ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.314.632

ТИРИСТОРНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ В РЕЖИМАХ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ГЕНЕРИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОЛИЗА АЛЮМИНИЯ

Ю.И. Хохлов, Н.Ю. Башмакова, М.А. Дзюба
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассмотрена работа тиристорного выпрямительного агрегата применительно к условиям электролизного производства алюминия в зонах с потреблением и генерированием реактивной мощности. Генерирование реактивной мощности обеспечивается включением компенсирующего устройства на токи пятой и седьмой гармоник.

Электролизное производство алюминиевой промышленности, потребляющее 15 000-17 000 кВт-ч на тонну алюминия, является одним из наиболее энергоемких [1]. Поэтому в условиях строительства новых крупных алюминиевых заводов (Богучанского, Тайшетского, Павлодарского и др.), а также при реконструкции ряда существующих заводов, применением энергосберегающих систем электроснабжения (СЭС) можно получить значительный экономический эффект.

Эффективность использования электрической энергии во многом определяется ее качеством на входе и выходе преобразовательных агрегатов и уровнем потребляемой ими из сети реактивной мощности.

Для технолога электрическая энергия является качественной, если выпрямленный ток достаточно жестко стабилизирован, поскольку от степени стабилизации зависит выход металла по току, а иногда и надежность работы электролизеров. Работа электролизной серии неизбежно сопровождается постоянным появлением анодных эффектов (вспышек) в одной или нескольких ваннах, в результате которых резко возрастает сопротивление «больных» электролизеров. Напряжение на «больных» электролизерах возрастает в среднем с 4-5 до 40-50 вольт, что приводит к снижению выпрямленного тока всей серии и, соответственно, к снижению ее производительности. Указанный отрицательный эффект усиливается при колебаниях напряжения в питающей агрегаты сети переменного тока. От изменений выпрямленного тока технология электролиза должна быть освобождена. Кроме того, технолог заинтересован в полном использовании выпрямительных агрегатов по току и напряжению, поскольку при этом в электролизную серию может быть передана максимальная активная мощность, включено максимальное число электролизеров, получен максимальный технологический и, соответственно, энергосберегающий эффект.

Для энергетика качество электрической энергии, прежде всего, связано с гармоническим воздействием преобразовательных агрегатов на питающую сеть и с потреблением ими из сети реактивной мощности. Достаточный уровень электромагнитной совместимости агрегатов с питающей сетью должен быть обеспечен при выполнении всех указанных выше условий со стороны технологического процесса. А это предъявляет особые требования к способам регулирования выпрямленного напряжения и компенсации реактивной мощности выпрямительных агрегатов.

В последние годы на ряде предприятий алюминиевой промышленности начато использование тиристорных выпрямительных агрегатов [2]. В этом случае регулирование выпрямленного напряжения агрегатов осуществляется изменением углов управления тиристоров выпрямительных блоков (фазовое управление). При этом обеспечивается необходимая для стабилизации тока плавность регулирования напряжения.

Главным недостатком тиристорных агрегатов является их низкий коэффициент мощности, который снижается до недопустимых для мощных преобразователей величин. Дело в том, что при больших токах нагрузки углы коммутации вентилей неуправляемых выпрямительных агрегатов приближаются к 30 эл. град. А это означает то, что угол сдвига фаз неуправляемого выпрямителя примерно равен 20 эл. град. Агрегат даже при отсутствии управления потребляет из сети реактивную мощность, по величине составляющую (30-40) % от активной мощности. При фазности агрегата большей 12 коэффициент мощности дополнительно снижается из-за появления вынужденных

углов задержки включения вентилей [3]. Резкое влияние на его снижение оказывает процесс фазового управления агрегатами. Последнее, в условиях электролизного производства алюминия, является особенно серьезной проблемой, поскольку в этом случае выпрямительные агрегаты большую часть времени работают в зарегулированном режиме (при пониженном напряжении) и открываются лишь на время анодного эффекта (вспышки) в ваннах. Очевидна необходимость применения устройств компенсации реактивной мощности. Одним из путей компенсации реактивной мощности является перевод выпрямительных агрегатов в компенсированный режим работы [3-8].

Принципиальная схема одного из вариантов тиристорного компенсированного выпрямительного агрегата представлена на рис. 1. Агрегат включает в себя шестифазные преобразовательные блоки 1 и 2 с преобразовательными трансформаторами 3 и 4 и выпрямительными мостами 5 и 6. По отношению к нагрузке выпрямительные мосты могут соединяться как последовательно (рис. 1), так и параллельно. Схемами соединения обмоток трансформаторов 3 и 4 обеспечивается двенадцатифазный режим преобразования. Компенсирующее устройство 7 состоит из трехфазных реакторов 8 и 9 и коммутирующей конденсаторной батареи 10 и может включаться как со стороны сетевых (рис. 1) так и со стороны вентильных обмоток трансформаторов. Преобразовательные трансформаторы могут выполняться как на самостоятельных магнитопроводах (рис. 1), так и на одном совмещенном магнитопроводе [4-7].

В пакете MATLAB/SIMULINK разработаны модели СЭС как с компенсированными, так и с некомпенсированными выпрямительными агрегатами. В качестве примера на рис. 2 приведена модель СЭС с агрегатом по схеме на рис. 1. Модель содержит трехфазный источник напряжения *3-Phase Source* 1, замещающий питающую сеть, аналогичный источник напряжения *3-Phase Source* 2, обеспечивающий питание системы импульсно-фазового управления тиристорными выпрямительными мостами *Universal Bridge 1* и *Universal Bridge 2* с блоками формирования *Synchronized 12-Pulse Generator* и движения *Repeating Sequence* управляющих импульсов. Со стороны сетевых обмоток преобразовательных трансформаторов *Three-phase Transformer 1* и *Three-phase Transformer 2* включена подсистема *Subsystem,* моделирующая компенсирующее устройство. Нагрузка *Load* задана активным и индуктивным сопротивлениями, а также противо-ЭДС. В модели предусмотрено использование блока графического интерфейса *Power-Continuous* и показанной на рис. 2 измерительной аппаратуры. Параметры СЭС отвечают реальному комплексу электролиза с линейным напряжением питающей сети 10 кВ и номинальными выпрямленными током 25 000 А и напряжением 850 В.

С помощью разработанных моделей проведены исследования статических, динамических и спектральных характеристик СЭС с тиристорными выпрямительными агрегатами. Ниже демонстрируются возможности рассматриваемых преобразователей при работе их в некомпенсированном и компенсированном режимах работы применительно к условиям электролиза алюминия.

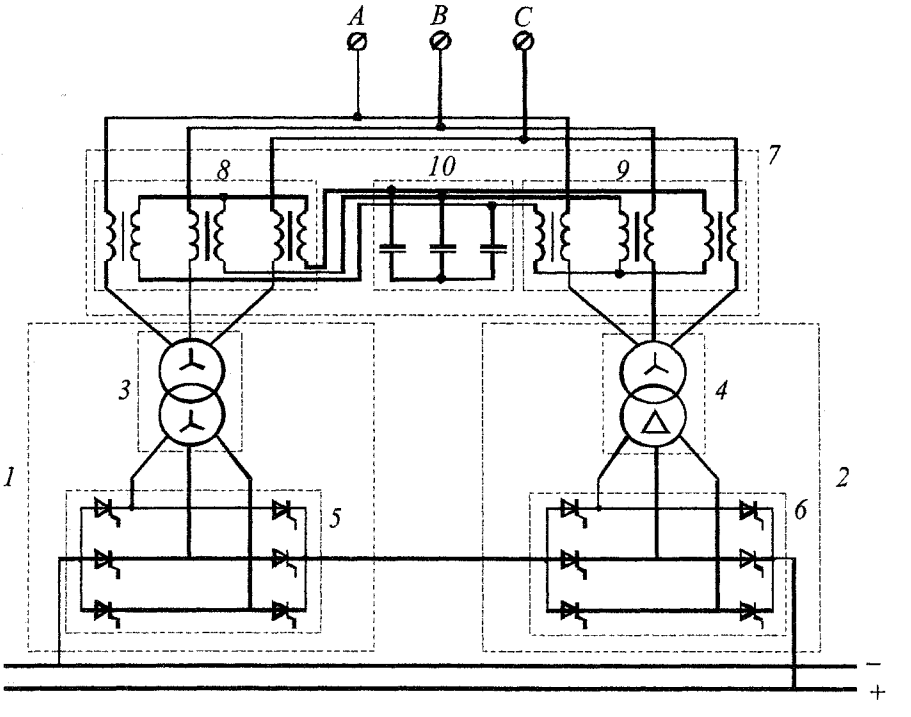


Рис. 1. Принципиальная схема компенсированного выпрямительного агрегата

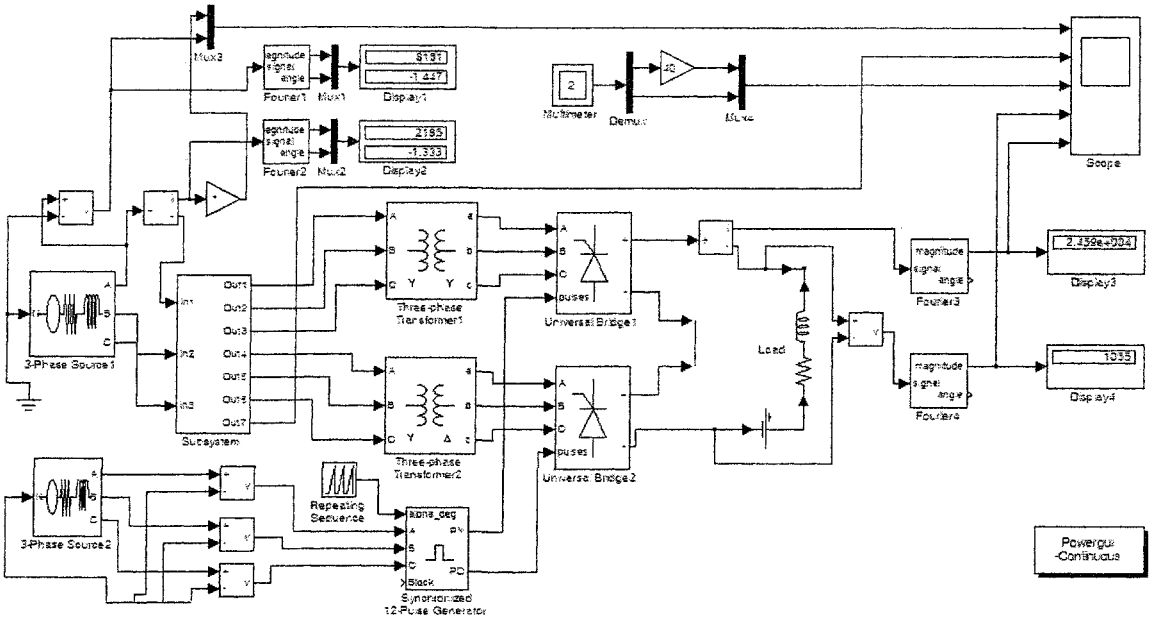


Рис. 2. Модель комплекса «питающая сеть-тиристорный компенсированный выпрямительный агрегат-нагрузка

Временными диаграммами на рис. 3 иллюстрируется процесс управления некомпенсированным выпрямительным агрегатом. Аналогичный процесс в СЭС с компенсированным преобразователем показан на рис. 4. Следует заметить, что для стабилизации тока в электролизерах при возникновении анодных эффектов и колебаниях напряжения питающей сети в условиях алюминиевой промышленности требуемый диапазон плавного регулирования выпрямленного напряжения состояния лишь 5-7% от номинального напряжения. Временные диаграммы подтверждают возможность успешной работы агрегатов как в некомпенсированном, так и в компенсированном режимах работы, поскольку, как видно из кривых напряжения на нагрузке на рис. 3 и 4, этот диапазон перекрывается с запасом более чем в два раза.

Кривые фазного напряжения и тока питающей сети указывают на то, что некомпенсированный агрегат работает в зоне с потреблением, а компенсированный - в зоне с генерированием реактивной мощности. Режим генерирования реактивной мощности требует применения компенсирующего устройства. В данном преобразователе оно работает с высокой эффективностью [4] на частотах пятой и седьмой гармоник (см. кривые тока и напряжения на конденсаторной батарее на рис. 4). Кроме того, из-за возрастания обратного напряжения на тиристорах, по сравнению с некомпенсированным агрегатом, требуется их более высокий класс (см. кривые тока и напряжения на тиристорах на рис. 3 и 4). Однако указанные затраты могут быстро окупиться за счет большой величины генерируемой реактивной мощности. Действительно, если учесть, что компенсирующее устройство обеспечивает компенсацию реактивной мощности некомпенсированного агрегата и ее генерирование компенсированным агрегатом, то нетрудно убедиться в том, что величина реактивной мощности даже превышает активную мощность нагрузки.

Необходимо обратить внимание на то, что номинальный режим работы у компенсированного агрегата обеспечивается в его открытом состоянии и лишь при возникновении анодных эффектов или соответствующего изменения напряжения питающей сети агрегат переходит в зарегулированный режим. А это означает, что компенсированный агрегат продолжительное время работает в выбранном оптимальном режиме с генерированием максимального значения реактивной мощности. В некомпенсированном агрегате имеет место обратная картина. В номинальном режиме некомпенсированный агрегат работает с максимальным потреблением реактивной мощности, которая снижается лишь на время указанных отклонений от номинальных параметров сети и нагрузки.

На рис. 5 приведены спектры и коэффициенты искажения синусоидальности напряжения и тока питающей сети зарегулированного некомпенсированного выпрямительного агрегата. Аналогичные характеристики для открытого компенсированного агрегата приведены на рис. 6. Характеристики определены на одном и том же периоде изменения напряжения сети, отвечающем наиболее продолжительному номинальному режиму работы электролизной серии.

Из рассмотрения результатов расчета на рис. 5 и 6 следует, что в обоих случаях спектры тока и напряжения сети соответствуют классическому

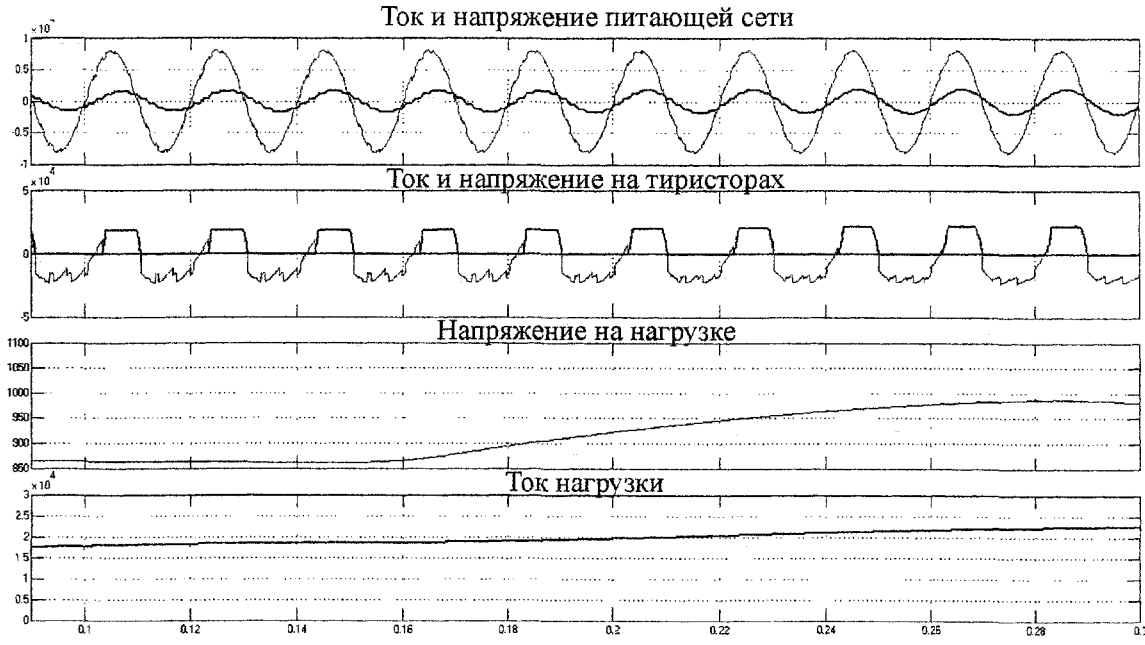


Рис. 3. Временные диаграммы процессов в комплексе с тиристорным некомпенсированным выпрямительным агрегатом

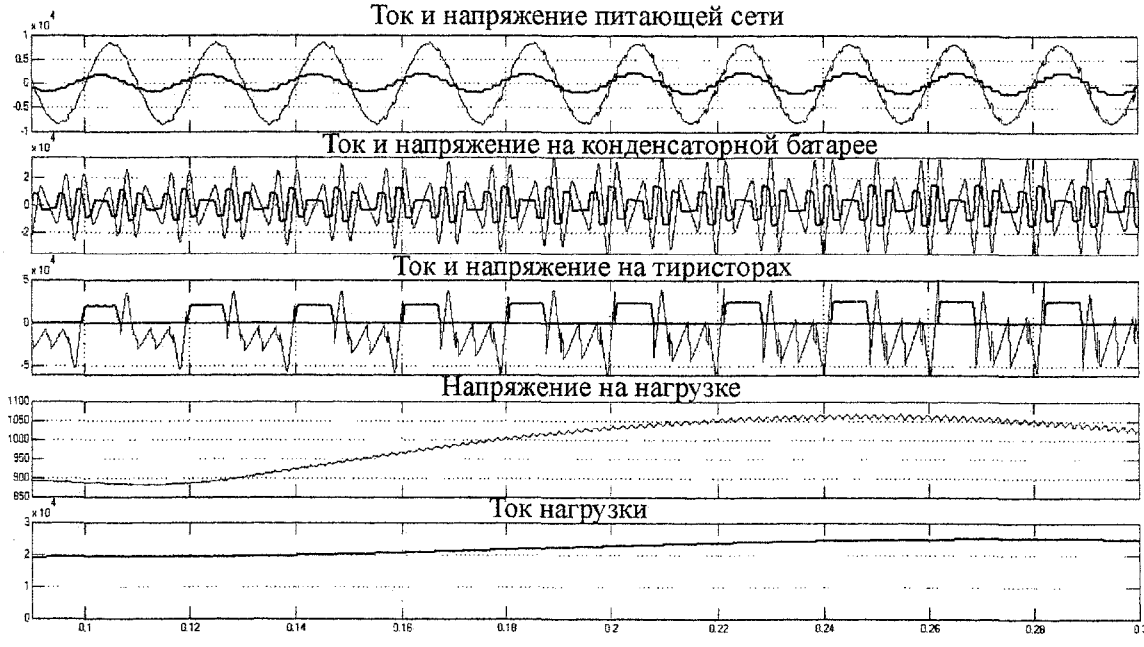
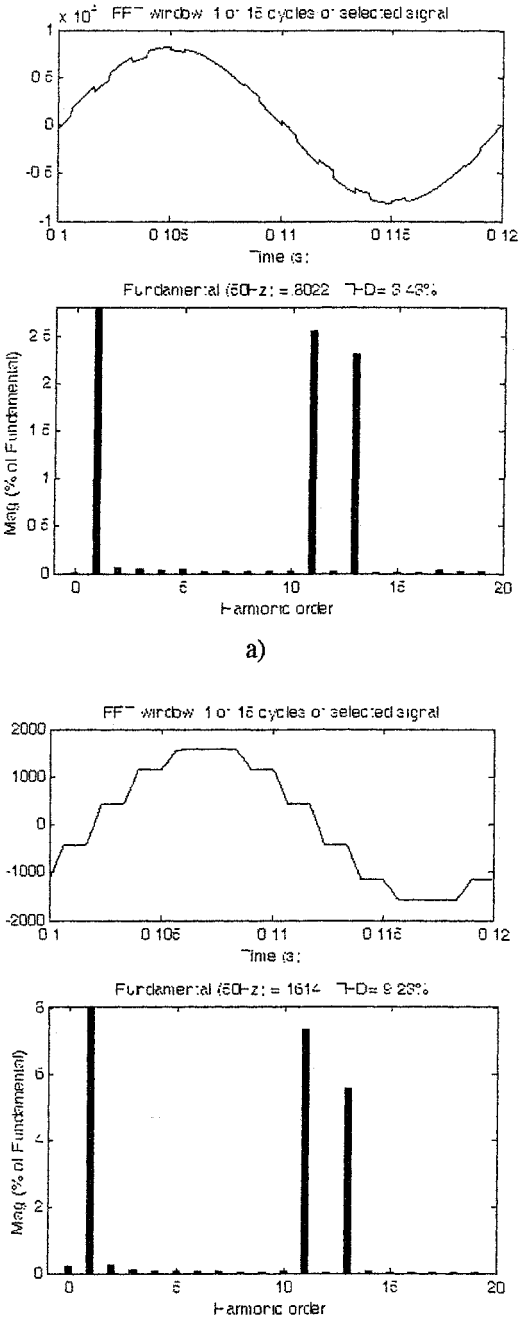


Рис. 4. Временные диаграммы процессов в комплексе с тиристорным компенсированным выпрямительным агрегатом

двенадцатифазному режиму преобразования. Сопоставление коэффициентов искажения синусоидальности указанных величин говорит о том, что в номинальном режиме работы серии некоторое преимущество имеют СЭС с компенсированными выпрямительными агрегатами. Аналогичный анализ для режима максимального выпрямленного напряжения приводит к противоположному результату, но этот режим непродолжителен.

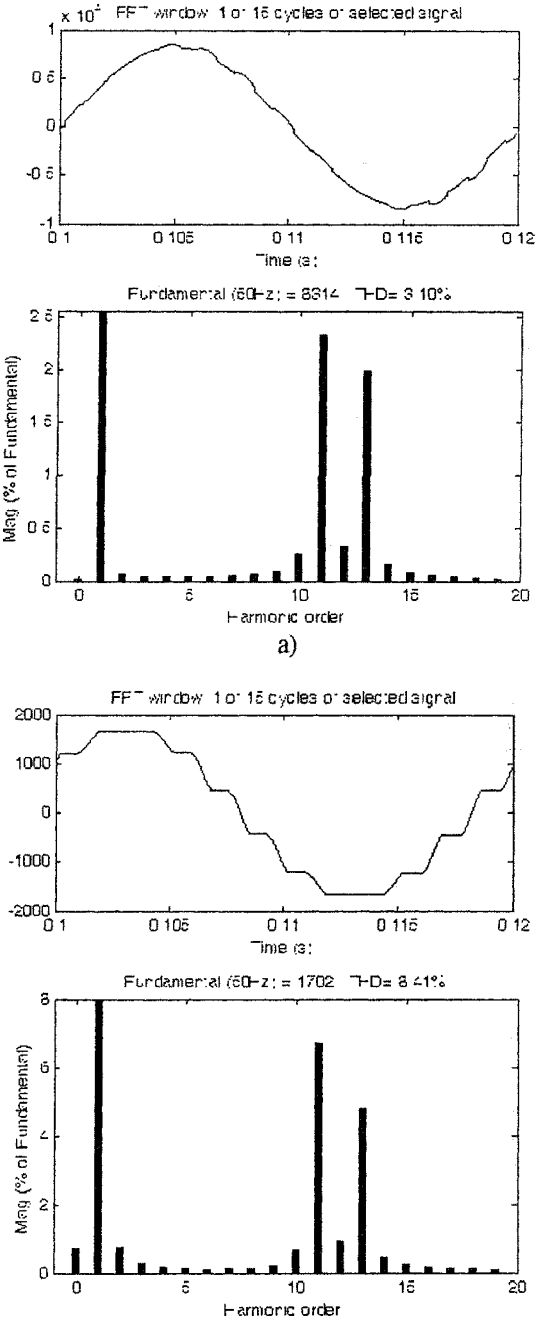
Таким образом, применение тиристорных компенсированных выпрямительных агрегатов является эффективным средством компенсации реактивной мощности при выполнении всех других основных требований к СЭС электролизного производства алюминия. В зависимости от требования питающей сети по реактивной мощности компенсированные агрегаты целесообразно применять с тем или иным числом некомпенсированных преобразователей. В этом случае оптимизируется потребление или генерирование реактивной мощности и дополнительно снижается уровень несинусоидальности напряжения и тока сети. По-



а)

б)

Рис. 5. Спектры напряжения (а) и (б) питающей сети некомпенсированного выпрямителя



а)

б)

Рис. 6. Спектры напряжения (а) и (б) питающей сети компенсированного выпрямителя

следнее связано с тем, что компенсированные агрегаты при параллельной работе с некомпенсированными играют роль активных фильтров [4, 5]. В результате СЭС работает в режиме, близком к двадцатичетырехфазному.

В заключение отметим, что временные диаграммы на рис. 3 и 4 отвечают неизменным параметрам нагрузки ($R_н$ =0,03 Ом, $L_н$ =0,001 Гн, $e_н$ = 300 В). В этом случае при повышении выпрямленного напряжения возрастает и выпрямленный ток. Это сопровождается повышением напряжения на конденсаторной батарее и вентилях. В замкнутой системе автоматической стабилизации выпрямленного тока указанные напряжения снижаются.

Литература

1.Бохмат, И.С. Алюминиевая промышленность и электроэнергетика: реальность и перспективы / КС. Бохмат // Электрика. - 2004. - № 8. - С. 3-13.

2. Бобков, В.А Реконструкция преобразовательных подстанций для питания электролизеров алюминия / В.А. Бобков, А.В. Бобков // Силовая электроника. Тематическое приложение к журналу «Компоненты и технологии». - СПб.: Издатель 000 «Издательство Файнстрит». - 2006. -№4- С. 66-68.

3. Хохлов Ю.И Квазиустановившиеся электромагнитные процессы и характеристики двадцатичетырехфазного компенсированного преобразовател /Ю.И. Хохлов, В.О. Розкин //Электричество. - 1990.- № 10. - С. 48-54.

4. Хохлов Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. / Ю.И. Хохлов. - Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1995. - 355 с.

5. Хохлов Ю.И. Проблемы энергосбережения в системах электроснабжения на основе энергетической электроники / Ю.И.Хохлов /I Наука и технологии. Труды XXIII Российской школы по проблемам науки и технологий. - М.: РАИ, 2003. - С. 555-570.

6. Патент 1124414 (Российская Федерация). Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное / Ю.И. Хохлов. - Бюл. изобр.-1984.-№42.

7. Результаты промышленных испытаний первого компенсированного выпрямительного агрегата с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах / Ю.И. Хохлов, И.Л. Красногорцев, С.Г. Ляпкало и др. // Электричество, 1989. - № 3. - С. 26-31

8. Хохлов Ю.И. Компенсированные параметрические источники тока и их свойства // Электричество. -2007. -№ 3.-С. 26-31.

Хохлов Ю.И. в 1966 году окончил Челябинский политехнический институт (ныне Южно-Уральский государственный университет). В 1991 году в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию на тему «Компенсированный выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных болков». Декан энергетического факультета, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» ЮУрГУ, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент АЭН РФ.

Башмакова Н.Ю. в 1996 году окончила Челябинский государственный технический университет (ныне Южно-Уральский государственный университет) по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий». Ассистент кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ. Направление научной деятельности - силовая электроника.

Дзюба М.А. в 1997 году окончил Челябинский государственный технический университет (ныне Южно-Уральский государственный университет). В 2004 году в Южно-Уральском государственном университете защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование электромагнитных процессов в компенсированном преобразователе частоты». Доцент кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ, кандидат технических наук.