

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР



ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

на правах рукописи

ХОХЛОВ ЮРИЙ ИВАНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСИРОВАННЫХ И ПОЛУКОМПЕНСИРОВАННЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ  
СПОСОБОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность 05.12.08 -  
"Электронная техника и приборы"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1975

Работа выполнена на кафедре "Теоретические основы электротехники" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент  
А. В. БАЕВ.

Официальные оппоненты: 1. Доктор технических наук, профессор  
Б. С. ЯКОВЛЕВ (г. Челябинск);  
2. Кандидат технических наук, доцент  
М. В. ГЕЛЬМАН (г. Челябинск).

Ведущее предприятие - Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского АН СССР.

Автореферат разослан "12" сентября 1975 г.

Защита диссертации состоится "12" сентября 1975 г.,  
в 15<sup>00</sup> час., в ауд. 244 на заседании Совета приборостроительного и энергетического факультетов Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

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,  
доцент, кандидат технических наук



(Короленко Ю. А.)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В СССР в 1975 году будет выработано 1035 млрд. кВт-часов электроэнергии. Около трети её уже сейчас потребляется на постоянном токе. Огромные масштабы и быстрые темпы роста использования постоянного тока требуют совершенствования преобразовательных установок. В современной электротехнике при выпрямлении переменного тока ведущее положение занимают полупроводниковые выпрямители. Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к ним, являются возможность плавного, а зачастую и весьма точного, регулирования выпрямленного напряжения и обеспечение эксплуатации с высоким коэффициентом мощности. Разработано много способов регулирования. Однако практически все они, за исключением регулирования изменением коэффициента трансформации трансформатора, приводят к ухудшению и без того недостаточно высокого коэффициента мощности. Поэтому вопросы, связанные с разработкой способов регулирования напряжения и повышением коэффициента мощности выпрямителей, должны решаться совместно.

Наиболее эффективно эта задача решается путем перевода преобразователей в режим с искусственной коммутацией вентилей (компенсированные преобразователи). Разработке схем, анализу электромагнитных процессов и методам расчета компенсированных преобразователей посвящены работы Г.И.Бабата, А.В.Баева, Ф.Буземана, Ю.Ф.Выдолоба, С.Р.Глинтерника, Д.Я.Глухова, В.Т.Енина, А.И.Зайцева, И.Л.Каганова, В.Я.Корнеева, А.А.Кувшинова, В.Д.Латышко, В.Н.Мишина, Л.Р.Неimana, А.С.Немировского, А.В.Орловского, В.Г.Палванова, Н.А.Троицкого, А.М.Утевского, М.З.Хамудханова, И.М.Чиженко, Н.А.Шипулиной и др. Наибольшее практическое использование получили преобразователи с одноступенчатой искусственной коммутацией.

Обширные исследования в области теории и методов расчета компенсированных преобразователей применительно к линиям электропередач постоянного тока выполнены академиком АН СССР Л.Р.Нейманом и доктором техн. наук С.Р.Глинтерником.

Большая работа по изучению компенсированных преобразователей с двух- и четырехкратной частотами напряжения на конденсаторах проводится в Киевском политехническом институте под руководством член-корр. АН УССР И.М.Чиженко. В 1962 году работы этого коллектива удостоены Ленинской премии.

Многие годы исследования в области компенсированных выпрямителей, инверторов и компенсаторов реактивной мощности проводят-

ся в Челябинском политехническом институте под руководством канд. техн. наук А.В.Баева. Эти работы нашли широкую практическую реализацию в промышленности.

Однако во всех указанных работах рассматривается либо неуправляемый режим компенсированных преобразователей, либо принимается, что регулирование осуществляется с помощью управляемых вентилях. Между тем хорошо известно, что в настоящее время в силу ряда преимуществ наиболее мощные выпрямители электролиза, цветной и черной металлургии, электродной промышленности и др. выполняются на неуправляемых вентилях. Оборудование подобных преобразователей неуправляемыми вентилями будет продолжаться и в ближайшем будущем. Комплектование выпрямителей неуправляемыми вентилями потребовало разработки особых методов плавного регулирования напряжения. Наиболее приемлемым для практики оказалось дроссельное управление, осуществляемое в пределах ступени трансформаторного регулирования (комбинированный способ).

Глубокие исследования некомпенсированных полупроводниковых выпрямителей, управляемых с помощью дросселей насыщения (ДН), выполнены в лаборатории преобразовательной техники Энергетического института им.Г.М.Кржижановского под руководством доктора техн. наук, проф. Ю.Г.Толстова. Указанные работы послужили весьма широкому практическому внедрению некомпенсированных выпрямителей с дроссельным управлением. С другой стороны, они явились основой для новых исследований в области вентилях преобразователей с нелинейными индуктивностями и, в частности, способствовали выполнению реферируемой работы.

Как видно, многие вопросы регулирования напряжения и повышения коэффициента мощности некомпенсированных выпрямителей хорошо изучены. Однако это не решает полностью проблемы поддержания требуемого значения коэффициента мощности преобразовательных подстанций, оборудованных неуправляемыми вентилями. Одним из возможных, весьма перспективных и координатных путей решения её является использование компенсированных преобразователей с комбинированным способом регулирования. Техническая возможность осуществления этого вытекает из того, что, с одной стороны, получившие широкое применение некомпенсированные выпрямители с комбинированным способом регулирования достаточно хорошо освоены и налажен их массовый выпуск, а с другой стороны, многолетняя эксплуатация компенсированных выпрямителей доказала высокую надежность и экономичность данного способа компенсации реактивной мощности преобразовательных

подстанций. Однако, если работа некомпенсированных выпрямителей, управляемых с помощью ДН, несмотря на широту и сложность проблемы, детально изучена, то вопросы компенсированных выпрямителей с комбинированным способом регулирования напряжения совсем не исследованы.

Цель работы. Настоящая работа, посвященная исследованию компенсированных выпрямителей с неуправляемыми вентилями и комбинированным способом регулирования напряжения, ставит своей целью решить следующие вопросы:

1) провести сопоставление симметричных и несимметричных, компенсированных и некомпенсированных выпрямителей с одновременным и разновременным управлением вентильными группами по основным техническим характеристикам и установить возможность и целесообразность комбинированного способа регулирования напряжения компенсированных преобразователей;

2) определить наиболее целесообразные схемы выпрямителей с указанным способом регулирования, провести полный анализ электромагнитных процессов и установить все необходимые характеристики преобразователей в установившихся рабочих режимах;

3) провести экспериментальное исследование поведения рассмотренных выпрямителей в установившихся и переходных режимах;

4) разработать инженерный метод расчета компенсированных выпрямителей с комбинированным способом регулирования напряжения;

5) дать практические рекомендации и осуществить внедрение первых подобных преобразователей.

Методика выполнения исследований. С целью установления и сопоставления основных технических характеристик широкого класса регулируемых выпрямителей предложен и рассмотрен обобщенный преобразователь в предположении мгновенной коммутации вентилей, единые соотношения для которого позволили в частных случаях проанализировать конкретные практически важные выпрямители.

При анализе электромагнитных процессов с учетом угла коммутации в компенсированном и полукompенсированном выпрямителях с комбинированным способом регулирования напряжения применен метод кусочно-линейной аппроксимации нелинейных характеристик вентилей и ДН. Основные характеристики преобразователей рассчитаны на ЭВМ.

Экспериментальные исследования установившихся, а также аварийных и коммутационных переходных процессов выполнены на физической модели преобразователя. Проведены промышленные испытания компенсированных выпрямителей.

Научная новизна. В работе сопоставлены компенсированные и некомпенсированные, симметричные и несимметричные выпрямители с одновременным и разновременным управлением по регулировочным возможностям, коэффициенту сдвига, коэффициенту и мощности искажения, коэффициенту пульсаций выпрямленного напряжения, мощности силового трансформатора и потерям в его обмотках. Впервые в практике выполнен анализ электромагнитных процессов в одновременно управляемом компенсированном и полуправляемом полукompенсированном выпрямителе с дроссельно-трансформаторным способом регулирования напряжения. Предложен новый способ дроссельного управления компенсированным выпрямителем, расширяющий диапазон регулирования напряжения при опережающем угле сдвига и увеличивающий генерируемую преобразователем реактивную мощность. Впервые выполнены широкие экспериментальные исследования аварийных и коммутационных переходных режимов в компенсированном и полукompенсированном выпрямителях с дроссельным управлением.

Практическая ценность. Проведенные исследования и разработанный инженерный метод расчета позволили рассчитать и внедрить четыре полупроводниковых компенсированных выпрямителя с комбинированным способом регулирования напряжения на химкомбинате "Капролактан" Горьковской области, первые из которых успешно эксплуатируются уже в течение пяти лет.

Результаты исследований использованы при создании технических условий для серийных компенсированных выпрямителей с указанным способом регулирования, переданных по договору заводу "Преобразователь" г.Запорожье.

Кроме того, по заданию Государственного научно-исследовательского института электродной промышленности для питания крупнейших в СССР печей графитации строящегося Новосибирского электродного завода при участии автора разработана схема полуправляемых полукompенсированных выпрямителей на 50000А и 300В с комбинированным способом регулирования напряжения, выполнен ее расчет и разработаны технические условия на выполнение таких преобразователей. Внедрение агрегатов намечено на 1977-1980 годы.

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались:

1) на Всесоюзном совещании энергетиков предприятий цветной металлургии (г.Свердловск, 1972);

2) на научно-технической конференции по повышению эффективности устройств преобразовательной техники (г.Киев, 1972);

3) на восьмой традиционной научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства (г.Томск, 1973);

4) на совещании в лаборатории преобразовательной техники Энергетического института им.Г.М.Кржижановского (г.Москва, 1973);

5) на девятой городской научно-практической конференции (г.Челябинск, 1974);

6) на ежегодных научно-технических конференциях ЧПИ им.Ленинского комсомола в 1972-1974 годах.

Публикация. По результатам выполненных исследований опубликовано 13 работ и получено положительное решение о выдаче авторского свидетельства.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 159 страницах машинописного текста, иллюстрируется рисунками, осциллограммами и таблицами на 93 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и приложения (47 страниц текста, 44 страницы рисунков и осциллограмм).

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится сопоставление ряда регулируемых выпрямителей по коэффициенту сдвига, коэффициенту и мощности искажения, коэффициенту пульсаций выпрямленного напряжения, мощности силового трансформатора и потерям энергии в его обмотках при мгновенной коммутации вентилей. С этой целью рассматривается обобщенный шестифазный преобразователь, единые соотношения которого описывают симметричные (нулевые и мостовые) и несимметричные, компенсированные и некомпенсированные, одновременно управляемые и полуправляемые преобразователи. Степень несимметрии преобразователя задается отношением фазных напряжений трансформатора, образующих для каждой вентиляльной группы симметричные системы напряжений.

По полученным соотношениям рассчитаны указанные выше характеристики рассматриваемого класса выпрямителей в функции от глубины регулирования. Показано, что в одновременно управляемых компенсированных выпрямителях, как и в некомпенсированных, существует пропорциональная связь между  $\cos \varphi$  и глубиной регулирования напряжения. Однако появляется возможность регулирования в некотором диапазоне при сохранении опережающего угла сдвига ( $\varphi < \theta$ ). Увеличение угла задержки включения вентилей приводит к немонотонному характеру изменения выпрямленного напряжения, которое при  $\varphi < \theta$  увеличивается до э.д.с. холостого хода выпрямителя, а затем уменьшается как и в некомпенсированных выпрямителях. С целью получения хороших регу-

дировочных возможностей работу одновременно управляемых компенсированных выпрямителей следует осуществлять только в области с  $\varphi < 0$ . Работать в области с  $\varphi > 0$  нецелесообразно, т.к. те же характеристики можно обеспечить и с помощью некомпенсированных преобразователей. Целесообразность использования области с  $\varphi < 0$  подтверждается и тем, что в ней компенсированные выпрямители имеют наименьший коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения и такие же, как и во всех одновременно управляемых выпрямителях, мощности искажения и потери в обмотках трансформатора. Однако, в связи с тем, что расширение диапазона регулирования напряжения в области с  $\varphi < 0$  требует увеличения мощности компенсирующих устройств, а линейная связь между  $\cos \varphi$  и глубиной регулирования приводит к достаточно резкому снижению генерируемой реактивной мощности, регулирование напряжения введением угла задержки должно быть неглубоким.

Полууправляемые полукompенсированные выпрямители, регулирование напряжения которых осуществляется вентилями некомпенсированной части, имеют, как и некомпенсированные, монотонные регулировочные характеристики, наименьшую мощность искажения, наименьший коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (кроме одновременно управляемых компенсированных выпрямителей в области с  $\varphi < 0$ ) и наименьшие потери в обмотках трансформатора. Менее резкое снижение  $\cos \varphi$  при регулировании и отсутствие задержки включения вентилей компенсированной части позволяют получить большую эффективность компенсирующих устройств, чем в одновременно управляемых выпрямителях. Однако полукompенсированные выпрямители уступают компенсированным по величине генерируемой одним преобразователем реактивной мощности. Несмотря на меньшее снижение  $\cos \varphi$ , глубокое регулирование все же сопровождается недопустимым для мощных преобразователей уменьшением коэффициента сдвига. Поэтому и в данном случае регулирование введением угла задержки следует производить на небольшую глубину.

Все требования к мощному преобразователю в достаточно широких пределах изменения напряжения без применения трансформаторного регулирования можно удовлетворить с помощью несимметричных компенсированных выпрямителей. Однако подобные преобразователи требуют установки управляемых вентилей в некомпенсированной части. Использование дроссельного управления не приводит к тому же результату, т.к. оно не позволяет осуществить инверторный режим этой части.

Проведенный анализ показал, что для повышения коэффициента мощности преобразовательных подстанций, оборудованных неуправляемыми вентилями, следует использовать либо одновременно управляемые



компенсированные, либо полуправляемые полукompенсированные выпрямители с комбинированным способом регулирования напряжения, в котором осуществляется неглубокое регулирование введением угла задержки в пределах ступени трансформаторного регулирования. Это обеспечивает работу преобразователей в зоне с наилучшим  $\cos \varphi$ , наименьшей мощностью искажения и наилучшим гармоническим составом выпрямленного напряжения.

Во второй главе при обычных для мощных преобразователей допущениях с учетом угла коммутации  $\gamma$  выполнен анализ электромагнитных процессов в нулевом одновременно управляемом компенсированном выпрямителе с комбинированным способом регулирования напряжения (рис. 1) при работе ДН в режиме с внутренней обратной связью и принудительным подмагничиванием. Показано, что в нем, в отличие от некомпенсированных выпрямителей с дроссельным управлением, возможен ряд новых режимов работы, различающихся как числом одновременно работающих вентилях, так и характером перемгничивания ДН. В работе приведены осциллограммы и описание всех режимов вплоть до короткого замыкания на выходе преобразователя.

Первый режим характеризуется одним выведением ДН из ненасыщенного состояния и одним заведением их в течение периода э.д.с. сети. Во втором режиме (рис. 2) кривая суммарного напряжения на ДН и вентилях деформируется так, что в непроводящую часть периода вентиля повторно открываются, а ДН повторно выводятся, оставаясь в ненасыщенном состоянии. Если при повторном выведении ДН насыщаются, то наступает третий режим, в котором вентиля преобразователя повторно за период проводят рабочий ток. При работе выпрямителя с повторной проводимостью существует ряд глубоких режимов. Исследования показали, что в режимах с повторной проводимостью дроссельное управление становится невозможным и при этом существенно ухудшается коэффициент мощности преобразователя. Поэтому при обычном подмагничивании ДН постоянным током работу выпрямителя следует осуществлять лишь в основных первом и втором режимах.

Диапазон дроссельного регулирования при  $\varphi < 0$  и максимальная величина генерируемой реактивной мощности ограничены появлением повторной проводимости вентилях. В ряде случаев возникает необходимость их увеличения. С этой целью предложен новый способ управления компенсированным выпрямителем, обеспечивающий отстройку от повторной проводимости. Сущность его следующая. При основном выведении (площадка  $S_1$  на рис. 2) создается угол дроссельного управления  $\alpha_d$ , при изменении которого обеспечивается регулирование выпрямленного напряжения. Повторное выведение ДН (площадка  $S_3$ ) частично или пол-

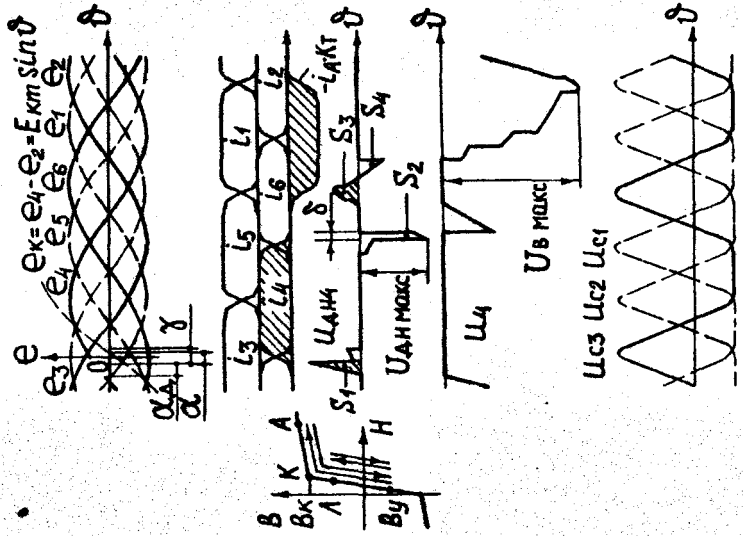


Рис. 2

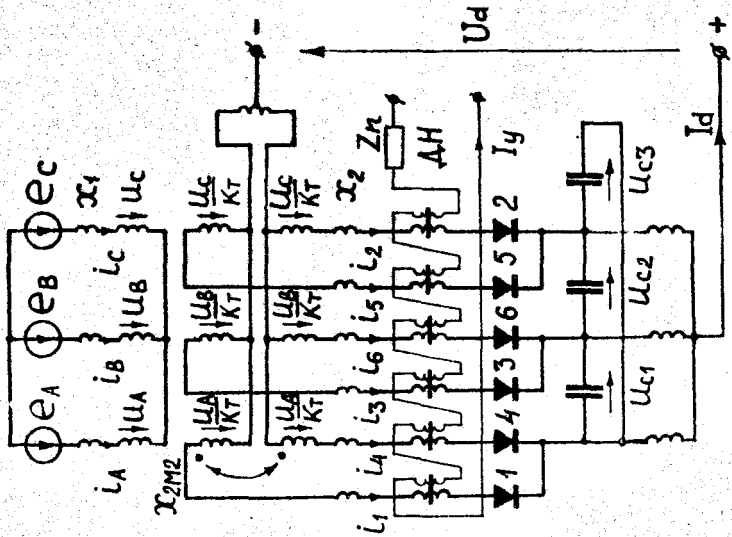


Рис. 1

ностью устраняет повторную проводимость. При обычном подмагничивании ДН постоянным током повторное выведение возможно лишь при наличии основного выведения, поскольку в процессах заведения (площадки  $S_2$  и  $S_4$ ) ДН возвращаются в исходное магнитное состояние, определяемое током управления. При  $\alpha_A = 0$  они теряют возможность устранения повторной проводимости. Предложено основным и повторным перемагничиваниями ДН управлять раздельно. Это позволяет с помощью тех же ДН, которые используются для регулирования напряжения, в определенных пределах улучшить регулировочные и энергетические характеристики выпрямителя (рис.4). В работе рассмотрены три варианта такого управления перемагничиваниями ДН. Таким образом, в качестве рабочих режимов рекомендованы первый и второй режимы, а также режим отстройки от повторной проводимости.

На основе анализа электромагнитных процессов установлено, что для всех известных схем с одноступенчатой искусственной коммутацией взаимосвязи между углами  $\alpha_A$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  (рис.2) в рабочих режимах при базисных величинах  $I\delta = 2E_{кТН}/X_{кН}$  и  $U\delta = E_{дн}$  подчиняются следующей системе трансцендентных уравнений:

$$\cos(\alpha - \alpha_A) - \cos \alpha - \alpha_A \left[ \nu^2 \left( \frac{\gamma}{2} - \psi \right) k_I \sin \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \sin \frac{\gamma}{2} + k_x \cos \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2} \right] - \frac{1}{2} \alpha_A^2 \nu^2 k_I \sin \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \sin \frac{\gamma}{2} = M; \quad (1)$$

$$I d_* = k_I \sin \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \sin \frac{\gamma}{2}; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) = \frac{\sin \left( \alpha_A + \frac{\gamma}{2} \right) + k_x \cos \frac{\gamma}{2}}{\cos \left( \alpha_A + \frac{\gamma}{2} \right) + \nu^2 k_I \left( \psi - \frac{\gamma}{2} - \alpha_A \right) \sin \frac{\gamma}{2}}; \quad (3)$$

$$\cos(\alpha + \gamma) - \cos(\alpha + \gamma + \delta) - \delta \left[ \nu^2 \left( \frac{\gamma}{2} - \psi \right) k_I \sin \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \sin \frac{\gamma}{2} - k_x \cos \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2} \right] - \frac{1}{2} \delta^2 \nu^2 k_I \sin \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \sin \frac{\gamma}{2} = M; \quad (4)$$

$$M = \frac{K_I}{K_{ТН}} M_H = \frac{K_I}{K_{ТН}} \frac{S \dot{\omega}_p \omega (B_K - B_y)}{E_{кТН}}, \quad (5)$$

где  $\nu$  и  $X_{кН}$  - относительное значение собственной частоты и индуктивное сопротивление контура коммутации с учетом сопротивления насыщенных ДН;

$\psi$  - схемный параметр (для выпрямителя на рис.1 равен  $\frac{2\pi}{9}$ );  
 $k_I$  и  $k_x$  - коэффициенты, зависящие от  $\nu$  и  $\gamma$ ;  
 $S$  и  $\dot{\omega}_p$  - сечение сердечника и число витков рабочей обмотки ДН;  
 $B_K$  и  $B_y$  - магнитные индукции в сердечнике ДН, соответствующие колену кривой намагничивания и определенному току управления;

$K_{тн}$  и  $K_{т}$  - номинальный и действительный коэффициенты трансформации трансформатора;

$E_{ктн}$  и  $E_{дн}$  - амплитуда коммутирующей э.д.с. и среднее значение э.д.с. на выходе преобразователя в номинальном режиме;

$I_{d*}$  - относительное значение выпрямленного тока.

На рис.3 для исследуемого выпрямителя приведена одна из рассчитанных на ЭВМ "Минск-22" серий зависимостей углов  $\alpha - \alpha_d, \alpha_d, \gamma$  в функции от  $M_n$  и  $I_{d*}$ , соответствующая  $\nu = 5,0$ . Из рис.3 следует, что в отличие от некомпенсированных в исследуемом выпрямителе момент начала выведения дн не является фиксированным и наступает раньше перехода коммутирующей э.д.с. через нулевое значение. Кроме того, угол дроссельного управления  $\alpha_d$  даже при неизменной емкости конденсаторов ( $\nu = \text{const}$ ) не является однозначной функцией от тока управления, а существенно зависит от тока нагрузки выпрямителя. Угол коммутации возрастает при увеличении тока нагрузки и уменьшении  $M_n$ . Такие весьма сложные взаимосвязи между углами требуют при расчете всех характеристик исследуемого выпрямителя совместного решения уравнений (1) + (5) с уравнениями самих характеристик, а неоднозначность между током управления и углом  $\alpha_d$  исключает возможность использования этого угла в качестве параметра при построении семейств характеристик, как это сделано в работах Ю.Г.Толстова и др. для некомпенсированных выпрямителей. С целью универсальности все рассчитанные характеристики в работе представлены при использовании в качестве параметра величины  $M_n$ .

В работе установлены области и границы режимов работы преобразователя. При  $\nu > 2,27$  с ростом тока нагрузки область с потреблением реактивной мощности сменяется областью с генерированием ее, за которой следуют области с отстройкой от повторной проводимости и, наконец, с повторной проводимостью. Перед левой границей области с отстройкой расположена граница между первым и вторым режимами. Граница между вторым и третьим режимами совпадает с левой границей области с отстройкой. Правая граница ее является границей появления повторной проводимости при наличии отстройки.

Описанные взаимосвязи между углами  $\alpha_d, \alpha, \gamma$  и  $\delta$  приводят к своеобразию всех характеристик преобразователя. В диссертации установлены соотношения и в широком диапазоне  $\nu$  приведены результаты расчетов на ЭВМ "Минск-22" внешних и энергетических характеристик, а также зависимостей, определяющих действующие значения токов и напряжений на элементах, амплитуд напряжений на вентилях и

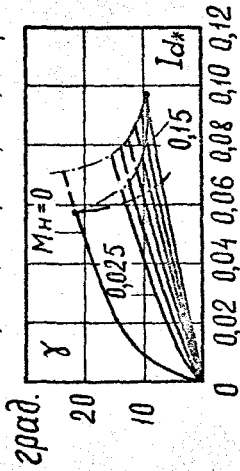
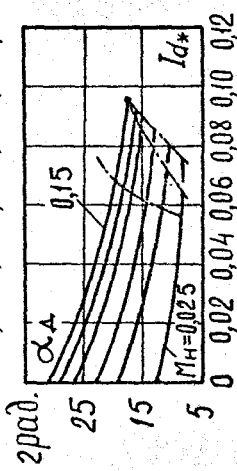
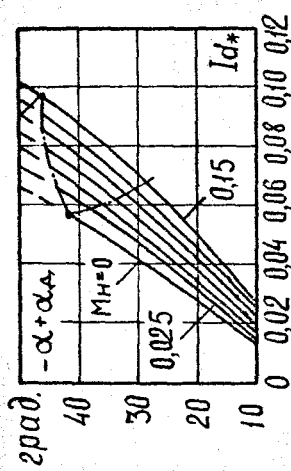


Рис.3

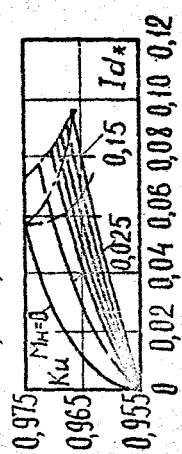
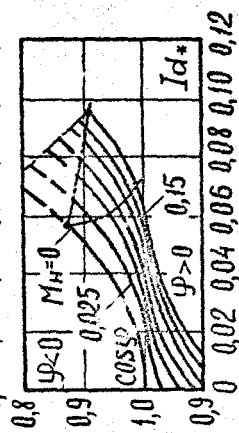
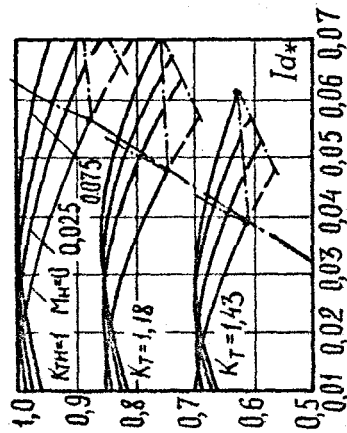


Рис.4

ДН. В качестве примера на рис.4 представлены внешние характеристики при комбинированном и энергетические при дроссельном управлении при  $\psi = 5$ . Внешние характеристики показаны только для трех значений  $K_T$ . Штрихпунктирными линиями показаны границы режимов. До первой линии существует первый режим, между первой и второй – второй и между второй и третьей – режим с отстройкой. Приведенные кривые показывают, что область наиболее благоприятной работы находится около границы режима с повторной проводимостью вентилей. С увеличением  $K_T$  на внешних характеристиках она сдвигается к началу координат, а при увеличении емкости конденсаторов располагается при больших токах нагрузки. Установлено, что возможный диапазон дроссельного регулирования и генерируемая реактивная мощность с повышением частоты напряжения на конденсаторах уменьшаются. При четырех- и шестикратной частотах этот диапазон так мал, что рекомендовать работу преобразователей при  $\varphi < 0$  без отстройки от повторной проводимости нельзя. Применение отстройки улучшает энергетические и регулировочные характеристики.

В работе получено простое выражение для мощности ДН и показано, что полное повторное перематничивание увеличивает ее меньше, чем на 10%. Рассмотрены особенности других схем подобных преобразователей и приведены экспериментальные данные для исследуемого выпрямителя в установившихся режимах.

В третьей главе с учетом длительности коммутаций выполнен анализ электромагнитных процессов в полупроводящем полукompенсированном выпрямителе с комбинированным способом регулирования напряжения (рис.5). Установлены основные режимы, имеющие место при отсутствии повторной проводимости вентилей I''-6'' и достаточной для комбинированного способа глубине дроссельного управления, равной 15% от э.д.с. холостого хода выпрямителя.

В первом режиме, который имеет место при малом токе нагрузки, возникает вынужденный угол задержки включения вентилей I'-6'. Анализ электромагнитных процессов показывает, что фактический угол дроссельного управления в этом режиме определяется соотношением

$$\cos(\alpha'' + \gamma'') - \cos\alpha_{\Delta} = M, \quad (6)$$

а углы включения вентилей I''-6'' ( $\alpha''$ ) и коммутаций в компенсированной ( $\gamma''$ ) и некомпенсированной ( $\gamma'$ ) частях выражениями

$$\operatorname{tg}(\alpha'' + \frac{\gamma''}{2}) = \frac{1 + k_1 \operatorname{ctg} \frac{\gamma''}{2}}{\operatorname{ctg} \frac{\gamma''}{2} + \nu^2 k_1 (\frac{2F}{3} - \frac{\gamma''}{2})}; \quad (7)$$

$$I_{d*} = \frac{K_T}{K_{TH}} \frac{x_{KH}}{x_K'' + x_p} \sin(\alpha_{\Delta} + \frac{\gamma'}{2}) \sin \frac{\gamma'}{2}; \quad (8)$$

$$I_{d*} = \frac{K_{тн}}{K_T} \frac{X_{кн}''}{X_k''} k_I \sin(\alpha'' + \frac{\gamma''}{2}) \sin \frac{\gamma''}{2}, \quad (9)$$

где  $X_k''$  и  $X_{кн}''$  - сопротивления контура коммутации компенсированной части при  $K_T$  и  $K_{тн}$ , а  $X_p$  - сопротивление насыщенных ДН.

Во втором режиме обе части преобразователя работают независимо. Угол  $\alpha_{д}$  определяется по уравнению

$$1 - \cos \alpha_{д} = M. \quad (10)$$

Остальные соотношения первого режима остаются справедливыми и во втором режиме.

В третьем режиме имеет место вынужденный угол задержки включения вентилей I''-6''. При этом остаются справедливыми соотношения (8)-(10), а угол  $\alpha''$  определяется по более простому выражению

$$\alpha'' = \alpha_{д} + \gamma' - \frac{\pi}{3}. \quad (11)$$

В четвертом режиме появляется перекрытие коммутаций в компенсированной и некомпенсированной частях. В работе рассмотрен режим полного перекрытия. Показано, что зоны с частичным перекрытием узкие. Дифференциальное уравнение коммутации в компенсированной части при перекрытии коммутаций подобно каноническому уравнению компенсированных преобразователей. Однако за счет вносимых сопротивления и э.д.с. изменяются собственная частота и коммутирующая э.д.с. Закон изменения тока коммутации в некомпенсированной части не является синусоидальным, как в некомпенсированных выпрямителях, т.к. он определяется и напряжениями на конденсаторах. В работе получены соотношения, определяющие углы  $\alpha_{д}$ ,  $\gamma'$ ,  $\alpha''$ ,  $\gamma''$ , выпрямленный ток и шесть постоянных интегрирования  $A'_1, A'_2, B'_1, \dots, C'_2$ . В частности, угол дроссельного управления устанавливается выражением

$$1 - \cos \alpha_{д} + \frac{1}{2(\nu_2-1)} [\cos \alpha'' - \cos(\alpha_{д} - \frac{\pi}{3})] + A'_1 [1 - \cos(\alpha_{д} - \alpha'' - \frac{\pi}{3})] + A'_2 \sin \nu(\alpha_{д} - \alpha'' - \frac{\pi}{3}) = M. \quad (12)$$

В пятом режиме перекрытие коммутаций отсутствует, но угол  $\alpha_{д}$  остается зависящим от коммутационных процессов в компенсированной части, поскольку они определяют форму напряжения на ДН. В этом режиме он вычисляется по выражению

$$1 - \cos \alpha_{д} + \frac{1}{2(\nu_2-1)} [\cos \alpha'' - \cos(\alpha'' + \gamma'')] + D'_1 (1 - \cos \gamma'') + D'_2 \sin \gamma'' = M, \quad (13)$$

где  $D'_1$  и  $D'_2$  - постоянные интегрирования. Углы  $\alpha''$ ,  $\gamma''$  и  $\gamma'$  определяются соотношениями (7) и (9).

В работе установлены и рассчитаны на ЭВМ "М-222" области и границы рабочих режимов и влияния на них сопротивления  $X_p$ . Показано,

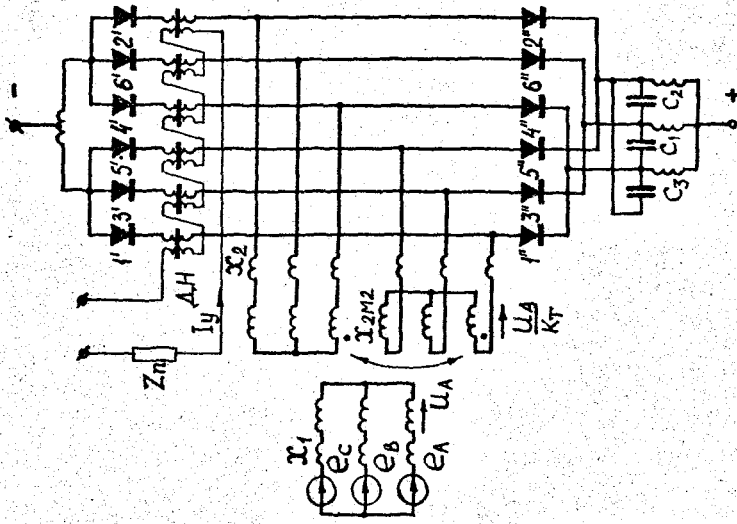
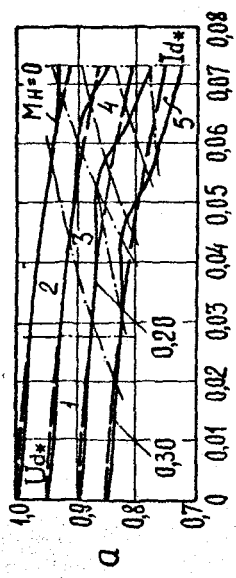
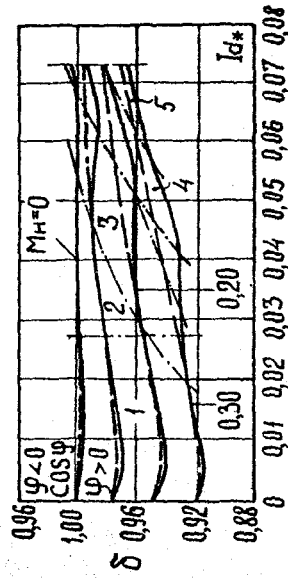


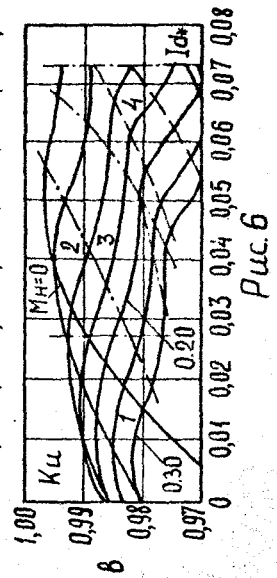
Рис. 5



а



б



в

Рис. 6



что учет  $X_p$  даже такой большой величиной, как  $0,2 X_k''$ , мало сказывается на границах и характеристиках преобразователя.

В первом, втором, третьем и пятом режимах среднее значение выпрямленного напряжения имеет вид

$$U_{d*} = \frac{K_{TII}}{K_T} \frac{\cos(\alpha_A + \frac{\gamma}{2}) \cos \frac{\gamma'}{2} + k_U \cos(\alpha'' + \frac{\gamma''}{2}) \cos \frac{\gamma''}{2}}{2} \quad (14)$$

В четвертом режиме выразить  $U_{d*}$  в удобном виде не представляется возможным. Поэтому в работе получены выражения для мгновенного значения выпрямленного напряжения. По установленным соотношениям, определяющим углы  $\alpha_A, \gamma', \alpha'', \gamma''$ , выпрямленный ток и напряжение, на ЭВМ "М-222" выполнены расчеты внешних характеристик преобразователя как с учетом режимов, так и при независимой работе обеих частей и проведено их сопоставление при практически крайних величинах  $\psi$  и  $X_p$ . На рис.6а, в качестве примера, представлены результаты такого сопоставления для  $\psi = 4,5$  и  $q_1 = \frac{X_p}{X_k''} = 0$ . Сплошные кривые получены с учетом, а пунктирные - без учета взаимовлияния частей. Штрихпунктирными линиями показаны границы режимов. Тонкими пунктирными линиями выделена область полного перекрытия коммутаций. Анализ показал, что наибольшие отклонения действительных характеристик от рассчитанных при независимой работе частей имеет место при наименьших  $\psi, q_1$  и наибольшем  $M_n$  и составляют всего 2-3%. Поэтому в инженерной практике расчет внешних характеристик может выполняться при  $q_1 = 0$  по достаточно простым соотношениям второго режима. В работе представлены рассчитанные таким образом характеристики в широком диапазоне изменения  $\psi$ .

В работе установлены соотношения, определяющие амплитуды напряжений на вентильях и ДН, действующие значения напряжений на конденсаторах и реакторах, мощность ДН. Существующая методика определения действующих значений токов в ветвях одновременно управляемых выпрямителей распространена и на случай полуправляемого полукompенсированного выпрямителя. Показано, что для определения токов вентилей достаточно использовать известные функции перекрытия для некомпенсированной  $F'(\gamma', \alpha_A)$  и компенсированной  $F''(\gamma'', \alpha'', \psi)$  частей. Для расчета токов в обмотках трансформатора, а следовательно, и энергетических характеристик преобразователя, необходимо использовать дополнительно новую функцию, обусловленную разновременностью управления и односторонней компенсацией. Выражение для этой функции в первом, втором, третьем и пятом режимах имеет вид

$$\Phi(\gamma', \alpha_A, \gamma'', \alpha'', \psi) = \frac{1}{\pi} \left[ \alpha_A + \frac{\gamma'}{2} - \alpha'' - \frac{\gamma''}{2} + (1 - \frac{\gamma'}{2} \operatorname{ctg} \frac{\gamma'}{2}) \operatorname{ctg}(\alpha_A + \frac{\gamma'}{2}) - \frac{k_U}{\sqrt{2}} \operatorname{ctg}(\alpha'' + \frac{\gamma''}{2}) \operatorname{ctg} \frac{\gamma''}{2} \right] \quad (15)$$

В четвертом режиме она рассчитывается через мгновенные значения токов.

В работе получены уравнения энергетических характеристик преобразователя во всех режимах. Коэффициент мощности в первых четырех режимах

$$K_M = 3 U_{d*} / \pi \sqrt{1 - \frac{3}{4} [F'(\gamma; \alpha_A) + F''(\gamma; \alpha; \nu) + \Phi(\gamma; \alpha_A, \gamma'', \alpha'', \nu)]}, \quad (16)$$

а в пятом

$$K_M = 3 U_{d*} / \pi \sqrt{\frac{5}{4} - \frac{3}{4} [F'(\gamma; \alpha_A) + F''(\gamma; \alpha; \nu) + 2\Phi(\gamma; \alpha_A, \gamma'', \alpha'', \nu)]}. \quad (17)$$

Коэффициент сдвига в режимах без перекрытия коммутаций рассчитан с помощью соотношений (6)-(13) через активные и реактивные мощности каждой из частей, а в четвертом режиме-через мгновенные значения э.д.с. и тока в первичной обмотке трансформатора. Коэффициент искажения определен по известному соотношению. По полученным выражениям выполнен расчет энергетических характеристик выпрямителя с учетом имеющих место режимов работы. На рис.6 б и в, в качестве примера, при  $\nu = 4.5$  и  $q_1 = 0$  представлены зависимости  $\cos \varphi$  и  $K_u$  от тока нагрузки. Зависимости  $\cos \varphi$  рассчитаны и при независимой работе частей выпрямителя (толстые пунктирные линии). Установлено, что режимы выпрямителя несколько изменяют зависимости  $\cos \varphi = f(I_{d*}, M_M)$  по сравнению с расчетными без учета режимов. Наибольшее расхождение при этом имеет место на границе между третьим и четвертым режимами при наибольшей глубине дроссельного регулирования и составляет 2-2,5%. Очевидно, в практике расчет  $\cos \varphi$  можно производить без учета взаимовлияния частей выпрямителя. Такие расчеты в работе выполнены и построены зависимости  $\cos \varphi$  от тока нагрузки в рабочей полосе  $\nu$ . Кривые показывают, что работа полууправляемого полукompенсированного выпрямителя с комбинированным способом регулирования в практически важной области осуществляется с  $\cos \varphi$  близким к единице. Коэффициент искажения существенно выше, чем у одновременно управляемых выпрямителей той же фазности.

В конце главы приведены данные экспериментальных исследований полууправляемого полукompенсированного выпрямителя, которые полностью подтверждают теоретический анализ.

В четвертой главе показано, что аналитическое исследование переходных процессов в компенсированном и полукompенсированном выпрямителях с дроссельным управлением является чрезвычайно сложным. Поэтому на первоначальной стадии стало совершенно необходимым проведение обширного экспериментального анализа поведения полных преобразователей в переходных режимах и сопоставление его с

характером процессов в некомпенсированных выпрямителях. Такие исследования были выполнены на лабораторном преобразовательном стенде Челябинского политехнического института. Мощность преобразователей 15 кВа, отношение индуктивного и активного сопротивлений фазы  $\frac{X}{R} = 6,5$ . Проведенные исследования, с одной стороны, на основе относительной оценки позволили выработать практические рекомендации для проектирования и эксплуатации изучаемых выпрямителей, а с другой стороны, являются отправным моментом для более детального теоретического анализа этих процессов в дальнейшем. В преобразователе по схеме на рис.1 исследовались переходные процессы при:

1. включении и отключении со стороны сети переменного тока при номинальной нагрузке;
2. отключении со стороны сети при холостом ходе;
3. включении и отключении со стороны постоянного тока;
4. коротком замыкании и обрыве фазы конденсаторной батареи;
5. коротком замыкании между полюсами цепи выпрямленного тока;
6. пробое вентиля.

При рассмотрении полукompенсированного выпрямителя анализировались те же режимы, причем рассматривались пробои в обеих частях его.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Переходные процессы при включении и отключении от сети, включении со стороны цепи постоянного тока в компенсированном, полукompенсированном и в соответствующих некомпенсированных выпрямителях носят благоприятный характер. Отключение от сети при разомкнутой цепи нагрузки во всех преобразователях приводит к некоторому одинаковому повышению напряжения на вентилях. Наибольшие (двукратные) перенапряжения на вентилях и одновременные двух- и трехкратные всплески напряжений на выходе и на двухфазном реакторе возникают в некомпенсированных преобразователях при обрыве цепи постоянного тока. В компенсированном и полукompенсированном выпрямителях перенапряжения отсутствуют. Это положительное свойство их имеет важное значение для тех производств, где выпрямители используются в режимах частых обрывов и включений цепи постоянного тока (электросварка, вакуумно-дуговые печи в электрометаллургии и др.).

2. Повреждения в компенсирующих устройствах компенсированных и полукompенсированных выпрямителей не являются опасными и не требуют каких-либо быстродействующих защит.

3. При пробое вентиля - наиболее тяжелой аварии преобразователей - в компенсированном выпрямителе скорость нарастания аварийного тока независимо от момента повреждения вентиля значительно

меньше, чем в некомпенсированном. Практически в течение двух периодов э.д.с. сети после нарушения режима величина аварийного тока в компенсированном выпрямителе не является опасной и лишь спустя пять-шесть периодов амплитуда его достигает той величины, которая в некомпенсированном выпрямителе может установиться через половину периода после пробоя. В полукompенсированном выпрямителе при пробое вентиля в компенсированной части данное положительное качество проявляется в еще большей степени, т.к. установившийся аварийный ток имеет еще и примерно в три раза меньшую амплитуду. При пробое вентиля в управляемой части как полукompенсированного, так и некомпенсированного выпрямителей характер переходного процесса одинаков. ДН во всех преобразователях ограничивают амплитуду, длительность и скорость нарастания аварийных токов. Таким образом, условия защиты у компенсированных и полукompенсированных выпрямителей при пробое вентиля более благоприятны, чем у некомпенсированных.

4. При коротком замыкании между полюсами цепи выпрямленного тока в компенсированном и полукompенсированном выпрямителях скорость нарастания аварийного тока в 3-4 раза меньше, чем в некомпенсированных преобразователях. ДН практически одинаково во всех выпрямителях снижает скорость и величину тока короткого замыкания. Поэтому условия отключения аварии в компенсированных выпрямителях также более легкие, чем в некомпенсированных.

5. Кратность перенапряжений на элементах всех преобразователей примерно одинакова. В силу действия защит на агрегатах они кратковременны и опасности для оборудования, за исключением вентиля, не представляют. Следует иметь в виду, что вентили компенсированных и компенсированных частей полукompенсированных преобразователей, исходя из установившегося номинального режима работы, должны иметь класс в 1,5-1,7 раза выше.

В пятой главе изложен разработанный инженерный метод расчета и приведены данные внедрения исследованных преобразователей. Показано, что расчет рассмотренных преобразователей может быть осуществлен только методом последовательных приближений. В этом случае весьма эффективным оказался предложенный графо-аналитический метод, в котором наряду с приведенными в предыдущих главах рассчитанными на ЭВМ графическими зависимостями, отражающими наиболее сложные взаимосвязи в преобразователях, используются несложные аналитические соотношения. Установлено, что максимальную емкость конденсаторов компенсированных выпрямителей следует определять исходя из работы их с номинальным током нагрузки на границе режима с повторной

проводимостью вентилях при максимальном коэффициенте трансформации трансформатора  $K_{т\text{ макс}}$ , а максимальные напряжения на конденсаторах и других элементах - по той же границе при работе с минимальной емкостью и  $K_{т\text{ мин}}$ . В полукompенсированных выпрямителях мощность компенсирующих устройств устанавливается по работе их вблизи указанной границы при  $K_{т\text{ макс}}$ , а максимальные напряжения на элементах - при  $K_{т\text{ мин}}$  и неизменной емкости конденсаторов.

В этой же главе приведены описание промышленного исполнения и данные промышленных испытаний внедренных с участием автора компенсируемых выпрямителей. Первые три агрегата, выполненные по нулевой схеме, внедрены на подстанциях электролиза химкомбината "Капролактан" в 1970 году. Четвертый агрегат, имеющий мостовую схему, включен под нагрузку в декабре 1973 года. Промышленные испытания подтвердили высокую точность инженерного метода расчета, а успешная длительная эксплуатация говорит о высокой надежности и экономичности компенсируемых выпрямителей. Внедрение преобразователей за счет снижения потерь электрической энергии позволило на комбинате уменьшить эксплуатационные расходы на 20 тыс. рублей в год, что подтверждается прилагаемым к диссертации актом внедрения.

Проведенные исследования и опыт внедрений позволили разработать технические условия на выполнение серийных компенсируемых выпрямителей с комбинированным способом регулирования напряжения, которые согласно договору переданы заводу "Преобразователь" г. Запорожье. В диссертации приведены основные данные этих условий.

В пятой главе приведено также описание промышленного исполнения полукompенсированных полуправляемых выпрямителей с дроссельно-трансформаторным регулированием, внедрение которых предполагается на строящемся Новосибирском электродном заводе. В приложении к диссертации приведены расчеты сравнительной экономической эффективности установок компенсации реактивной мощности в цехе графитации, выполненные осуществляющим проектирование данного завода Иркутским филиалом Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института алюминиевой, магниевой и электродной промышленности (ИФ ВАМИ), которые показывают, что применение восьми предложенных полуправляемых полукompенсированных выпрямителей с комбинированным способом регулирования на НОВЭЗе позволит сократить капитальные вложения на 447 тыс. рублей, ежегодные эксплуатационные затраты на 44 тыс. рублей в год и снизить численность обслуживающего персонала. Это позволило ИФ ВАМИ принять решение об использовании указанных преобразователей на НОВЭЗе, что подтверждается письмом ИФ ВАМИ, приведенным в приложении к работе.

В приложении к диссертации предложенный инженерный метод проиллюстрирован на примере расчета компенсированного выпрямителя химкомбината "Капролактан" и полукompенсированного выпрямителя НОВЗза.

В заключении сформулированы следующие основные результаты диссертационной работы:

1. На основе исследования обобщенного преобразователя сопоставлены технические характеристики широкого класса практически важных выпрямителей при мгновенной коммутации. Показано, что для повышения коэффициента мощности преобразовательных подстанций, оборудованных неуправляемыми вентилями, целесообразно использовать одновременно управляемые компенсированные и полуправляемые полукompенсированные преобразователи с комбинированным способом регулирования напряжения.

2. С учетом угла коммутации выполнен анализ электромагнитных процессов в одновременно управляемом нулевым компенсированном выпрямителе с таким регулированием. Установлены все режимы работы и показано, что для обеспечения наилучших регулировочных и энергетических характеристик следует использовать первый и второй режимы в области, прилегающей к границе с повторной проводимостью.

3. Установлены соотношения и выполнены на ЭВМ расчеты областей и границ рабочих режимов. Показано, что возможный диапазон дроссельного регулирования при опережающем угле сдвига и величина генерируемой реактивной мощности ограничены появлением режима с повторной проводимостью вентиляей.

4. Для расширения диапазона регулирования и увеличения генерирования реактивной мощности предложен новый способ дроссельного управления компенсированным выпрямителем, обеспечивающий отстройку от повторной проводимости вентиляей.

5. Получены необходимые соотношения и на ЭВМ выполнены расчеты внешних и энергетических характеристик, амплитудных и действующих значений напряжений и токов во всех элементах преобразователя в широком диапазоне собственной частоты контура коммутации. Получено простое выражение для мощности ДН. Результаты расчетов представлены в виде графиков, используемых в предложенном инженерном методе расчета преобразователей.

6. Проанализированы особенности других схем подобных компенсированных выпрямителей с включением конденсаторов и ДН на одну, двойную, тройную и более высокие частоты. Показано, что основные характеристики их описываются идентичными соотношениями,

различающимися лишь величиной схемного параметра. С повышением частоты диапазон дроссельного регулирования при опережающем угле сдвига и генерируемая реактивная мощность уменьшаются, что делает нецелесообразным использование одновременно управляемых выпрямителей с четырех- и более кратной частотами.

7. Выполнен анализ электромагнитных процессов в полупроводниковом полукompенсированном выпрямителе с комбинированным способом регулирования напряжения. Рассмотрены основные режимы работы преобразователя, имеющие место при отсутствии повторной проводимости вентилей компенсированной части.

8. Установлены уравнения и на ЭВМ произведен расчет областей и границ режимов работы преобразователя. Показано, что различие индуктивных сопротивлений контуров коммутации компенсированной и некомпенсированной частей, обусловленное сопротивлением насыщенных ДН, оказывает малое влияние на границы и характеристики преобразователя. С увеличением собственной частоты контура коммутации компенсированной части зоны со взаимным влиянием коммутационных процессов в одной части на подобные процессы в другой сокращаются.

9. Получены уравнения и рассчитаны внешние и энергетические характеристики полупроводникового полукompенсированного выпрямителя с учетом и без учета взаимовлияния компенсированной и некомпенсированной частей. Показано, что с достаточной для практики точностью их можно определять исходя из независимой работы частей.

10. Разработана подобная существующей для одновременно управляемых выпрямителей методика определения действующих значений токов в ветвях полупроводникового полукompенсированного преобразователя. Показано, что в данном случае кроме известных функций перекрытия необходимо учитывать вновь установленную функцию, обусловленную разновременностью управления и односторонней компенсацией. Получены соотношения и выполнены расчеты амплитудных и действующих значений напряжений на элементах преобразователя. Установлены соотношения, определяющие основной расчетный параметр и мощность ДН.

11. Особенности внешних и энергетических характеристик позволили рекомендовать компенсированные одновременно управляемые выпрямители для потребителей с небольшой глубиной регулирования напряжения (15-20%) при необходимости компенсации большой величины реактивной мощности. Для потребителей с большим диапазоном изменения напряжения более целесообразны полупроводниковые полукompенсированные выпрямители.

12. Экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретического анализа. Показано, что переходные процессы при авариях и переключениях в компенсированном и полукompенсированном выпрямителях протекают более благоприятно, чем в некомпенсированных. ДН снижают скорость нарастания и амплитуду аварийных токов.

13. Разработан простой и весьма точный инженерный метод расчета компенсированных и полукompенсированных выпрямителей с комбинированным способом регулирования напряжения.

14. Результаты исследований использованы как при внедрении, так, и разработке технических условий на выполнение рассмотренных выпрямителей.

15. Данные эксплуатации и расчеты ИФ ВАМИ свидетельствуют о высокой экономичности компенсации реактивной мощности с помощью исследованных преобразователей.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Баев А.В., Хохлов Ю.И., Ченчик М.Ф. Регулирование выпрямленного напряжения компенсационных выпрямителей. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧПИ, 1970, № 80.

2. Баев А.В., Хохлов Ю.И., Волков Ю.К. Режимы работы компенсированных полупроводниковых выпрямителей, управляемых дросселями насыщения. Сб. НТОЭП: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, 1972.

3. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Регулирование выпрямленного напряжения компенсированных преобразователей. Материалы научно-технической конференции "Повышение эффективности устройств преобразовательной техники", изд-во "Наукова думка", Киев, 1972, ч.2.

4. Хохлов Ю.И., Баев А.В., Волков Ю.К. Выбор и расчет дросселей насыщения для регулирования напряжения компенсированных полупроводниковых выпрямительных агрегатов. В сб.: "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, ЧПИ, 1972, № 108.

5. Баев А.В., Волков Ю.К., Хохлов Ю.И. и др. Компенсированные полупроводниковые выпрямители с регулируемым выпрямленным напряжением. Материалы Всесоюзного совещания энергетиков предприятий цветной металлургии, "Промэнергетика", 1972, № 18 (Центро-энергоценетмет).

6. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Вентильный преобразователь с повышенным коэффициентом мощности при глубоком регулировании выпрям-



ленного напряжения. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧПИ, 1973, 122.

7. Хохлов Ю.И., Баев А.В., Волков Ю.К. Регулирование выпрямленного напряжения компенсированных несимметричных полупроводниковых преобразователей. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок", Челябинск, ЧПИ, 1972, № 110.

8. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Компенсированные преобразователи с улучшенными энергетическими и регулировочными характеристиками. Материалы УШ научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Томск, изд-во Томского университета, 1974, т. III.

9. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Несимметричные компенсированные выпрямители. "Электромеханика", 1974, № 4.

10. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Режимы работы компенсированных полупроводниковых выпрямителей с комбинированным способом регулирования напряжения. "Промышленная энергетика", 1974, № 8.

11. Хохлов Ю.И., Баев А.В., Волков Ю.К. Четырехпульсовый компенсированный выпрямитель с двойной частотой напряжения на коммутрующих конденсаторах. В сб.: "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, ЧПИ, 1973, № 124.

12. Хохлов Ю.И., Баев А.В. К электромагнитным процессам в несимметричном компенсированном преобразователе. В сб.: "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, ЧПИ, 1974, № 135.

13. Хохлов Ю.И., Баев А.В. Основные характеристики и свойства полукompенсированного полупроводникового выпрямителя с комбинированным способом регулирования напряжения. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧПИ, 1974, № 141.

14. Баев А.В., Хохлов Ю.И. Способ управления компенсированным выпрямителем. Решение о выдаче авторского свидетельства за № 1810602/24-7 от 11.УП. 1972, Кл. H02p 13/24.