

*На правах рукописи*

**Веприков Антон Андреевич**



**ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ  
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы  
и системы*

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2017**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

*Научный руководитель -  
доктор технических наук, профессор  
Абрамович Борис Николаевич*

*Официальные оппоненты:*

*Смоловик Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, ОАО «НТЦ ЕЭС» (Научно-технический центр Единой энергосистемы), отдел проектирования и развития энергосистем, заместитель заведующего отделом.*

*Борисов Павел Александрович – кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем, доцент.*

*Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».*

Защита состоится 7 февраля 2018 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 7 декабря 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ  
Иван Евгеньевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

В настоящее время в промышленности для питания потребителей широко используется постоянный ток, при этом наибольшая доля его потребления (до 60 %) приходится на предприятия металлургической отрасли. Так, потребляемая мощность электролизёров цветных и редкоземельных металлов колеблется от 2 до 1000 МВт, у электродуговых печей постоянного тока она достигает 80 МВт, привод прокатных станов требует до 16 МВт.

Для достижения высокой производительности электротехнологических установок и обеспечения их энергоэффективности требуется осуществлять управление активной мощностью потребителей постоянного тока с глубиной регулирования выпрямленного напряжения 80-100 % при точности стабилизации постоянного тока 0,1-0,2 % с быстродействием до нескольких секунд.

Однако использование широкоприменяемых в настоящее время управляемых выпрямительных агрегатов с системами точной стабилизации тока на основе дросселей и силовых тиристоров приводит к увеличению потребления реактивной мощности и росту искажений синусоидальности входного тока и напряжения в точке подключения преобразовательного комплекса к энергосети. Данные обстоятельства ведут к необходимости завышения установленной мощности силового электротехнического оборудования и повышению расходов на электроэнергию.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Вопросами повышения эффективности преобразовательных комплексов для электропитания промышленных потребителей постоянного тока большой мощности занимались учёные: Абрамович Б.Н., Бажин В.Ю., Борисов П.А., Галевский Г.В., Гельман М.В., Минцис Ю.Я., Никулин А.Д., Педро А.А., Сальников В.Г., Хохлов Ю.И., Храмин Т.Р., Heping X., Pandit P., Wiestner M. и др.

В то же время до конца не изучен вопрос применения активных преобразователей в составе электротехнических комплексов для питания промышленных установок постоянного тока большой мощности с целью снижения установленной мощности силового оборудования, синхронизации основных гармоник тока и напряжения в точке подклю-

ния к сети, повышения электромагнитной совместимости с сетью и коэффициента полезного действия (КПД). В этой связи отсутствуют научно обоснованные критерии структурирования преобразовательного комплекса и выбора параметров его элементов, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований по данному вопросу.

**Целью исследования** является выявление закономерностей процессов и характера изменения энергетических показателей электротехнического комплекса, осуществляющего электропитание промышленных потребителей постоянного тока большой мощности для научно обоснованного формирования его структуры и выбора параметров элементов, обеспечивающих минимизацию установленной мощности электротехнического оборудования и потребляемой электроэнергии.

**Идея исследования** заключается в использовании секций активных преобразователей для поддержания коэффициента мощности на входе электротехнического комплекса близким к единице при вариации параметров потребителя и повышения электромагнитной совместимости с сетью методом сдвига фаз несущих сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выпрямителей.

Для выполнения поставленной цели приняты следующие **задачи исследования:**

1. Провести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных исследований, проведённых ранее по рассматриваемой тематике. Выполнить аналитический обзор существующих преобразовательных комплексов для электропитания мощных промышленных установок постоянного тока и выявить возможность повышения эффективности их работы.
2. Обосновать секционированную структуру высокоэффективного электротехнического комплекса с активными преобразователями для питания мощных промышленных потребителей постоянного тока с уменьшенной мощностью трансформаторного оборудования и повышенным коэффициентом мощности.

3. Провести экспериментальные исследования электротехнического комплекса с активными преобразователями с целью оценки возможности совместной работы силовых ключей в составе блоков активных преобразователей в условиях параллельного включения большого числа преобразовательных блоков, при эффективном использовании полупроводниковых элементов по токовой нагрузке.

4. Разработать компьютерную модель преобразовательного комплекса, обеспечивающего синхронизацию фаз основных гармоник потребляемого тока и питающего напряжения в точке присоединения к энергосети независимо от отклонений амплитуды и частоты питающего напряжения при стабилизации и регулировке параметров нагрузки с возможностью реализации режимов стабилизации и модуляции тока.

5. Выявить способы повышения электромагнитной совместимости преобразовательного комплекса с сетью в пределах вариации технологических режимов потребителя с помощью сдвига фаз несущих сигналов ШИМ блоков активных преобразователей в составе электротехнического комплекса. Получить зависимость показателей качества электроэнергии от числа преобразователей и КПД преобразовательного комплекса от частоты несущего сигнала ШИМ.

#### **Научная новизна исследования**

Выявлены закономерности, позволяющие обосновать структуру и параметры электротехнического комплекса с активными преобразователями для электропитания промышленных установок постоянного тока большой мощности, в котором достигается минимизация потребления реактивной мощности, установленной мощности электрооборудования и обеспечиваются условия эффективной параллельной работы силовых ключей и преобразовательных блоков.

На основе анализа электромагнитных процессов в элементах преобразовательного комплекса, разработана структура системы управления, выполняющей синхронизацию фаз основных гармоник тока и напряжения и снижающей их несинусоидальность в точке подключения к энергосети независимо от отклонений амплитуды и частоты сетевого напряжения и технологических режимов нагрузки.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Предложена структура и установлены параметры высокоэффективного электротехнического комплекса с активными преобразователями для электропитания мощных промышленных потребителей постоянного тока.

2. Экспериментально подтверждена возможность реализации энергоэффективных электротехнических комплексов промышленных потребителей мощностью до 0,5 МВА при параллельной работе блоков активных преобразователей и силовых ключей.

3. Реализована система управления электротехническим комплексом, позволяющая осуществить эффективное регулирование энергопотребления промышленных потребителей постоянного тока большой мощности, с целью снижения платы за электроэнергию путём снижения потребляемой мощности в часы максимума.

4. Предложенные в диссертации рекомендации по разработке электротехнических комплексов для электропитания промышленных установок постоянного тока были использованы при модернизации преобразовательного комплекса, питающего вакуумные дуговые печи на заводе технологического литья ОАО «Технолит». Получен акт внедрения основных результатов работы.

### **Методология и методы исследования:**

Методологической и теоретической основой диссертации являются методы теории электрических цепей, теории систем электроснабжения, теории автоматического управления, теории преобразовательной техники, теории силовой электроники, методы гармонического анализа.

Для решения поставленных в диссертационной работе задач применялись численные методы решения уравнений с использованием MathCAD, математическое и компьютерное моделирование в среде Matlab Simulink.

При выполнении работы проведены экспериментальные исследования электротехнического комплекса промышленного потребителя постоянного тока большой мощности, в ходе которых производились измерения параметров электроэнергии с использованием сертифицированных приборов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Формирование структуры электротехнического комплекса для питания потребителей постоянного тока следует проводить на основании эквивалентности полной потребляемой мощности с учётом КПД и коэффициента мощности, произведению выходной мощности единичных модулей на их число, количество секций и преобразователей в секции, с учётом дисбаланса токовых нагрузок силовых ключей, вносимого разбросом параметров силовых и управляющих контуров параллельно соединённых модулей, при условии минимизации установленной мощности силового электрооборудования.

2. Минимизация потребления электрической энергии и реактивной мощности из сети переменного тока достигается синхронизацией фаз основных гармоник сетевого напряжения и тока, а снижение искажений их формы – рассинхронизацией коммутационных процессов блоков активных выпрямителей с ШИМ, причём величина сдвига фаз несущих частот определяется количеством блоков и быстродействием системы управления электротехническим комплексом.

### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных в работе, подтверждается известными теориями преобразовательной техники и силовой электроники, методами математического моделирования и гармонического анализа, а также сходимостью теоретических и экспериментальных исследований с погрешностью не более 10 %.

Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на II международном научно-техническом семинаре «Современные разработки в области электропитания и электропривода» (Санкт-Петербург, СПбГУ, 2016 г.), VI научной конференции молодёжного инновационного центра ПАО «Ленэнерго» (Санкт-Петербург, ОАО «Ленэнерго», 2016 г.), III международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, СПбГУ, 2016 г.).

### **Данные о публикациях автора**

По теме диссертации в рецензируемых научных изданиях опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 из них в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

**Личный вклад соискателя** состоит во включенном участии на всех этапах исследования, непосредственном участии в получении и обработке экспериментальных данных, личном участии в апробации результатов исследования. Соискателем установлено, что преобразовательные комплексы с активными выпрямителями для питания промышленных нагрузок постоянного тока позволяют осуществить эффективное преобразование переменного тока в постоянный при коэффициенте мощности потребляемой из сети энергии близком к единице, и снижении установленной мощности силового трансформаторного электрооборудования без уменьшения диапазона регулирования выпрямленного напряжения. Автором разработана компьютерная модель, позволяющая оценить электромагнитную совместимость преобразовательного комплекса, включающего активные выпрямители, с сетью при рассинхронизации фаз их несущих сигналов ШИМ. Экспериментально доказана эффективная работа и высокий коэффициент мощности (0,95-0,98) системы электроснабжения, содержащей 90 блоков активных преобразователей на IGBT ключах, при питании электрической дуги постоянного тока мощностью 0,5 МВт с диапазоном регулирования тока 3-100 %.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы из 102 наименований. Работа изложена на 133 страницах, содержит 58 рисунков и 8 таблиц.

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования.

**В первой главе** рассмотрены научно-технические проблемы повышения эффективности существующих электротехнических комплексов для питания мощных промышленных потребителей постоянного тока. Обоснована необходимость использования активных преоб-

разователей для повышения эффективности использования электрооборудования и снижения потребления электроэнергии.

**Во второй главе** проводится анализ параллельной работы силовых ключей в составе преобразователей и активных преобразователей различных топологий. Выявлена зависимость повышения мощности трансформаторного оборудования от типа и диапазона регулирования устройств РПН.

**В третьей главе** разработана структура секционированного электротехнического комплекса с активными преобразователями и методика выбора параметров элементов электротехнического комплекса. Приведены результаты экспериментальных исследований преобразовательных комплексов для питания вакуумной дуговой печи постоянного тока мощностью 0,5 МВт и оценивается их коэффициент полезного действия.

**В четвёртой главе** разработана система управления преобразовательным комплексом, обеспечивающая синхронизацию фаз основных гармоник сетевого напряжения и потребляемого тока в точке присоединения к энергосети для коррекции коэффициента мощности электротехнического комплекса. Установлена зависимость коэффициентов суммарных гармонических искажений напряжения и тока от количества активных выпрямителей с фазовым сдвигом несущих сигналов ШИМ.

**Заключение** отображает обобщенные выводы по результатам исследований, исходя из поставленной цели и задач диссертационной работы.

**По результатам выполненных исследований на защиту выносятся следующие положения:**

*1. Формирование структуры электротехнического комплекса для питания потребителей постоянного тока следует проводить на основании эквивалентности полной потребляемой мощности с учётом КПД и коэффициента мощности, производству выходной мощности единичных модулей на их число, количество секций и преобразователей в секции, с учётом дисбаланса токовых нагрузок силовых ключей, вносимого разбросом параметров силовых и управляющих контуров параллельно соединённых модулей, при*

**условии минимизации установленной мощности силового электрооборудования.**

Уменьшение установленной мощности силового оборудования, и снижение потребления электроэнергии достигается повышением коэффициента мощности преобразовательного комплекса, путём включения в его состав активных полупроводниковых преобразователей. Разработанный в диссертации электротехнический комплекс состоит из силовых трансформаторов (СТ), преобразовательных трансформаторов (ПТ) и блоков активных преобразователей (БАП) в состав которых входят модули (М) силовых ключей. Электроснабжение на рисунке осуществляется от двух взаимно-резервируемых линий (Л1 и Л2).

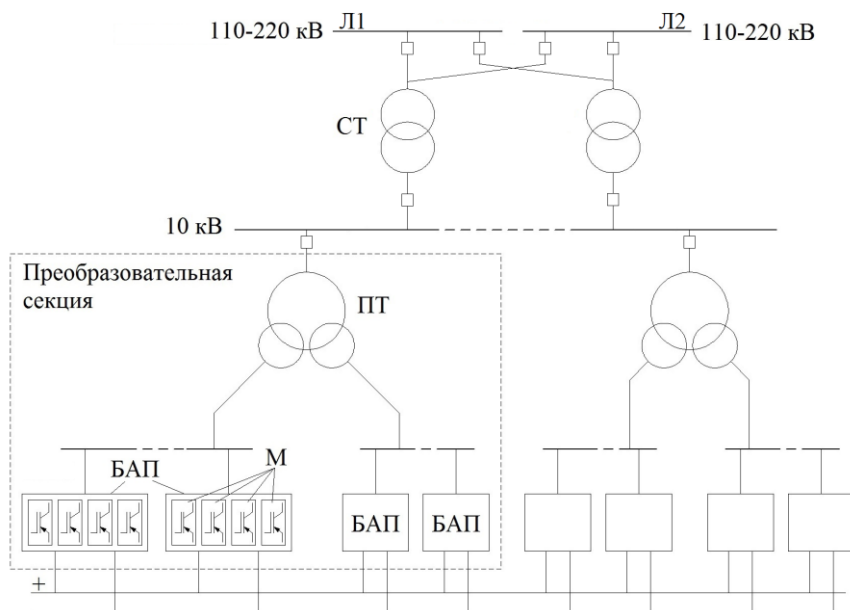


Рисунок 1 – Сетевая топология системы электроснабжения мощных промышленных нагрузок постоянного тока с активными преобразователями

Число элементов, входящих в структуру секционированного электротехнического комплекса с активными преобразователями (рисунок 1) определяется, на основе следующего выражения:

$$P_m M k_3 p_s s_p = S \chi_c \eta_c, \quad (1)$$

где  $P_m$  – максимальная выходная активная мощность модуля полупроводниковых ключей, кВт;  $M$  – количество параллельных модулей в одном активном преобразователе;  $k_3$  – коэффициент загрузки по току параллельного соединения модулей;  $p_s$  – число преобразователей в секции;  $s_p$  – число преобразовательных секций;  $S$  – полная мощность, потребляемая из сети, кВА;  $\chi_c$  и  $\eta_c$  – коэффициент мощности и коэффициент полезного действия (КПД) электротехнического комплекса. При расчёте принято, что преобразовательный комплекс работает в режиме максимальной мощности.

При параллельной работе силовых ключей особое внимание уделяется потерям напряжения в открытом состоянии, регулировочным характеристикам (зависимости тока силового контура от напряжения на управляющем электроде и температуры полупроводника), импедансу соединительных элементов и внешним характеристикам драйвера. Драйвер силового ключа представляет собой электронное устройство, обеспечивающее преобразование сигналов управления в вид, пригодный для непосредственного воздействия на ключевой элемент.

Помимо модулей полупроводниковых ключей в состав преобразовательных блоков входят элементы входных и выходных силовых фильтров, драйвер, датчики токов, напряжений и температур. С целью уменьшить число этих элементов для минимизации затрат и габаритных размеров электротехнического комплекса количество модулей в преобразователях стремятся максимизировать. Однако увеличение длины управляющих каналов приводит к рассинхронизации коммутационных процессов в ключах параллельного соединения и перегрузке отдельных силовых элементов, что ограничивает количество модулей в составе одного преобразователя.

В силу указанных причин номинальный ток преобразователя снижается на некоторую величину, определяемую коэффициентом запаса по току  $k_3$ . Для наихудшего варианта, когда перегружен только один элемент, зависимость  $k_3$  от  $M$  характеризуется выражением:

$$k_3 = \frac{(1 - k_{дб})M + 2k_{дб}}{(1 + k_{дб})M}, \quad (2)$$

$$k_{дб} = \left( \frac{I_{пер}}{I_{ср}} - 1 \right), \quad (3)$$

где  $k_{дб}$  – коэффициент токового дисбаланса;  $I_{пер}$  – ток перегруженного ключа, А;  $I_{ср}$  – средний ток ключа в параллельном соединении, А.

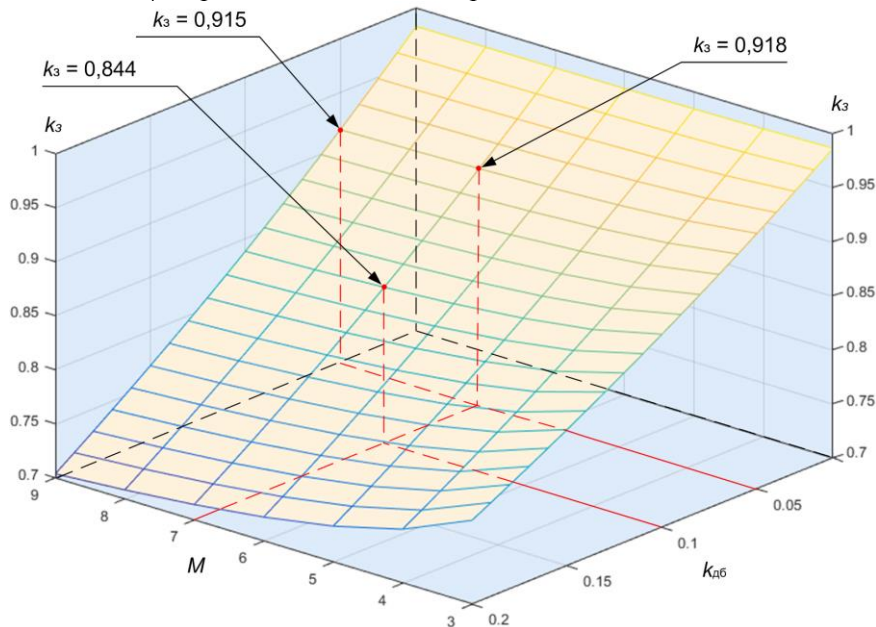


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента запаса по току от количества модулей и коэффициента токового дисбаланса

Соотношение токов в параллельных ключах выражается коэффициентом токового дисбаланса  $k_{дб}$ , который определяется отклонениями тока от расчетных значений. Для современных сборок параллельных модулей коэффициент токового дисбаланса находится в пределах 5-20 %, однако сопротивление мощных ключей увеличивается с ростом

температуры, что приводит к автоматической балансировке и уменьшает коэффициент дисбаланса.

Число преобразователей в секции зависит от мощности преобразовательного трансформатора и единичного преобразователя:

$$P_s = \frac{S_{пт} \chi_{ап}}{P_M M k_3}, \quad (4)$$

где  $S_{пт}$  – полная мощность преобразовательного трансформатора, кВА;  $\chi_{ап}$  – коэффициент мощности активного преобразователя.

Число секций определяется величиной номинального тока одного модуля силовых ключей  $I_M$  и номинальным током нагрузки  $I_n$ :

$$s_p = \frac{I_n}{I_M M k_3 P_s} + N_d, \quad (5)$$

где  $N_d$  – число дополнительных секций. Дополнительные секции вводятся с учётом того, что преобразовательный комплекс должен обеспечивать номинальный ток нагрузки даже в случае аварийных ситуаций в отдельных секциях.

Для проверки возможности эффективной параллельной работы большого числа активных преобразователей проводились физические эксперименты на электротехническом комплексе для питания дуговой вакуумной печи 833Д с номинальной мощностью  $P_n = 0,5$  МВт. Структурная схема и внешний вид комплекса с активными преобразователями изображены на рисунке 3. Активная часть преобразовательного блока СМ 40×200 выполнена по схеме инвертора на IGBT, принципиальная схема силовой части представлена на рисунке 4, технические характеристики приведены в таблице 1.

Представленный электротехнический комплекс с 90 преобразовательными блоками позволил осуществить плавное регулирование постоянного тока нагрузки  $I_n$  в диапазоне от 450 А до 13,5 кА путём изменения коэффициента модуляции инверторных преобразователей при межэлектродном напряжении 35-40 В. Максимальный ток при использовании параметрического источника до модернизации составлял 9,3 кА без возможности точного регулирования. Увеличение рабочего тока позволило сократить время плавки на  $\Delta t = 20-30$  %.

Таблица 1 – Паспортные данные преобразователя СМ 40×200

Наименование параметра	Значение
Ток $I_M$ при $T_{\text{окр. ср.}} = 40^\circ\text{C}$ и $P_n = 100\%$ , не менее	180 А (8,1 кВт)
Диапазон регулировки тока, $\Delta I_M$	(5÷180) А
Напряжение на выходе, $U_M$	45 В
Диапазон линейного напряжения питания от трёхфазной сети, $U_L$	380 В $\pm 15\%$
Потребляемая из сети полная мощность $S_{\text{ап}}$ , при максимальной выходной мощности, не более	8,6 кВА

В ходе эксперимента измерялась потребляемая мощность и параметры качества электрической энергии в точке подключения преобразовательной установки к питающему трансформатору. В результате выявлено, что коэффициент мощности электротехнического комплекса с активными преобразователями находился в пределах 0,95-0,98 (до модернизации 0,85-0,95) на протяжении всего времени работы дуговой печи. Осциллограмма питающего напряжения фазы В ( $U_L = 380$  В) и потребляемого тока при токе нагрузки 12 кА представлена на рисунке 5, суммарный коэффициент гармонических искажений фазного напряжения равен  $k_{THD-U} = 6,1\%$ , а тока  $k_{THD-I} = 31,5\%$ . КПД электротехнического комплекса составил  $\eta_{\text{с.ап}} = 77\%$  (КПД параметрического источника тока до реконструкции не превышал  $\eta_{\text{с.пит}} = 69\%$ ).

В эксплуатируемых электротехнических комплексах регулирование выпрямленного напряжения при изменении режима работы нагрузки и отклонений напряжения питающей сети осуществляется с использованием устройств РПН, что приводит к увеличению установленной мощности и массогабаритных показателей трансформаторного оборудования. В электротехнических комплексах с активными преобразователями обеспечение требуемого диапазона напряжения нагрузки осуществляется изменением коэффициента модуляции. Выявлено, что при наличии запаса мощности в активных преобразователях, достаточного для поддержания напряжения нагрузки при отрицательных отклонениях напряжения энергосети, возможен отказ от устройств РПН, что снизит установленную мощность трансформаторного оборудования на 20-40 %.

*2. Минимизация потребления электрической энергии и реактивной мощности из сети переменного тока достигается синхронизацией фаз основных гармоник сетевого напряжения и тока, а снижение искажений их формы – рассинхронизацией коммутационных процессов блоков активных выпрямителей с ШИМ, причём величина сдвига фаз несущих частот определяется количеством блоков и быстродействием системы управления электротехническим комплексом.*

В диссертационной работе рассматривалось три типа активных преобразователей:

- трёхступенчатый преобразователь с автономным инвертором (для низкого и среднего класса мощности);
- повышающий активный выпрямитель (активный выпрямитель напряжения);
- понижающий активный выпрямитель (активный выпрямитель тока).

Применение блоков активных преобразователей с автономным инвертором позволяет регулировать величину постоянного напряжения на нагрузке при поддержании коэффициента мощности преобразователей в пределах 0,95-0,98 без возможности компенсации потребляемой из сети реактивной мощности и снижения уровня гармонических искажений. Коэффициент мощности системы электроснабжения в этом случае определяется как:

$$\chi_c = \frac{P_n}{\sqrt{\eta_c^2 (s_p Q_{пт} + Q_{ст} + Q_{ш})^2 + P_n^2}} k_n k_{\text{н}}, \quad (6)$$

где  $Q_{ст}$  – потребляемая реактивная мощность силового трансформатора, кВар;  $Q_{пт}$  – потребляемая реактивная мощность преобразовательных трансформаторов, кВар;  $Q_{ш}$  – реактивная мощность, обусловленная индуктивностью проводящих шин, кВар;  $P_n$  – мощность нагрузки, кВт;  $k_n$  – коэффициент искажений;  $k_{\text{н}}$  – коэффициент несимметрии. Согласно статистическим данным на промышленных предприятиях отрасли цветной металлургии в 95% случаев коэффициент несимметрии питающего напряжения находится в пределах 0,2-1,8 %.

Преобразовательные блоки на основе активных выпрямителей выполняют коррекцию коэффициента мощности электротехнического комплекса, путём реализации режима опережающего тока для компенсации реактивной мощности, потребляемой силовыми индуктивными элементами системы электроснабжения. Синхронизация основных гармоник тока и напряжения в точке общего присоединения достигается управлением коэффициентом сдвига  $k_{c\_ав}$  между основными гармониками тока и напряжения на входе активного выпрямителя, его величина определяется формулой:

$$k_{c\_ав} = \frac{S \eta_{ст} \eta_{пт}}{\sqrt{p_s^2 s_p^2 (s_p Q_{пт} + Q_{ст} + Q_{ш})^2 + S^2 \eta_{ст}^2 \eta_{пт}^2}}, \quad (7)$$

где  $\eta_{ст}$  и  $\eta_{пт}$  – КПД силового и преобразовательных трансформаторов соответственно, отн.ед.

Доказано, что независимо от типа блоков активных преобразователей предложенный электротехнический комплекс позволяет реализовать режимы стабилизации и модуляции тока нагрузки с целью снижения электропотребления в часы максимума без увеличения потребления реактивной мощности.

Для оценки электромагнитной совместимости разработанного преобразовательного комплекса с сетью, проанализировано влияние группы активных преобразователей на уровень гармонических искажений в точке общего присоединения системы электроснабжения. При использовании блоков на основе активных выпрямителей рассинхронизация коммутационных процессов обеспечивается путём сдвига фаз несущих частот ШИМ относительно друг друга. Начальная фаза  $\varphi_{pwm}$  несущего сигнала ШИМ для каждого активного выпрямителя задаётся как:

$$\varphi_{pwm\_i} = \frac{(i_p - 1)}{p_s s_p f_{pwm}}, \quad (8)$$

где  $i_p$  – номер преобразователя,  $i_p \in \{1; 2; \dots; p_s \cdot s_p\}$ ,  $f_{pwm}$  – несущая частота ШИМ, Гц;  $p$  – общее количество активных преобразователей в системе электроснабжения.

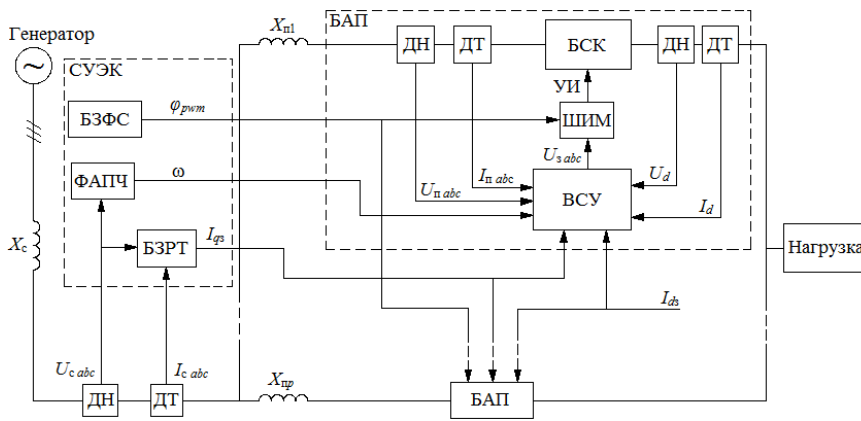


Рисунок 6 – Структурная модель электротехнического комплекса

Структурная схема преобразовательного комплекса с активными выпрямителями приведена на рисунке 6. Система управления электротехническим комплексом (СУЭК), включает в себя: БЗРТ – блок задания реактивного тока  $I_{q3}$  активных выпрямителей, ФАПЧ – блок фазовой автоподстройки частоты, БЗФС – блок задания фазового сдвига  $\varphi_{pwm}$  для генераторов ШИМ. ВСУ – векторная система управления активным выпрямителем. БСК – блок силовых ключей,  $X_c$  – индуктивное сопротивление сети от источника питания до исследуемой точки,  $X_{ni}$  – индуктивное сопротивление от исследуемой точки до  $i$ -го активного преобразователя.

Компьютерная модель активного понижающего выпрямителя в составе электротехнического комплекса в среде Matlab Simulink, позволяющая оценить энергетические показатели и параметры качества электроэнергии на входе преобразователя, приведена на рисунке 7. Модель преобразовательного комплекса (рисунок 8) включает совокупность активных понижающих выпрямителей и систему управления электротехническим комплексом для задания реактивных токов и начальной фазы несущего сигнала ШИМ отдельных выпрямителей. Полученные с её помощью осциллограммы тока и напряжения в точке присоединения электротехнического комплекса к электросети приведены на рисунке 9.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработаны рекомендации по выбору параметров секционированного электротехнического комплекса для электропитания мощных потребителей постоянного тока, обеспечивающего входной коэффициент мощности 0,95-0,98, независимо от режима работы нагрузки. Показано, что число модулей полностью управляемых силовых ключей в составе электротехнического комплекса определяется максимальной активной мощностью нагрузки с учётом дисбаланса распределения токов между параллельно включенными полупроводниковыми элементами.

2. Доказано, что применение активных преобразователей в электротехнических комплексах большой мощности обеспечивает минимизацию потребления реактивной мощности при стабилизации тока нагрузки с точностью, заданной по условиям технологического процесса, или осуществления режима модуляции тока для уменьшения платы за электроэнергию с учётом суточных графиков энергопотребления.

3. На примере электротехнического комплекса, обеспечивающего электропитание вакуумной дуговой печи мощностью  $P_n = 0,5$  МВт, экспериментально подтверждена возможность параллельной работы в составе системы электроснабжения более 90 блоков активных преобразователей. Установлено, что при замене параметрического источника тока с диодным выпрямителем на блоки, обеспечивающие активное преобразование параметров потребляемой электроэнергии, коэффициент мощности преобразовательного комплекса увеличился с  $\chi_{лит} = 0,85-0,95$  до  $\chi_{ап} = 0,95-0,98$ , максимальный ток дуги повысился на  $\Delta I_{max} = 24$  %, КПД преобразовательного комплекса – на  $\Delta \eta = 8$  %, а время плавок сократилось на  $\Delta t = 20-30$  %.

4. Установлено, что использование активных преобразователей для минимизации реактивной мощности, мощности искажений и обеспечения требуемой глубины регулирования напряжения нагрузки  $\Delta U = 80-100$  % позволит снизить установленную мощность трансформаторного оборудования на 20-40 % за счёт отказа от устройств РПН.

5. Разработана компьютерная модель преобразовательного комплекса в среде Matlab Simulink, в системе управления которым содер-

жаты блоки фазовой автоподстройки частоты и задания реактивного тока для сдвига основных гармонических тока и напряжения на входе выпрямителей для поддержания коэффициента мощности электротехнического комплекса.

б. В результате исследований с использованием компьютерной модели электротехнического комплекса с активными выпрямителями тока со смещёнными фазами несущих частот ШИМ в среде Matlab Simulink выявлена зависимость коэффициентов суммарных гармонических искажений напряжения и тока в точке подключения к энергосети от числа преобразователей и частоты несущего сигнала. Показано, что количество блоков активных преобразователей в составе электротехнического комплекса ограничено быстродействием общей системы управления.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

**1. Веприков А.А. Повышение эффективности электротехнических преобразовательных комплексов для добычи и переработки полезных ископаемых / Б.Н. Абрамович, А.А. Веприков, Ю.А. Сычёв // Горное оборудование и электромеханика, №1, Москва. – 2017. – С. 7-12.**

**2. Веприков А.А. Высокоэффективные системы электроснабжения мощных промышленных потребителей постоянного тока / В.В. Полищук, А.А. Веприков // Естественные и технические науки, №6, Москва. – 2017. – С. 126-130.**

*В изданиях, цитируемых в БД Scopus:*

**3. Веприков А.А. Повышение эффективности электротехнических преобразовательных комплексов для питания электролизёров алюминия / Б.Н. Абрамович, А.А. Веприков, Ю.А. Сычёв, К.А. Хомяков // Цветные металлы, №10, Москва. – 2016. – С. 49-53.**

*В других изданиях:*

**4. Веприков А.А. Проблемы повышения качества электроэнергии в питающих сетях предприятий с мощными нагрузками постоянного тока / А.А. Веприков // Материалы 16 Международной конференции студентов и аспирантов горных ВУЗов: Сб. науч. тр. –**

Санкт-Петербург, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2013. – С. 142-146.

5. Веприков А.А. Повышение качества электроэнергии в сетях алюминиевых заводов с электролизным производством // Материалы Научного форума с международным участием «43-я неделя науки СПбПУ»: Сб. науч. тр. – Санкт-Петербург, СПбПУ, 2014. – С. 73-75.

6. Веприков А.А. Управление качеством электроэнергии на предприятиях цветной металлургии с электролизёрами // Материалы международной научно-практической конференции «Энергоэффективность и энергосбережение»: Сб. науч. тр. – Санкт-Петербург, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. – С. 157-158.

7. Веприков А.А. Управление качеством электроэнергии в сетях горных предприятий с выпрямителями большой мощности // Материалы 12 Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых»: Сб. науч. тр. – Москва, ИПКОН РАН, 2015. – С. 44-46.

8. Веприков А.А. Повышение качества электроэнергии электротехнических комплексов со звеном постоянного тока // Материалы VIII Международной межвузовской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о земле»: Сб. науч. тр. – Москва, МГРИ, 2016. – С. 88-91.

9. Веприков А.А. Повышение качества электроэнергии в сетях горных предприятий с управляемыми выпрямителями // Материалы VI научной конференции молодёжного инновационного центра ПАО «Ленэнерго»: Сб. науч. тр. – Санкт-Петербург, ПАО «Ленэнерго», 2016. – С. 155-163.

10. Веприков А.А. Повышение качества электроэнергии в сетях горных предприятий с управляемыми выпрямительными комплексами // Материалы 2-й Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр»: Сб. науч. тр. – Москва, ИПКОН РАН, 2016. – С. 145-148.

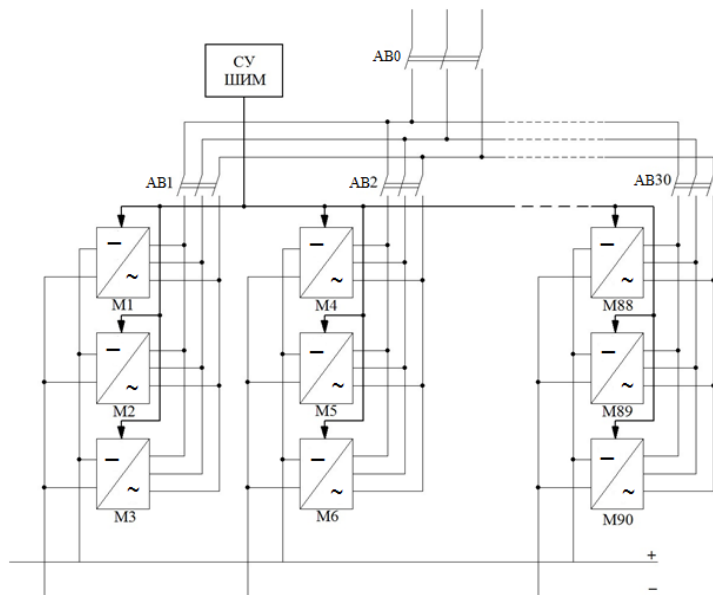


Рисунок 3 – Структурная схема и общий вид электротехнического комплекса с активными преобразователями на IGBT для питания вакуумной печи

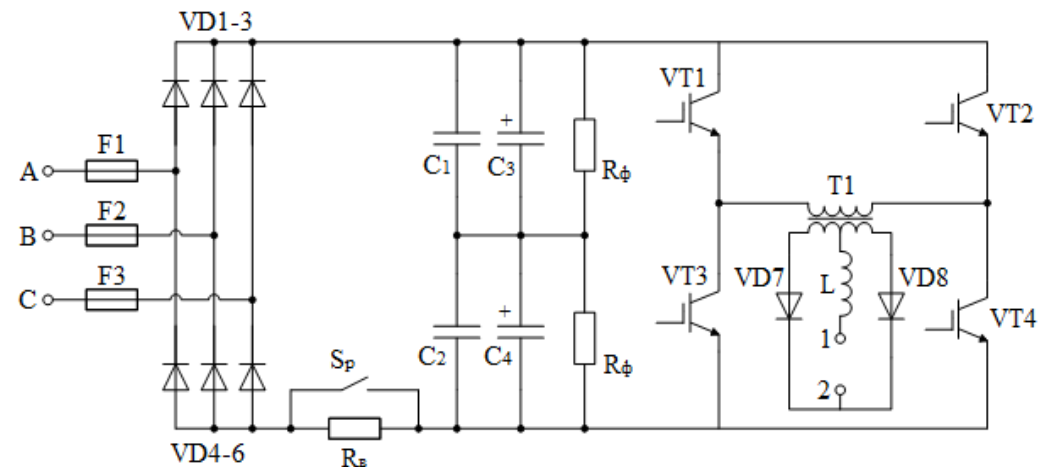


Рисунок 4 – Принципиальная схема силовой части активного преобразователя инверторного типа

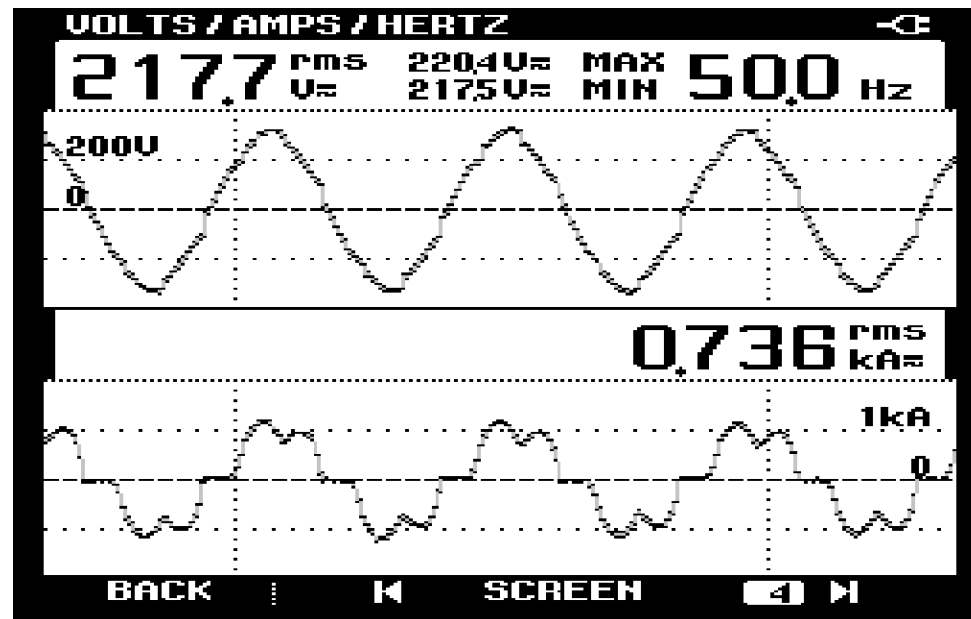
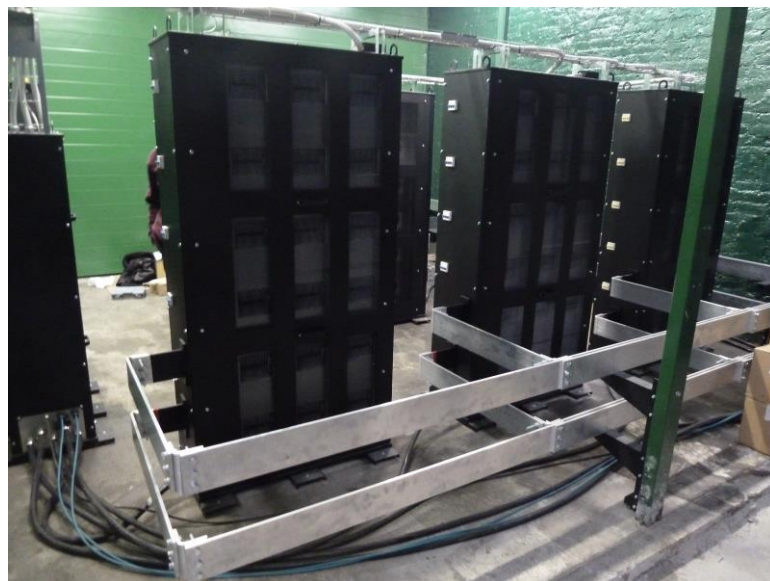


Рисунок 5 – Сетевое напряжение и потребляемый ток модернизированного комплекса при номинальном режиме работы

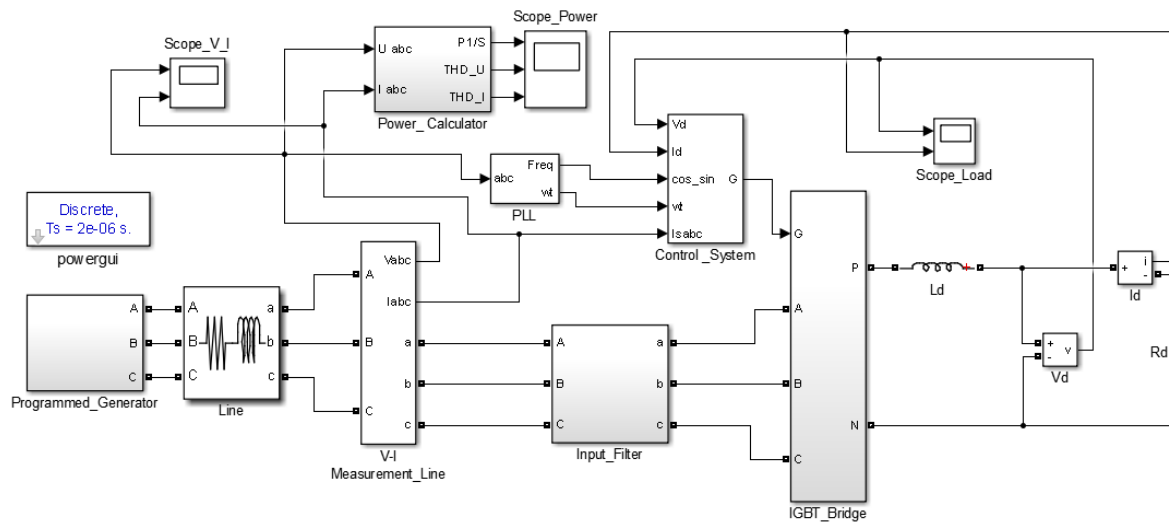


Рисунок 7 – Компьютерная модель активного выпрямителя тока на номинальную мощность 1,5 МВт

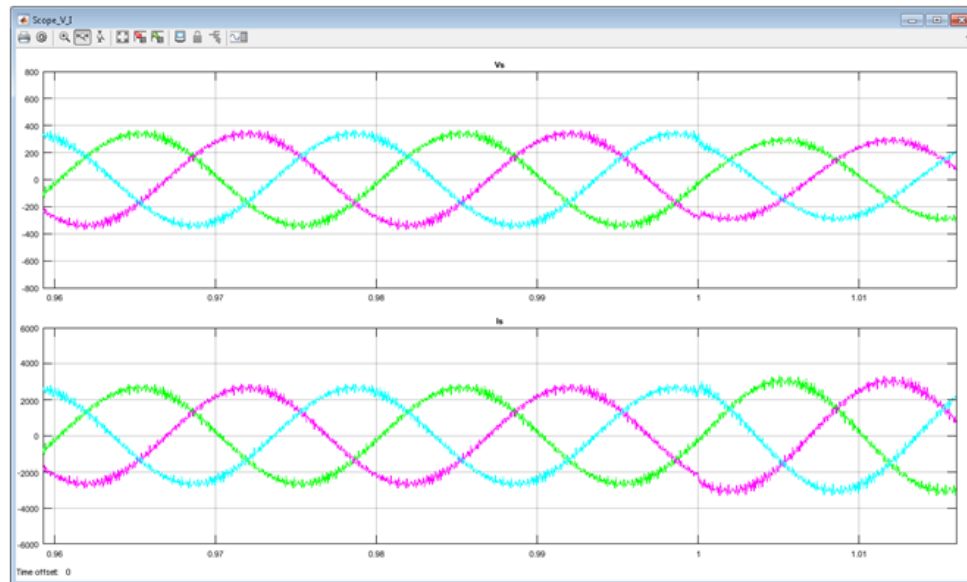


Рисунок 9 – Входные напряжения и токи преобразовательного комплекса при номинальной нагрузке

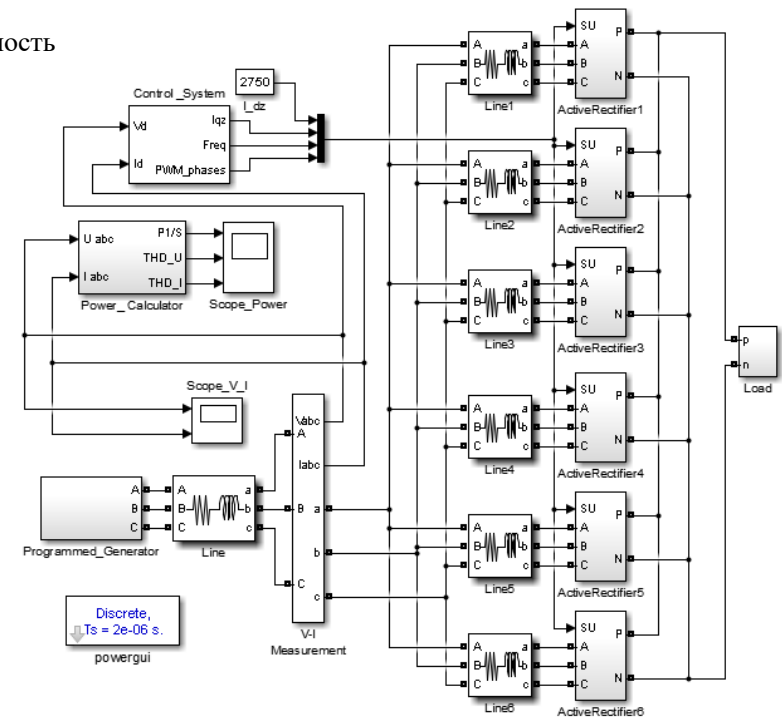


Рисунок 8 – Компьютерная модель преобразовательного комплекса с шестью параллельными активными выпрямителями со смещением несущих сигналов ШИМ