

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.314.632

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОМПЕНСИРОВАННОМ ВЫПРЯМИТЕЛЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ НА ОСНОВЕ АИН С ШИМ

*Ю.И. Хохлов, Д.В. Гиззатуллин, А.Г. Осипов
г. Челябинск, ЮУрГУ*

В пакете MATLAB 7.5 разработана модель и осуществлено моделирование электромагнитных процессов в компенсированном выпрямительном агрегате с пятой и седьмой гармониками напряжения на конденсаторах и обратной связью в виде АИН с синусоидальной ШИМ. Для улучшения формы выходного напряжения АИН, используемого для регулирования выпрямленного напряжения агрегата, применен низкочастотный фильтр.

Системы электроснабжения (СЭС) энергоемких потребителей постоянного тока цветной и черной металлургии (алюминиевое, цинковое, магниевое, сталеплавильное производства), электродной и химической промышленности, городского и магистрального электрического транспорта и др. строятся с использованием мощных выпрямительных агрегатов. Эффективность использования электрической энергии в этих СЭС напрямую связана с ее качеством на входе и выходе агрегатов. Качество электрической энергии на входе агрегатов, а также ее потери в СЭС (в преобразовательных трансформаторах и всей сети переменного тока), прежде всего, определяются гармоническим воздействием агрегатов на питающую сеть и потреблением ими из сети реактивной мощности. Качество электрической энергии на выходе выпрямительных агрегатов и эффективность ее преобразования в энергию постоянного тока или в другие виды энергии определяются спектром выпрямленного напряжения и удовлетворительным совпадением реального закона регулирования этого напряжения с требуемым по технологии. Оптимальные способы нормализации качественных показателей электрической энергии на входе и выходе выпрямительных агрегатов, высокоэффективной компенсации потребляемой реактивной мощности и быстродействующего плавного регулирования выпрямленного напряжения обеспечивают значительный энергосберегающий эффект.

В существующей практике наибольшее распространение получили способы внутреннего регулирования выпрямленного напряжения агрегатов, когда управляемые нелинейные элементы (тиристоры, дроссели насыщения, работающие в режиме с самонасыщением, дроссели насыщения с тиристорным управлением и т.п.) включаются в силовоточные цепи со стороны вторичных обмоток преобразовательных трансформаторов. Эти способы наряду со снижением энергетических

показателей СЭС в процессе регулирования неизбежно сопряжены с существенным ухудшением массогабаритных показателей агрегатов.

Токи первичных цепей выпрямительных трансформаторов в десятки, а иногда и в сотни раз меньше токов во вторичных цепях. Поэтому управление выпрямительными агрегатами целесообразно переносить на первичную сторону трансформаторов. Особенно очевидным это становится при возрастании мощности агрегатов, когда на подстанции осуществляются глубокие вводы повышенных напряжений.

Следует особо подчеркнуть значимость эффективного решения вновь обострившейся проблемы компенсации реактивной мощности в СЭС. Пониженное внимание к этой проблеме в последние годы привело к значительной загрузке всех элементов СЭС реактивной мощностью, приближающейся по величине к активной мощности. Отрицательные последствия этого явления хорошо известны. Положение усугубляется и тем, что традиционные пути компенсации реактивной мощности с помощью внешних по отношению к агрегатам компенсирующих устройств в условиях преобразовательных СЭС не эффективны, а зачастую и просто не приемлемы.

В работе [1] предложено принципиально изменить стратегию построения выпрямительных агрегатов СЭС указанных производств. А именно, внутренней целесообразно сделать функцию компенсации реактивной мощности с помощью высокоэффективного и многофункционального компенсирующего устройства, а внешней – регулируемую функцию, осуществляемую с помощью индивидуального для каждого агрегата или группового современного регулирующего устройства. Таковым является устройство, реализующее перспективный принцип формирования плавно регулируемого по фазе и амплитуде вольтодобавочного напряжения, создаваемого путем синусоидаль-

ной широтно-импульсной модуляции постоянного напряжения.

На рис. 1 представлена принципиальная схема одного из вариантов подобных выпрямительных агрегатов. Агрегат имеет двенадцатифазное исполнение. Аналогично строятся агрегаты большей фазности, по нулевой и мостовой схемам, с различным исполнением преобразовательных трансформаторов и различным включение компенсирующих устройств на токи пятой и седьмой гармоники [1, 2].

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 [1]. Схематическое соединение обмоток трансформаторов 3 и 4 обеспечивает 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 [1]. Преобразовательные трансформаторы могут выполняться как на самостоятельных магнитопроводах (см. рис. 1), так и на одном совмещенном магнитопроводе [1]. При специальной конструкции магнитопровода, использующей магнитный шунт, компенсирующее устройство может быть выполнено в безреакторном варианте [2]. Автономный инвертор напряжения 11 содержит трехфазный выпрямительный мост на полностью управляемых вентильных (например, на IGBT транзисторах) с обрат-

ными диодами 12, входной конденсатор 13 и систему управления 14, обеспечивающую синусоидальную широтно-импульсную модуляцию выходного напряжения инвертора 11. Напряжение инвертора с помощью согласующего трехфазного трансформатора 16 вводится в цепь сетевых обмоток преобразовательных трансформаторов 3 и 4. В отличие от работы [1] это напряжение перед подачей на трансформатор 16 фильтруется низкочастотным Г-образным фильтром 15.

На рис. 2 представлена модель исследуемой СЭС, разработанная в пакете MATLAB 7.5. Модель содержит трехфазный источник напряжения, задающий питающую сеть *Power System*, трехфазные преобразовательные трансформаторы *Three-Phase Transformer 1* и *2*, согласующий трансформатор *Transformer 3*, диодные выпрямительные мосты *Bridge 1* и *2*, а также автономный инвертор напряжения, включающий в себя мост *Bridge 3* на IGBT транзисторах, осуществляющий синусоидальную ШИМ модуляцию генератор *Discrete PWM Generator* и входной конденсатор *C*. Индуктивностью *L* замещается небольшое индуктивное сопротивление входной ошиновки инвертора. Нагрузка *Load* задана активным и индуктивным сопротивлениями, а также противоЭДС. Подсистема *Subsystem 1* определяет компенсирующее устройство (рис. 3), подсистема *Subsystem 2* – низкочастотный фильтр (рис. 4). В модели предусмотрено использование блока графического интерфейса *Continuous*, а также показанной на рис. 2 измерительной и коммутационной аппаратуры. Параметры СЭС отвечают реальному комплексу электролиза с линейным напряжением питающей сети

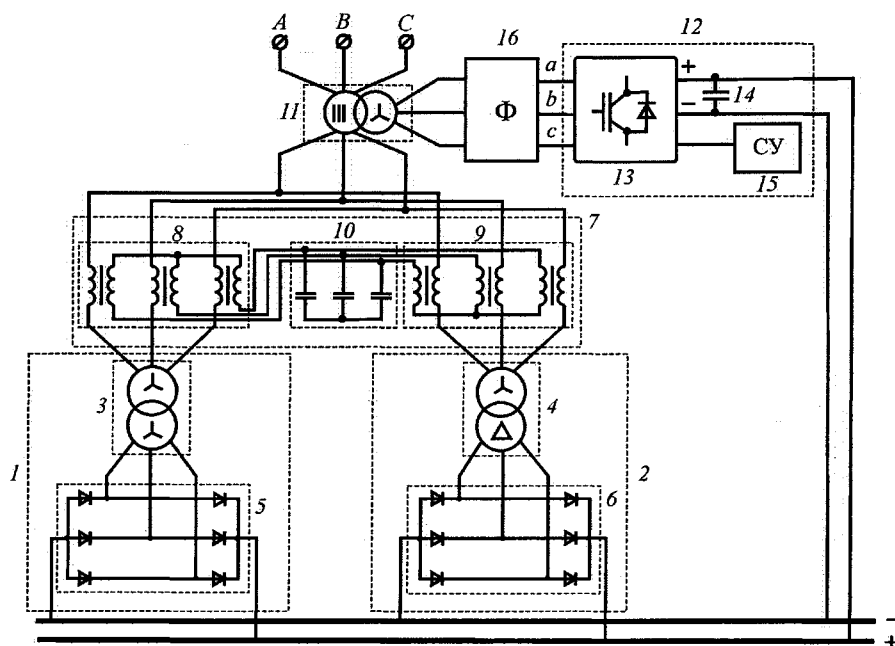


Рис. 1. Принципиальная схема компенсированного выпрямительного агрегата с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ

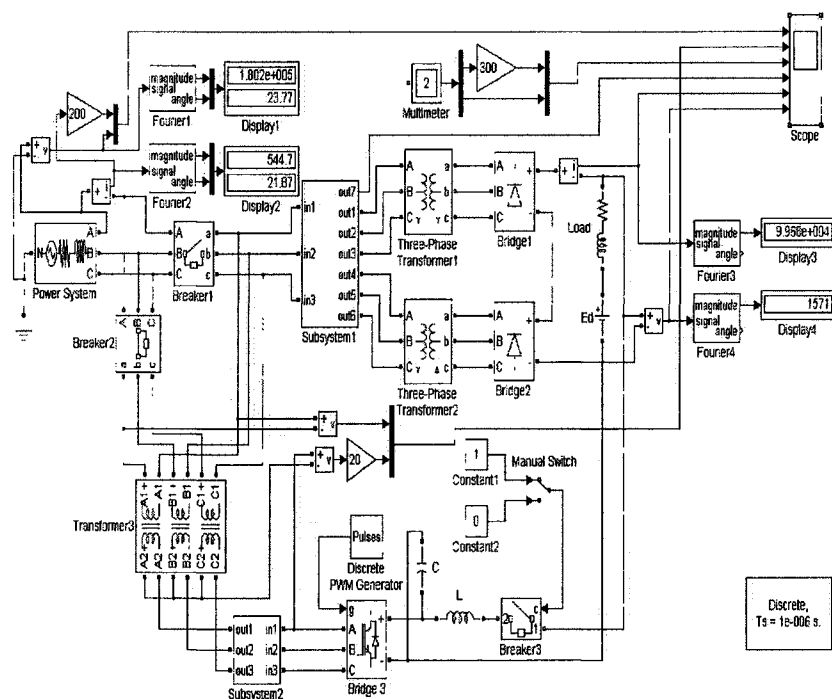


Рис. 2. Модель компенсированного выпрямительного агрегата с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ

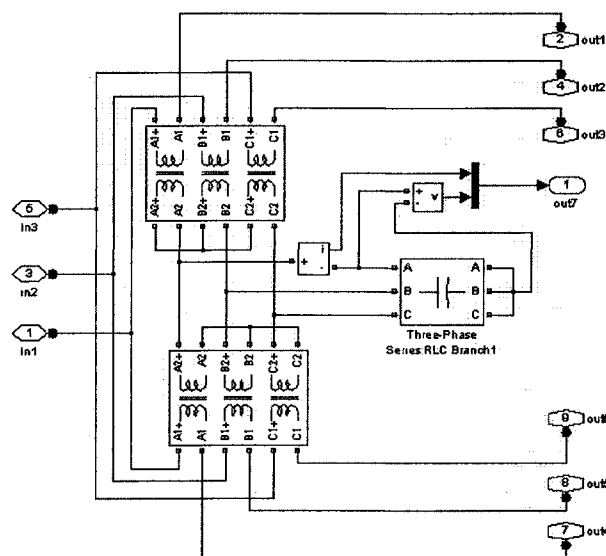


Рис. 3. Подсистема «Компенсирющее устройство» (Subsystem 1)

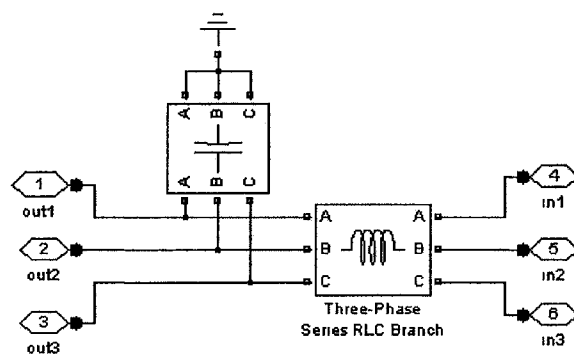


Рис. 4. Подсистема «Фильтр» (Subsystem 2)

220 кВ и номинальными выпрямленным током 100 000 А и напряжением 1500 В (см. показания дисплеев 1, 3 и 4 на рис. 2).

Для автономного инвертора выбраны следующие основные параметры:

- несущая частота 10 кГц;
- модулирующая частота 50 Гц;
- емкость входного конденсатора 0,001 Ф.

Низкочастотный фильтр по схеме, приведенной на рис. 4, имеет следующие величины индуктивности и емкости:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Г; } C = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ф.}$$

При выбранных параметрах фильтр имеет частоту среза

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{\pi \sqrt{2 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-2}}} = 159 \text{ Гц.}$$

С помощью разработанной модели проведены исследования всех основных характеристик СЭС. На рис. 5 представлены полученные с помощью разработанной модели временная диаграмма и дискретный спектр напряжения на выходе автономного инвертора. Как видно из рисунка, спектр этого напряжения состоит из первой гармоники и массивов высокочастотных гармоник, сконцентрированных возле частот, кратных частоте квантования (10, 20, 30, ... кГц) и, соответственно, возле 200, 400, 600, ... гармоник. Кроме того, в спек-

тре указанного напряжения имеется некоторое содержание гармоник, кратных фазности преобразования выпрямительного агрегата, преимущественно 11 и 13 гармоник. Эти гармоники обусловлены обратной трансформацией в согласующем трансформаторе. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения инвертора весьма высок и, как следует из рис. 5, составляет 82,45 %.

Высшие гармоники имеют большую частоту, поэтому они легко подавляются фильтром. На рис. 6 этот факт иллюстрируется временной диа-

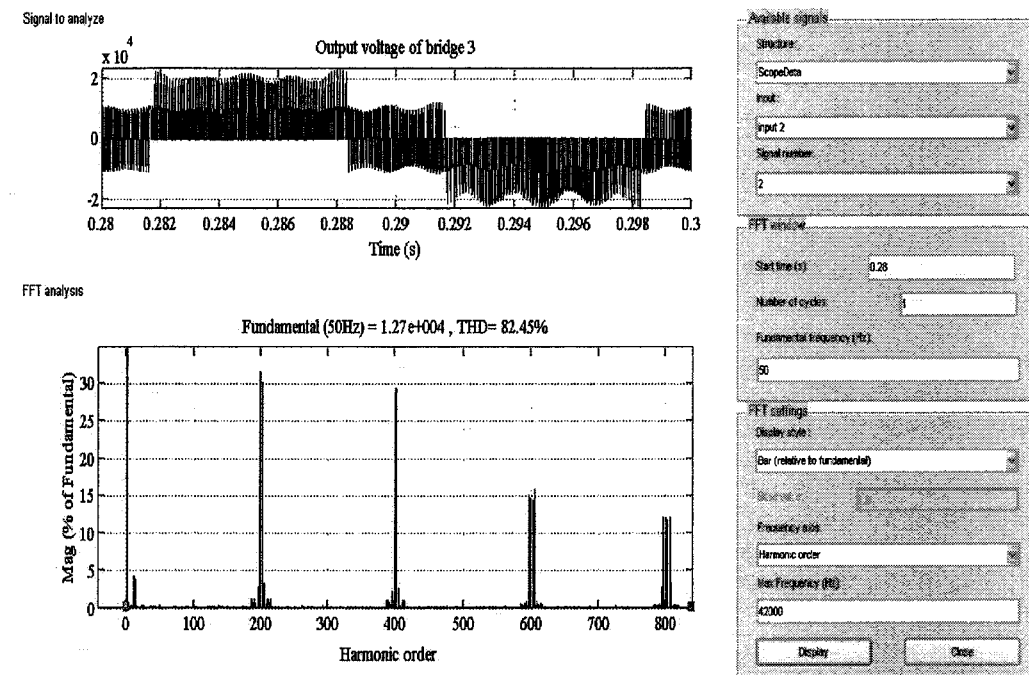


Рис. 5. Спектр напряжения на выходе автономного инвертора

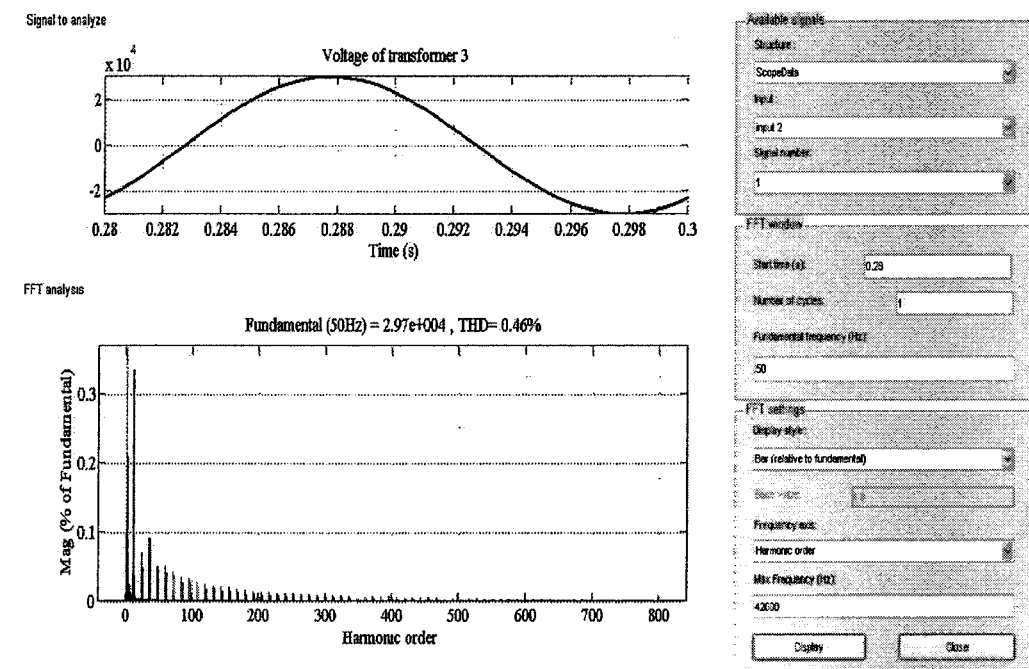


Рис. 6. Спектр напряжения на выходе согласующего трансформатора 3

граммой и дискретным спектром напряжения на выходе согласующего трансформатора. Это напряжение имеет практически синусоидальную форму, поскольку коэффициент искажения синусоидальности теперь составляет лишь 0,46 %.

В результате, введение рассматриваемой обратной связи по напряжению качественно практически не изменяет характера электромагнитных процессов в самом компенсированном выпрямительном агрегате. Об этом свидетельствуют полученные с помощью описанной модели временные диаграммы процессов (рис. 7) и спектральные характеристики напряжений на входе и выходе агрегата, а также напряжения конденсаторной батареи компенсирующего устройства (рис. 8). Указанные характеристики носят классический для компенсированных преобразователей с пятой и седьмой гармониками напряжения на конденсаторах характер [2–4].

Плавное и быстродействующее регулирование выпрямленного напряжения агрегата осуществляется либо изменением коэффициента модуляции выходного напряжения инвертора в пределах $0 \leq m \leq 1$, либо изменением фазы модулирующего напряжения от 0 до 180 эл. град, либо, наконец, комбинацией того и другого. Максимальную глубину регулирования выпрямленного напряжения задают соответствующим выбором коэффициента трансформации согласующего трансформатора с учетом инвертирования напряжения на вторичной обмотке этого трансформатора при переходе от одного предельного значения фазы модулирующего напряжения, равного 0 к другому предель-

ному значению, равному 180 эл. град. С учетом инвертирования величина регулирующего напряжения, а, следовательно, и установленная мощность инвертора и согласующего трансформатора выбираются исходя из половины требуемой глубины регулирования выпрямленного напряжения.

Проведенные исследования говорят о том, что компенсированный выпрямительный агрегат с обратной связью на основе АИН с ШИМ по сравнению с традиционными решениями обладает множеством важнейших свойств, обеспечивающих значительный энерго- и ресурсосберегающий эффект при полном удовлетворении требований как со стороны питающей сети, так и со стороны потребителя электрической энергии. Перечислим эти преимущества.

1. Выпрямительные агрегаты имеют простейшее конструктивное диодное исполнение.

2. Диодный агрегат приобретает свойство полной управляемости, обеспечивающей любые режимы работы потребителя, как при отклонении параметров нагрузки, так и при колебаниях напряжения питающей сети. Это достигается оптимальным местом включения и малой установленной мощностью современного внешнего регулирующего устройства.

3. Сохраняются все преимущества компенсированных преобразователей с пятой и седьмой гармониками напряжения на конденсаторах [1–4]:

– компенсирующее устройство за счет работы на частотах 250, 350 Гц имеет минимальную установленную мощность;

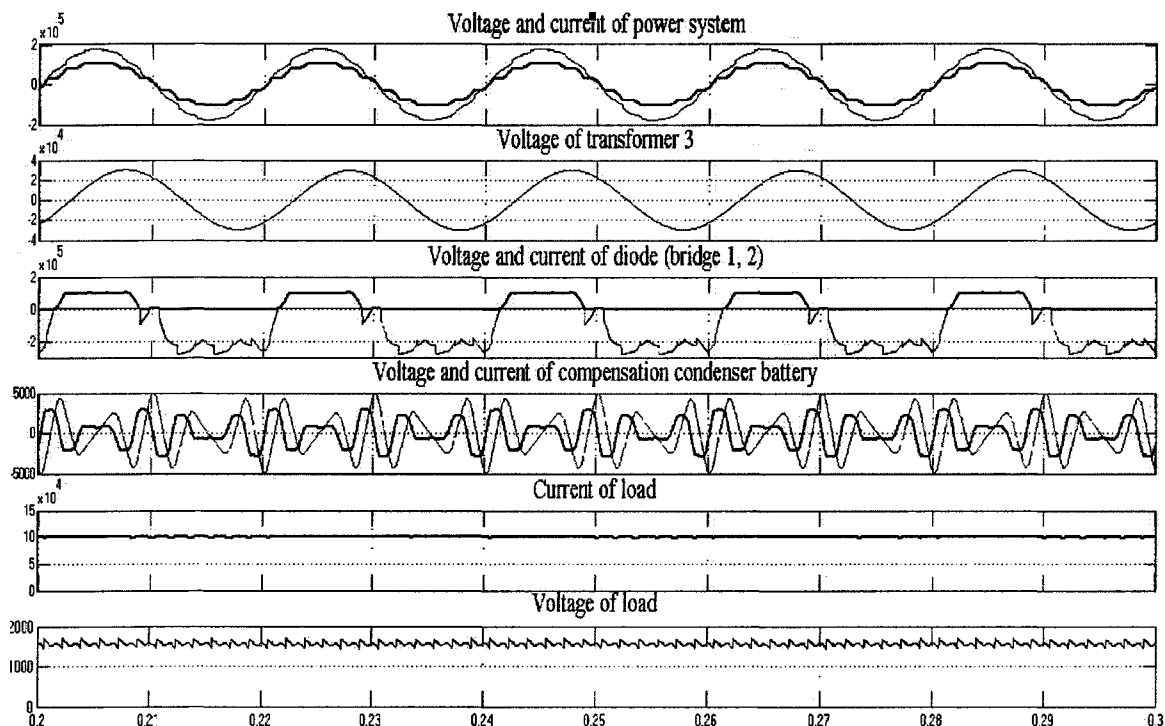


Рис. 7. Временные диаграммы электромагнитных процессов в компенсированном выпрямительном агрегате с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ

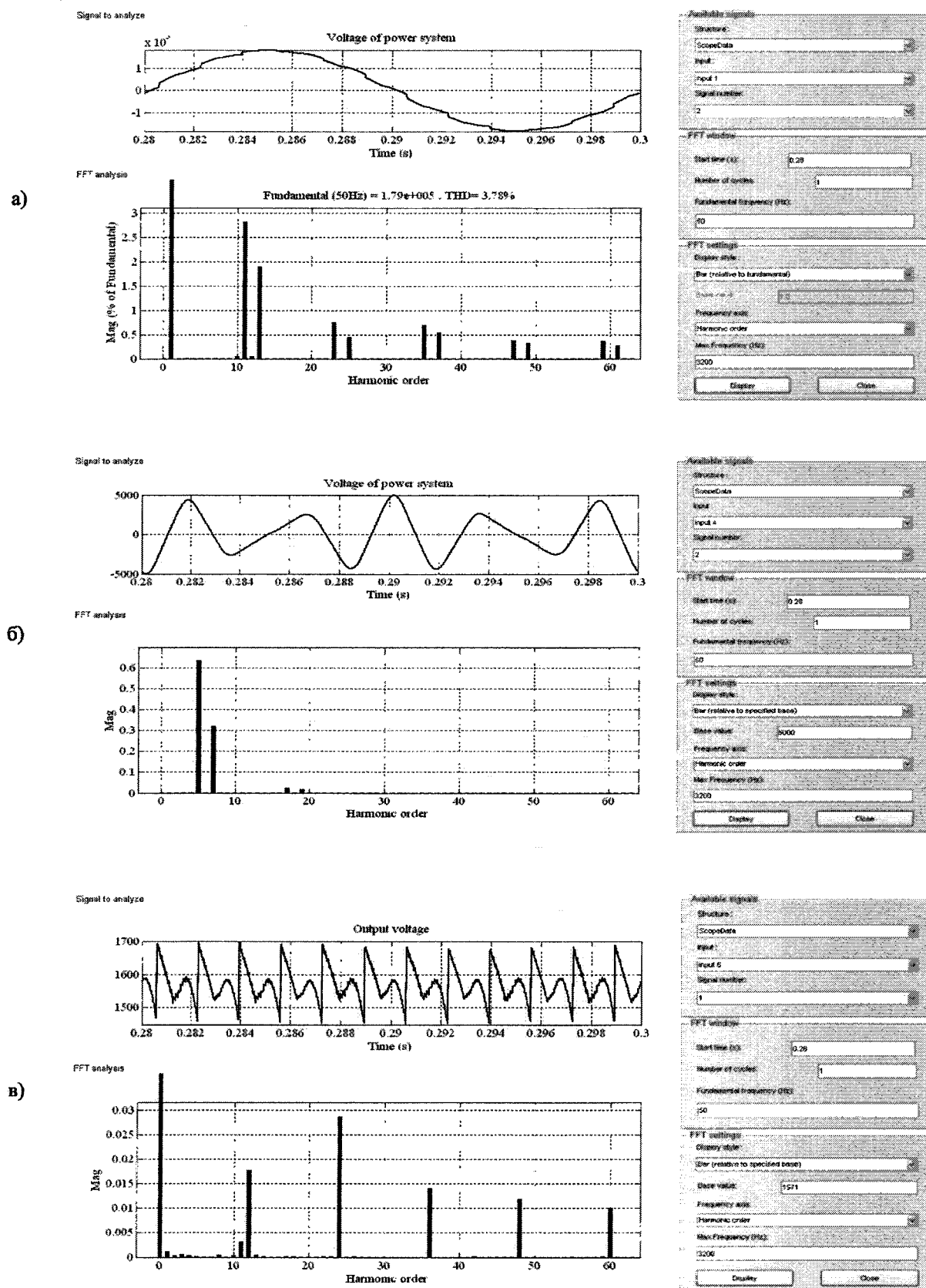


Рис. 8. Спектральные характеристики компенсированного выпрямителя с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ: а) напряжения питающей сети; б) напряжения на компенсирующей конденсаторной батарее; в) напряжения на выходе выпрямителя

– за счет компенсации реактивной мощности непосредственно в месте ее потребления на 4–5 % повышается жесткость внешних характеристик и выходная мощность выпрямительных агрегатов, что создает возможность на такую же величину повысить выходную мощность агрегата, обеспечивая значительных технологический эффект;

– за счет жесткого равномерного деления выпрямленного тока между параллельно работающими шестифазными блоками из схемы преобразователей исключаются устройства выравнивания токов блоков, увеличивается выходная мощность агрегатов по току и достигается дополнительный энерго- и ресурсосберегающий эффект при одновременном повышении качества электрической энергии в питающей сети;

– полная компенсация реактивной мощности существенно снижает потери электрической энергии в системе электроснабжения, а соответствующая фазность преобразования агрегатов сни-

мает проблему гармонического воздействия агрегатов на питающую сеть.

Литература

1. Хохлов, Ю.И. Энерго- и ресурсосберегающие преобразовательные системы электроснабжения электролизного производства алюминиевой промышленности / Ю.И. Хохлов // *Электрика*. – 2007. – № 3. – С. 3–9.

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

3. Хохлов, Ю.И. Компенсированные параметрические источники тока и их свойства / Ю.И. Хохлов // *Электричество*. – 2007. – № 3. – С. 26–31.

4. Хохлов, Ю.И. Применение компенсированных выпрямителей для питания тяговой нагрузки / Ю.И. Хохлов // *Электричество*. – 2008. – № 4. – С. 25–31.

Хохлов Юрий Иванович в 1966 году окончил Челябинский политехнический институт (ныне Южно-Уральский государственный университет) по специальности «Электрические станции». В 1991 году в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию. Декан энергетического факультета, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения», профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения.

Гиззатуллин Данил Валиуллинович в 2007 году окончил Южно-Уральский государственный университет по специальности «Электроснабжение». Аспирант кафедры «Системы электроснабжения». Направление научной деятельности – силовая электроника.

Осипов Алексей Германович в 2007 году окончил Южно-Уральский государственный университет по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов». Аспирант кафедры «Системы электроснабжения». Направление научной деятельности – силовая электроника.