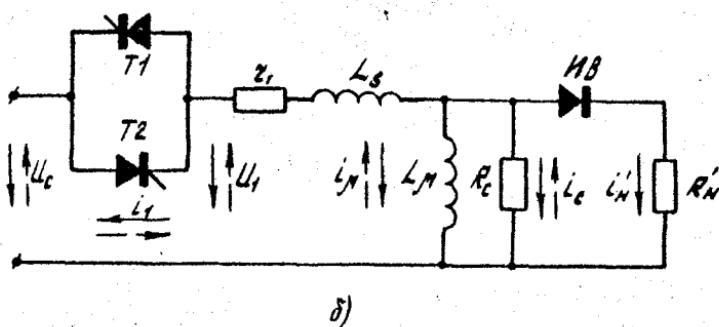
Анализ работы генератора с тиристорным ключом на первичной стороне трансформатора показывает, что работа согласующего трансформатора в нем сопровождается появлением большего намагничивающего тока, ограниченного по величине активным сопротивлением первичной обмотки.

Известно применение симметричного тиристорного ключа на первичной стороне трансформатора для регулирования выходного напряжения. В этих устройствах основная проблема обеспечить одинаковые углы включения встречно-параллельно соединенных тиристоров. Нами

предложено несимметричное управление тиристорами ключа, работающего на нелинейную нагрузку. Это дает возможность компенсировать постоянную составляющую тока намагничивания, обусловленную одно - полярным током нагрузки (током испытываемого вентиля), постоянной составляющей тока намагничивания трансформатора противоположного направления, возникающей при асимметрии включения встречно-параллельно соединенных тиристоров.



a)



b)

Рис.2

Для обеспечения работы силового трансформатора без выбросов намагничивающего тока и вынужденного намагничивания сердечника трансформатора необходимо выбирать оптимальный угол задержки включения первичной обмотки трансформатора в питаяющую сеть. Определение оптимального угла задержки включения согласующего трансформатора в питаяющую сеть осуществлялось на основе анализа электромагнитных процессов в ГИ в квазистабилизированном режиме.

Анализ электромагнитных процессов проходился с учетом активного сопротивления первичной обмотки силового трансформатора методом припасовывания с использованием кусочно-линейной аппроксимации петли гистерезиса стали трансформатора (рис.2а) и схемы замещения ТТГИ (рис.2б), приведенной к первичной стороне трансформатора.

При анализе приняты допущения: 1/тиристоры и испытываемый вентиль ИВ – идеальные ключи; 2/перемагничивание магнитопровода трансформатора осуществляется по симметричной петле гистерезиса.

Рассмотрена работа генератора по этапам и определено изменение магнитной индукции трансформатора по участкам работы с учетом начальных условий, определяемых магнитным состоянием сердечника трансформатора. Из совместного решения уравнений на смежных участках, получено выражение для определения оптимального угла задержки включения первичной обмотки, обеспечивающего перемагничивание сердечника трансформатора по симметричной петле гистерезиса.

$$\alpha_{opt} = \arctg \frac{-AB - HV^2 + B^2 - H^2}{B^2 - H^2}, \quad (II)$$

где  $A = 1 - \frac{\omega L_s}{Z_1'}, \quad B = \frac{Z_1}{Z_1'},$

$$H = (1+K_H) \left\{ \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_1 + Z_2 - K_H \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 - Z_3} \right) + \sqrt{1+K_H^2} \left( \frac{\omega L_s}{Z_2} - \frac{\omega L_s}{Z_3} \right)}{Z_2 - Z_3} \right] \right\} - \left( 1 - \frac{\omega L_s}{Z_1'} \right); \quad (12)$$

$$Z_1' = \sqrt{Z_{31}^2 + X_{31}^2}; \quad Z_{31} = Z_1 \cdot R_C \frac{\omega^2 T_{31}^2}{1 + \omega^2 T_{31}^2}; \quad X_{31} = \omega L_s + R_C \frac{\omega T_{31}}{1 + \omega^2 T_{31}^2}; \quad (13)$$

$$Z_2 = \sqrt{Z_{32}^2 + X_{32}^2}; \quad Z_{32} = Z_1 + R_H \frac{\omega^2 T_{32}^2}{1 + \omega^2 T_{32}^2}; \quad X_{32} = \omega L_s + R_H \frac{\omega T_{32}}{1 + \omega^2 T_{32}^2}; \quad (14)$$

$$Z_3 = \sqrt{Z_{33}^2 + X_{33}^2}; \quad Z_{33} = Z_1 + R_H \frac{\omega^2 T_{33}^2}{1 + \omega^2 T_{33}^2}; \quad X_{33} = \omega L_s + R_H \frac{\omega T_{33}}{1 + \omega^2 T_{33}^2}; \quad (15)$$

$$T_{31} = \frac{L_{\mu_1}}{R_c}; \quad T_{32} = \frac{L_{\mu_2}}{R'_h}; \quad T_{33} = \frac{L_{\mu_1}}{R'_h}. \quad (16)$$

Здесь  $L_{\mu_1} = \frac{\mu_1 SW^2}{l}; \quad L_{\mu_2} = \frac{\mu_2 SW^2}{l}; \quad \mu_1 = \frac{B_2}{H_c}; \quad \mu_2 = \frac{B_m - B_2}{H_m};$

$L_s$  - индуктивность рассеяния трансформатора;

$Z_1$  - суммарное внутреннее сопротивление генератора э.д.с. и первичной обмотки трансформатора;

$R'_h$  - суммарное приведенное сопротивление нагрузки и вторичной обмотки трансформатора;

$S$  - сечение магнитопровода;

$W$  - число витков первичной обмотки;

$l$  - длина средней линии магнитопровода;

$B_m, B_2$  - максимальная и остаточная индукции.

При условии  $\omega L_s \ll Z_1, Z_1 \ll Z_s, \omega L_s \ll (R'_h + Z_1)$

$$\alpha_{opt} \approx \arccos \left[ \frac{R'_h}{R'_h + Z_1} (1 + K_p) - 1 \right], \quad (17)$$

где  $K_p = \frac{B_2}{B_m}$  - коэффициент прямоугольности петли гистерезиса.

Согласно выражению (17) на рис.3 приведены графики зависимости оптимального угла  $\alpha_{opt}$  от нагрузки для трансформаторов с разным Кп. Диапазон регулирования  $\alpha_{opt}$  при изменении нагрузки зависит от Кп. Для трансформаторов с низким Кп возможна установка компромиссного угла  $\alpha$ , для трансформаторов с высоким Кп необходимо регулировать величину угла  $\alpha$ .

На основе анализа потерь и перегрева силового трансформатора при его работе в ГИ с тиристорными ключами на первичной и вторичной обмотках трансформатора получены рекомендации по выбору ряда параметров согласующего трансформатора, обеспечивающих снижение массо-габаритных показателей трансформатора.

Сравнительная оценка ТГИ тока показала преимущества по массо-габаритным показателям генератора с тиристорным ключом на первичной стороне трансформатора.

На основе анализа электромагнитных процессов в ТГИ и их сравнительной оценки разработаны и исследованы генераторы с тиристорным ключом на первичной стороне трансформатора с фиксированным углом задержки включения размагничивающего тиристора, ГИ с корректировкой угла задержки включения размагничивающего тиристо-

ра X. Проведенные экспериментальные исследования генераторов подтверждают правильность выражения (17).

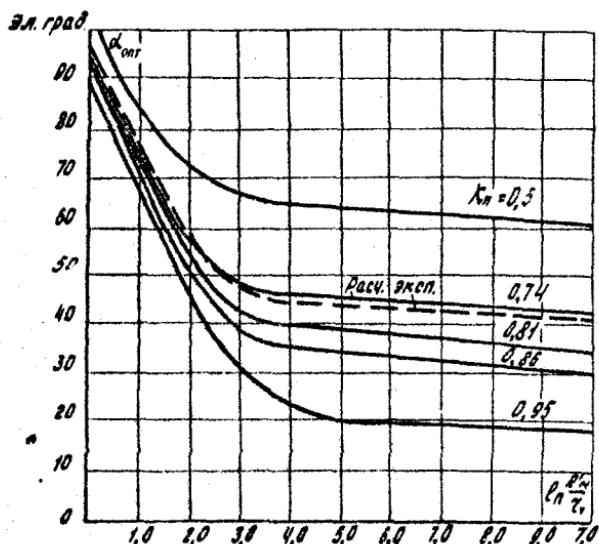


Рис.3

В четвертой главе рассматриваются результаты исследований и разработок тиристорно-конденсаторных генераторов импульсов для испытания СПВ в запертом и прямом проводящем состояниях.

На основе проведенных экспериментальных исследований и статистической обработки результатов эксперимента установлено, что минимальная длительность испытательных импульсов, следующих с частотой  $0,3\text{--}1,0$  Гц, при контроле параметров СПВ в запертом состоянии составляет не менее 1,0 мс, при испытании СПВ в прямом проводящем состоянии – не менее 2,0 мс. При испытании СПВ в запертом состоянии минимальная длительность испытательного импульса ограничивается критической скоростью нарастания прямого напряжения тиристоров, при испытании СПВ в прямом проводящем состоянии повышением прямого напряжения из-за наличия переходных процессов при включении СПВ. В качестве ГИ при этом целесообразно применять

X Гельман И.В., Дубовицкий Г.П. Генератор униполярных импульсов. Полож. решение ВНИИПЭ от 13.02.74 по заявке № 1867412/26-8 от 4.01.73 г.

ТКГИ. Это обеспечивает снижение массо-габаритных показателей приборов.

Анализ нестабильности параметров испытательных импульсов (амплитуды, длительности и крутизны нарастания) показывает, что при контроле параметров СИВ из-за разброса параметров испытываемых вентиляй при добротности контура  $Q_{ok} > 0,8$  в большей степени изменяется амплитуда испытательных импульсов.

Поэтому выбор элементов колебательного контура ТКГИ необходимо осуществлять из условий непревышения заданной погрешности поддержания амплитуды испытательных импульсов, определяемой для ГИ напряжения по выражению

$$\delta U_{kl} = 1 - M e^N, \quad (18)$$

где

$$M = \frac{\frac{2_{tp} + R'_h}{\rho_k}}{\frac{2_{tp} + R'_h}{\rho_k} + \frac{1 - \sqrt{Q_{ok}}}{Q_{ok}}} + \frac{2_{tp}}{\rho_k},$$

$$N = \left. \begin{aligned} & \frac{\arctg \sqrt{4Q_{ok}^2 - 1}}{\sqrt{4Q_{ok}^2 - 1}} - \frac{\arctg \sqrt{4x^2 Q_{ok}^2 - 1}}{\sqrt{4x^2 Q_{ok}^2 - 1}}, \\ & x = \frac{\frac{R_h' + 2_{tp}}{\rho_k} + \frac{1 - \sqrt{Q_{ok}}}{Q_{ok}}}{\frac{R_h' + 2_{tp}}{\rho_k} + \sqrt{(1 - \sqrt{Q_{ok}})}}, \quad \sqrt{ } = \frac{R_L}{\rho_k}; \quad \rho_k = \omega_{ok} L. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Здесь  $2_{tp}$  — суммарное активное сопротивление обмоток трансформатора;

$R'_h$  — приведенное сопротивление нагрузки;

$\rho_k$  — волновое сопротивление колебательного контура;

$R_L$  — активное сопротивление формирующей индуктивности;

$\omega_{ok}$  — резонансная частота колебательного контура при отключенной нагрузке;

$Q_{ok}$  — добротность контура на резонансной частоте при отключенной нагрузке;

$L$  — индуктивность колебательного контура.

Для ГИ тока погрешность поддержания амплитуды испытательного тока

$$\delta I_{am} = \frac{1 - \frac{U_{onm}}{U_{co}}}{1 - \frac{U_{onm}}{U_{co}}} \exp \left[ \frac{\arctg \sqrt{4Q_{ot}^2 - 1}}{\sqrt{4Q_{ot}^2 - 1}} - \frac{\arctg \sqrt{4\zeta^2 \left( \frac{1 + \chi_T}{1 + \zeta \chi_T} \right)^2 Q_{ot}^2 - 1}}{\sqrt{4\zeta^2 \left( \frac{1 + \chi_T}{1 + \zeta \chi_T} \right)^2 Q_{ot}^2 - 1}} \right] - 1, \quad (20)$$

где  $\zeta = \frac{R'_{Am}}{R'_{Ai}}$ ;  $\chi_T = \frac{R_L + 2r_p + R'_{otp}}{R'_{Am}}$ .

Здесь  $R'_{Am}$ ,  $R'_{Ai}$  – приведенные максимально возможное и меньшее максимального динамические сопротивления СПВ;

$U_{onm}$ ,  $U_{onm}$  – приведенные максимально возможное и меньшее максимального пороговые напряжения СПВ;

$Q_{ot}$  – добродотность контура на резонансной частоте;

$U_{co}$  – начальное напряжение на конденсаторе.

Анализ электромагнитных процессов в колебательном контуре ТКГИ показывает, что для обеспечения работы согласующего трансформатора по предельной петле гистерезиса целесообразно использовать оставшуюся энергию в накопительном конденсаторе на размагничивание сердечника трансформатора, используя при этом часть витков первичной обмотки. Параметры размагничивающего контура должны выбираться из условия полного размагничивания сердечника трансформатора за время, предоставляемое на его размагничивание. На основе анализа нестабильности параметров испытательных импульсов и анализа электромагнитных процессов предложены схемы ТКГИ и методика выбора элементов колебательного контура ТКГИ.

Для регулирования и стабилизации амплитуды испытательных импульсов предложен ряд схем ТКГИ, обеспечивающих контроль параметров СПВ в запертом и проводящем состояниях.

В пятой главе рассматриваются результаты разработок устройств для измерения токов и напряжений при испытании СПВ в запертом и прямом проводящем состояниях.

На основе анализа особенностей измерения амплитуды редкоповторяющихся импульсов предложено измерение производить путем образования с помощью диодно-емкостных расширителей измеряемых импульсов напряжения и тока в квазипостоянное напряжение. Для повышения точности измерения предложено диодно-емкостный расширитель включать в контур отрицательной обратной связи.

Описаны устройства и работа разработанных приборов типов

ИДТ-1БМ, ИДТ-2БМ, ИДТ-3 и ИДТ-4. Прибор ИДТ-1БМ позволяет снимать анодные и входные ВАХ, контролировать  $U_{пер}$ ,  $U_{заг}$ , амплитуды  $I$  обр и  $I$  ут,  $I$  уд,  $I$  отп,  $U$  отп, ( $dU/dt$ ) кр СПВ до 26 класса включительно. Прибор ИДТ-2БМ предназначен для контроля  $U_{ами}$ ,  $\Delta U_a$ ,  $U_o$  и  $R_d$  СПВ всех классов на токи от 25 до 500 А включительно. Прибор ИДТ-3 применяется для контроля  $U_{пер}$ ,  $U_{заг}$ ,  $I$  обр,  $I$  ут,  $I$  уд,  $I$  отп,  $U$  отп СПВ до 38 класса включительно. В приборе ИДТ-3 автоматизирован процесс контроля  $I$  уд,  $I$  отп и применяется для измерения электрических величин СПВ цифровой измерительный прибор. Прибор ИДТ-4 предназначен для контроля  $U_{ами}$ ,  $\Delta U_a$ ,  $U_o$  и  $R_d$  СПВ всех классов на токи от 25 до 320 А включительно. В приборе ИДТ-4 процесс определения  $\Delta U_a$ ,  $U_o$  и  $R_d$  автоматизирован с помощью специального блока вычислений. Измерение электрических величин СПВ осуществляется с помощью цифрового измерительного прибора.

Приведены результаты испытаний СПВ и опыт эксплуатации приборов. Разработанные и изготовленные приборы применялись для контроля параметров СПВ различных типов как новых, так и находившихся в эксплуатации. Контролировались следующие параметры:  $U_{пер}$ ,  $U_{заг}$ ,  $I$  ут,  $I$  обр,  $I$  уд,  $I$  отп,  $U$  отп, ( $dU/dt$ ) кр,  $U_{ами}$ ,  $\Delta U_a$ ,  $U_o$ ,  $R_d$ . Контроль параметров СПВ осуществлялся на Орско-Халиловском металлургическом комбинате, заводе "Уралэлектротяжмаш" им. В.И. Ленина, в Челябинском политехническом институте. На основе статистической обработки данных контроля установлено, что, если у новых СПВ параметры соответствуют паспортным данным, то у некоторых СПВ, бывших в эксплуатации, параметры значительно изменяются. Это подтверждает целесообразность проведения контроля параметров СПВ.

В заключении сформулированы следующие основные результаты диссертационной работы.

1. При изготовлении, наладке и эксплуатации преобразовательных устройств необходимо применение переносных приборов контролирующих основные параметры СПВ.

2. В качестве основных контролируемых параметров СПВ целесообразно принимать параметры прямой и обратной ветвей ВАХ в запертом состоянии, прямой ветви ВАХ в проводящем состоянии, цепи управления тиристоров и критическую скорость нарастания прямого напряжения.

3. Погрешности контроля параметров СПВ и массо-габаритные показатели переносных приборов для испытания СПВ в значительной степени определяются генераторами испытательных импульсов и режимами их работы.

4. На основе анализа массо-габаритных показателей ГИ и результатов их оптимизации установлено, что в универсальных приборах, позволяющих контролировать параметры СПВ в запертом состоянии, а также критическую скорость нарастания прямого напряжения, рекомендуется применение ЭЛГИ с промежуточным емкостным накопителем, работающего в режиме генератора напряжения, а если допускается регулирование в процессе контроля, то - в режиме генератора тока.

5. На основе анализа процесса включения тиристоров от эффекта  $\frac{dV}{dt}$  получены формулы для определения минимальной емкости конденсатора, шунтирующего тиристор, и показана целесообразность применения ГИ тока ступенчатой формы.

6. Проведенный анализ электромагнитных процессов и массо-габаритных показателей ТТГИ для приборов, контролирующих параметры прямой ветви ВАХ СПВ в проводящем состоянии показал, что наиболее целесообразно применение генератора с тиристорным ключом на первичной стороне трансформатора, управляемым несимметрично в функции коэффициента прямоугольности петли гистерезиса магнитопровода трансформатора, сопротивления обмоток и ограничивающего сопротивления. Получены формулы для выбора оптимального угла задержки включения "размагничивающего" тиристора.

7. На основе результатов статистической обработки экспериментальных данных показана допустимость контроля параметров СПВ при применении укороченных испытательных импульсов длительностью не менее 1,0 мс в запертом состоянии и не менее 2,0 мс в проводящем, следующих с частотой 0,3-1,0 Гц. В качестве ГИ при этом целесообразно применять ТКИ. Это обеспечивает существенное снижение массо-габаритных показателей приборов.

8. На основе анализа электромагнитных процессов с учетом требуемой стабильности испытательных импульсов разработана методика расчета ТКИ напряжения и тока. Предложен способ размагничивания магнитопровода испытательного трансформатора, обеспечивающий существенное снижение его массо-габаритных показателей.

9. Предложены схемы тиристорно-трансформаторных и тиристорно-конденсаторных ГИ, позволяющих существенно снизить массо-габаритные показатели переносных приборов, стабилизировать амплитуду испытательных импульсов и автоматизировать процесс контроля параметров СПВ.

10. Разработанные и изготовленные в Челябинском политехническом институте приборы для контроля параметров СПВ внедрены на ряде

предприятий министерств монтажных и специальных строительных работ, черной металлургии и электротехнической промышленности.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Гельман М.В., Дубовицкий Г.П. Методы исследования вольтамперных характеристик управляемых и неуправляемых полупроводниковых вентилей. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", вып. I, Челябинск, 1966.

2. Гельман М.В., Дубовицкий Г.П. Приборы для наладки тиристорных преобразователей. Сб. "Тиристорный управляемый асинхронный электропривод", Свердловск, 1968.

3. Гельман М.В., Дубовицкий Г.П. К вопросу испытания полупроводниковых вентилей. Доклады к научно-технической конференции института. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, 1969.

4. Гельман М.В., Дубовицкий Г.П. Комплект приборов для испытания полупроводниковых диодов и тиристоров. Сб. трудов ЧПИ № 70. "Вентильные преобразователи в энергетических установках", Челябинск, 1970.

5. Гельман М.В., Дубовицкий Г.П. Приборы для испытания полупроводниковых вентилей. Материалы XXIII научно-технической конференции ЧПИ, Челябинск, 1971.

6. Гельман М.В., Дубовицкий Г.П., Худоносов Г.В. Комплект приборов для испытания силовых полупроводниковых вентилей при наладке. Раф. информ. о передовом опыте (Минмонтажспецстрой СССР) Серия II "Монтаж и наладка электрооборудования", вып. 9 (93), 1972.

7. Гельман М.В., Дубовицкий Г.П. Приборы для испытания полупроводниковых диодов и тиристоров. "Электротехника", 1973, № 5.

8. Гельман М.В., Дубовицкий Г.П., Шипков В.С. Устройство для испытания полупроводниковых диодов и тиристоров. Авторское свидетельство № 438950. Бюллетень изобретений № 29, 1974.

9. Дубовицкий Г.П., Худоносов Г.В. К вопросу об измерении среднего значения прямого падения напряжения на полупроводниковых вентилях. Сб. научных трудов ЧПИ № 80 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, 1970.

10. Дубовицкий Г.П., Худоносов Г.В., Штейман А.Б. Система управления коммутирующим тиристором с пониженной частотой. Сб. научных трудов ЧПИ № 94 "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, 1971.

11. Дубовицкий Г.П., Худоносов Г.В. Анализ работы транзистор-

ного измерителя амплитуды редкоповторяющихся импульсов. Сб. научных трудов ЧПИ № I24 "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, 1973.

12. Дубовицкий Г.П. Анализ работы генератора униполярных импульсов. Сб. научных трудов ЧПИ № I35 "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, 1974.

13. Дубовицкий Г.П. Электромагнитные процессы в генераторе униполярных импульсов. Сб. научных трудов ЧПИ № I35. "Исследование автоматизированных электроприводов, электромашин и вентильных преобразователей", Челябинск, 1974.

Дубовицкий Геннадий Петрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ  
ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

---

ФБ С0247. 7/Х-74 г. Сдано в печать 8/Х-74 г. Формат бумаги 60x90 I/16.  
Объем 1,5 п.л. Тираж 120 экз. Отпечатано на ротапринте ЧПИ.  
Заказ № 267/1060.