

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.632

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ДИЗАЙНА КОМПЕНСИРОВАННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

*Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, С.Г. Шабиев
г. Челябинск, ЮУрГУ*

CALCULATION PROCEDURE AND DESIGN BASIS OF A COMPENSATED RECTIFIER PLANT FOR A POWER SUPPLY SYSTEM OF A BORING INSTALLATION OF AN OIL AND GAS EXTRACTION COMPLEX

*Y.I. Khokhlov, M.Y. Fyodorova, S.G. Shabiyev
Chelyabinsk, SUSU*

Рассмотрена методика инженерного расчета и сформулированы направления дизайна оборудования компенсированного выпрямительного агрегата для системы электроснабжения буровой установки.

Ключевые слова: *компенсированный выпрямительный агрегат, буровая установка, система электроснабжения.*

In this article procedure of an engineering calculation is considered and trends of a design of a compensated rectifier plant for a power supply system of a boring installation are formulated.

Keywords: *compensated rectifier plant, boring plant, power supply system.*

В работах [1–3] с целью повышения энергоэффективности основных технологических процессов предложено использовать компенсированные преобразовательные системы электроснабжения (СЭС) буровых установок. Для промышленного освоения первых компенсированных СЭС нефтегазодобывающего комплекса возникла необходимость разработки методики инженерного расчета всех характеристик компенсированного выпрямительного агрегата (КВА) системы. Такая методика, с одной стороны, позволяет рассчитать параметры, спроектировать основное оборудование агрегата и на основе этого разработать дизайн как самого КВА, так и всей СЭС буровой установки, а с другой стороны, определить основные энергетические показатели СЭС, напрямую связанные с проблемами качества электроэнергии и энергосбережения.

Проиллюстрируем методику на примере перевода одного из вариантов некомпенсированной СЭС [4] в компенсированный режим работы по схеме, представленной на рис. 1.

Рассматривается широко распространенная буровая установка БУ-4200/250 ЭК-БМ (Ч), пред-

назначенная для бурения газовых и нефтяных скважин с условной глубиной бурения до 4200 м. Электроснабжение буровой установки осуществляется от питающей сети напряжением 35 кВ через промежуточную подстанцию переменного тока 35/6 кВ с трансформатором Т1 и последующую воздушную одноцепную линию с напряжением 6 кВ. К распределительному устройству переменного тока с напряжением 6 кВ посредством двенадцатифазного КВА с трехобмоточным трансформатором Т2, компенсирующим устройством КУ и диодными выпрямительными мостами ВМ1 и ВМ2 подключено распределительное устройство постоянного тока 3. Мосты ВМ1 и ВМ2 могут соединяться как последовательно, так и параллельно. От шин постоянного тока 3 через автономные инверторы напряжения 4–7 питаются двигатели буровых насосов МН1 и МН2, двигатели цементировочных насосов МЦН1 и МЦН2, двигатель буровой лебедки МЛ, двигатель роторного ствола МР и двигатель верхнего привода МВП. Кроме того, к шинам постоянного тока 3 через тиристорные ключи 8 и 9 подключаются тормозные резисторы 10 и 11.

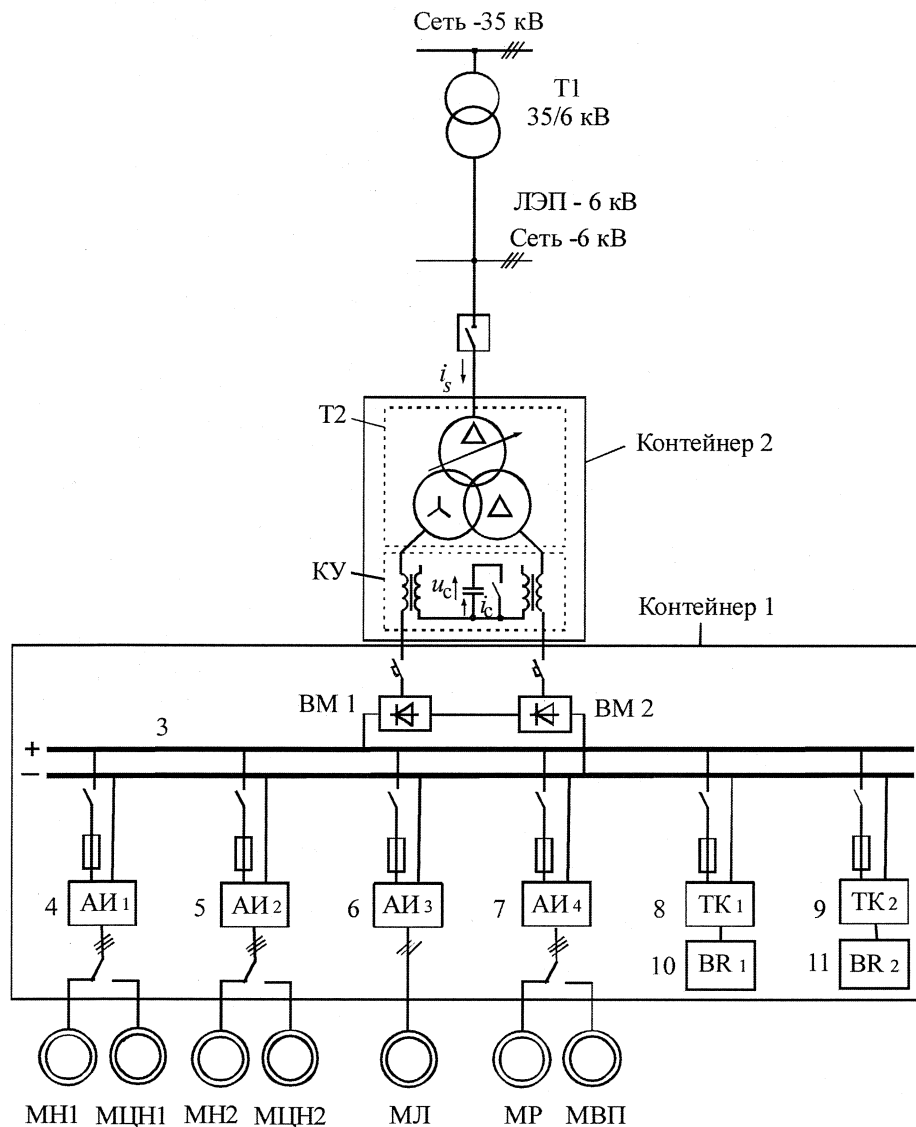


Рис. 1. Принципиальная однолинейная схема компенсированной СЭС буровой установки

В развернутом виде принципиальная схема КВА приведена на рис. 2 [5, 6]. Проведен подробный анализ электромагнитных процессов в СЭС с КВА в частотной (пути замыкания гармоник показаны на рис. 2) и временной областях. При создании инженерной методики расчета питающая сеть по отношению к КВА представлена источником ЭДС E_s и внутренним индуктивным сопротивлением x_s . Нагрузка в общем случае замещена активным сопротивлением R_n , индуктивным сопротивлением x_n и противо-ЭДС e_n . Ток нагрузки принят идеально сглаженным, что соответствует бесконечно большой величине x_n . Расчетная схема СЭС с КВА приведена на рис. 3.

Разработана серия программ и выполнены расчеты на ЭВМ всех необходимых для указанной методики характеристик. Графические зависимости этих характеристик приведены на рис. 4–12.

Все характеристики с целью универсальности построены в относительных единицах, при этом в качестве базисных тока, напряжения и мощности приняты следующие величины:

$$U_6 = E_{d0} = \frac{3h_1 E_{km}}{2\pi}; \quad I_6 = \frac{h_2 E_{km}}{x_k};$$

$$S_6 = U_6 I_6 = \frac{3h_1 h_2 E_{km}^2}{2\pi x_k},$$

где E_{km} и x_k – амплитуда коммутирующей ЭДС (линейного напряжения вентильных обмоток трансформатора Т2) и индуктивное сопротивление контура коммутации вентилей;

$h_1(h_2)$ – число последовательно (параллельно) соединенных (по отношению к нагрузке) коммутирующих групп КВА; при последовательном соединении выпрямительных мостов $h_1 = 4$, $h_2 = 1$, а при параллельном – $h_1 = 2$, $h_2 = 2$.

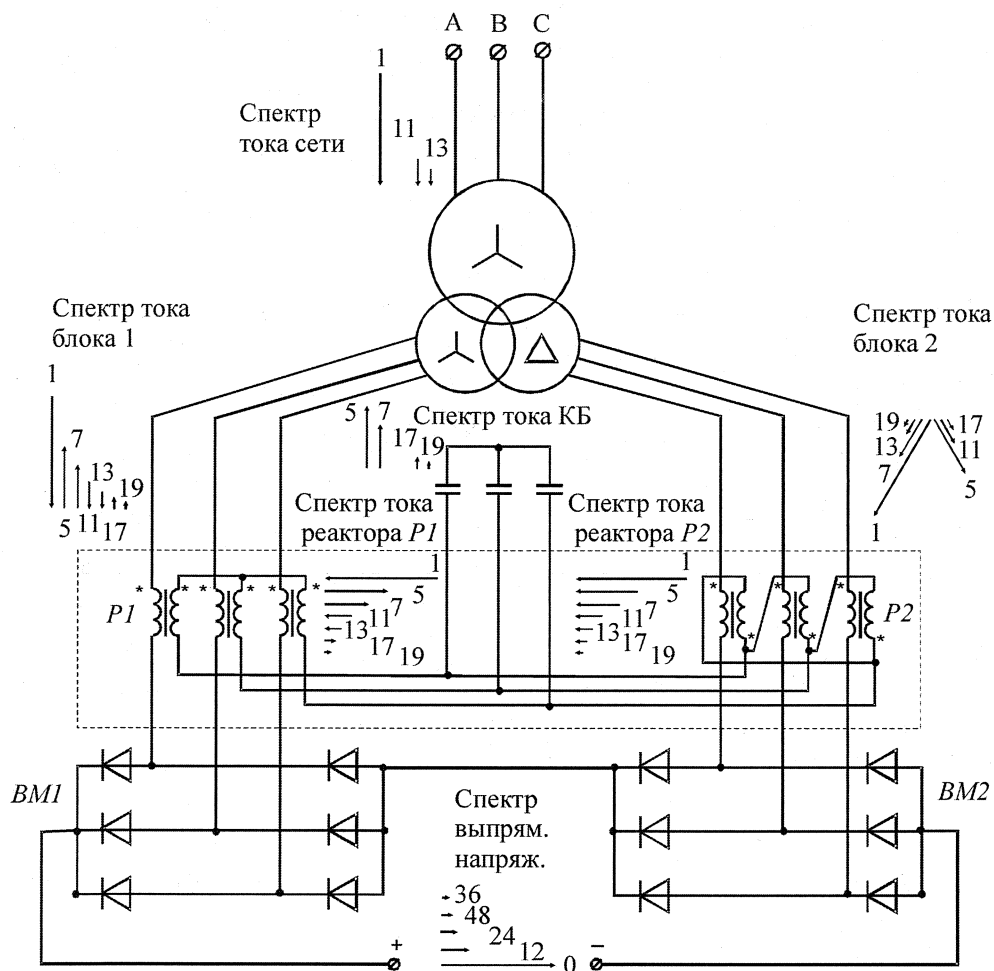


Рис. 2. Принципиальная схема компенсированного выпрямительного агрегата с указанием путей замыкания гармоник токов и напряжений

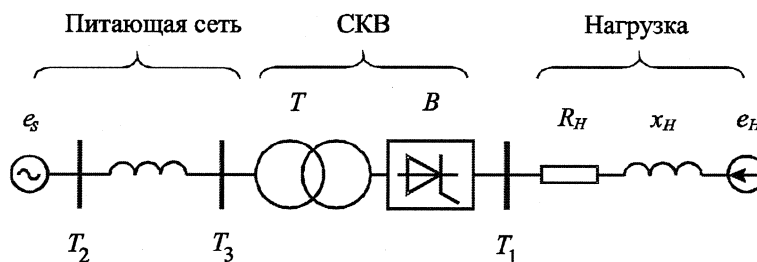


Рис. 3. Расчетная схема СЭС с КВА

Под величиной q на рис. 11, 12 понимается доля сопротивления x_s в сопротивлении контура коммутации вентилей x_k (иначе эта величина характеризует соотношение мощностей КВА и питающей сети). С возрастанием x_s (снижением мощности питающей сети, в частности, за счет увеличения длины воздушной ЛЭП) величина q возрастает, что приводит к увеличению искажения напряжения на входе КВА.

Рассмотрим алгоритм, определяющий суть предлагаемой методики расчета КВА. Исходными

для расчета данными являются параметры существующей некомпенсированной СЭС, а именно:

- напряжение и мощность короткого замыкания питающей сети 35 кВ;
- параметры трансформаторов Т1 и Т2;
- параметры воздушной ЛЭП-6кВ;
- графики нагрузки буровой установки и линейное напряжение на двигателях главных электроприводов.

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. По известным соотношениям определяется индуктивное сопротивление контура коммутации

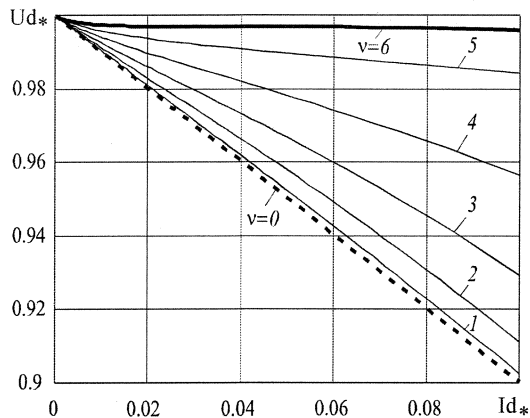


Рис. 4. Внешние характеристики КВА

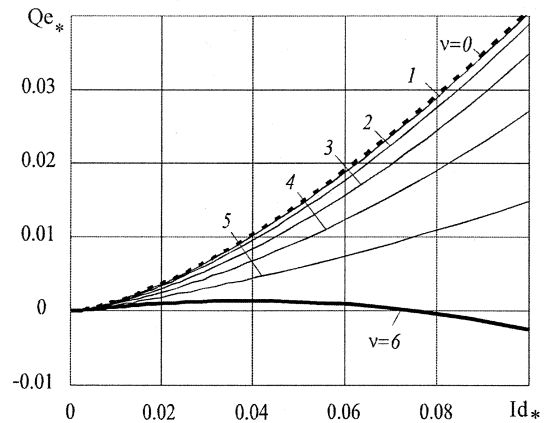


Рис. 5. Зависимости реактивной мощности, потребляемой КВА из питающей сети от тока нагрузки

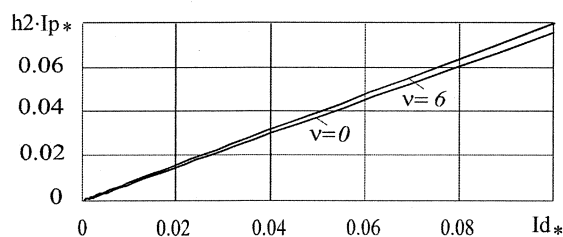


Рис. 6. Зависимости действующего значения тока в рабочей обмотке реактора от тока нагрузки

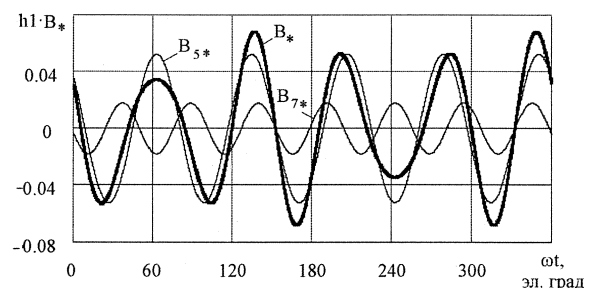


Рис. 7. Временные диаграммы магнитной индукции в магнитопроводе реактора при $v = 6$; $I_{d*} = 0,04$

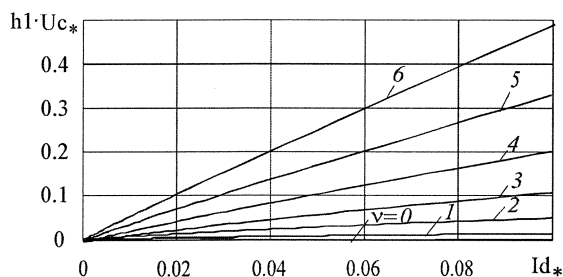


Рис. 8. Зависимости действующего значения напряжения на конденсаторной батарее от тока нагрузки

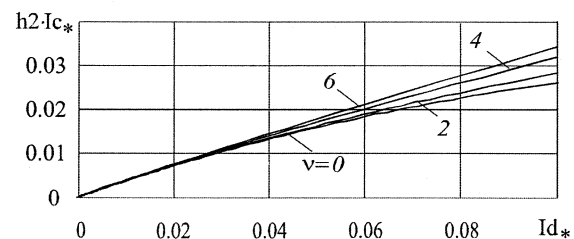


Рис. 9. Зависимости действующего значения тока конденсаторной батареи от тока нагрузки

вентилей x_k , приведенное к напряжению вентильных обмоток трансформатора Т2.

2. Устанавливаются номинальные величины выпрямленного напряжения и тока КВА из графиков нагрузки буровой установки. При их отсутствии напряжение на двигателях формируется с помощью инверторов с синусоидальной ШИМ, поэтому выпрямленное напряжение КВА должно быть равно или несколько выше амплитудного значения линейного напряжения на двигателях. При этом величину выпрямленного тока КВА можно определить исходя из мощности трансформатора Т2 с учетом коэффициента повышения расчетной мощности для мостовых преобразователей, равного 1,05.

3. По приведенным выше соотношениям рас-

считываются базисные величины напряжения, тока и мощности.

4. Определяется относительная величина выпрямленного тока I_{d*} .

5. По кривым на рис. 4 выбирается желаемая внешняя характеристика КВА и отвечающая ей величина v , под которой понимают относительное значение собственной частоты контура коммутации вентилей $v = \sqrt{x_c/x_k}$, где x_c — емкостное сопротивление фазы соединенной в звезду конденсаторной батареи КУ. При этом значении $v = 0$ здесь и далее соответствуют характеристики некомпенсированного выпрямительного агрегата. С целью стабилизации выпрямленного напряжения следует выбирать характеристику со значением v ,

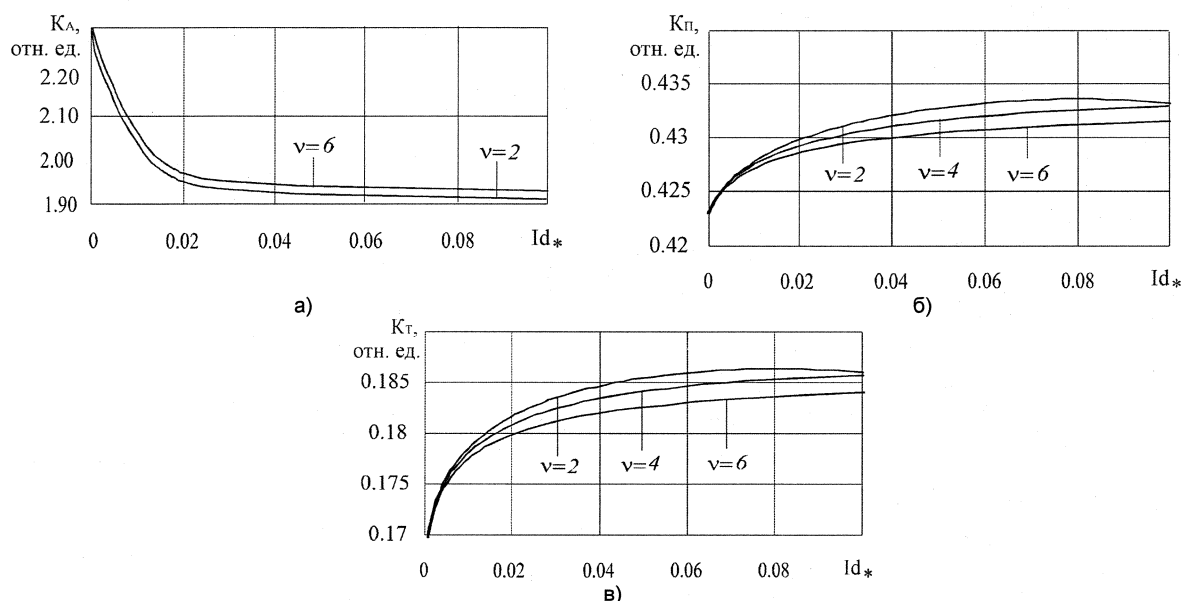


Рис. 10. Зависимости коэффициентов КА, КП и КТ от тока нагрузки

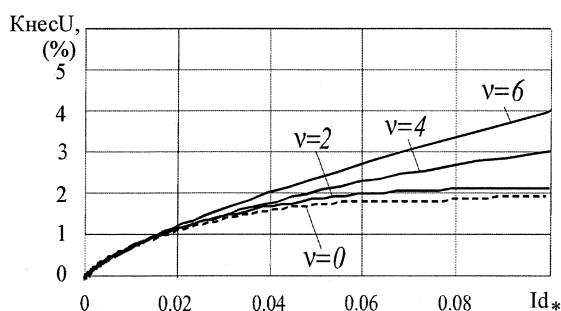


Рис. 11. Зависимости коэффициента искажения синусоидальности напряжения питающей сети от тока нагрузки при $q=0,1$

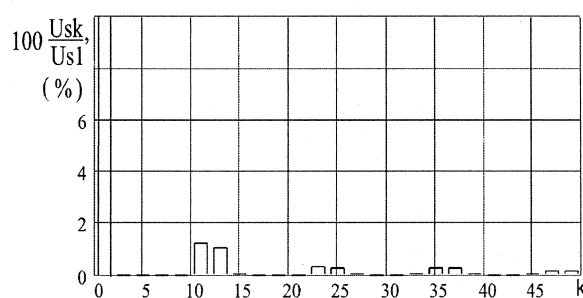


Рис. 12. Спектр напряжения питающей сети при $v=6$; $q=0,1$; $I_{d*}=0,04$

приближающимся к 6. За счет повышения жесткости внешней характеристики выпрямленное напряжение КВА несколько выше, чем у некомпенсированного агрегата. При необходимости повышенное напряжение КВА может быть скорректировано изменением коэффициента трансформации трансформатора Т2.

6. По кривым на рис. 5 с учетом базисной мощности устанавливается величина компенсируемой реактивной мощности при переходе агрегата в компенсированный режим работы с выбранным значением v . При необходимости величина компенсируемой реактивной мощности корректируется выбором соответствующего значения v совместно с учетом изменения внешней характеристики.

7. По кривым на рис. 6–9 с учетом базисных напряжения и тока устанавливаются параметры реакторов и конденсаторной батареи компенсирующего устройства при коэффициенте трансформации реактора Р1, равном единице. Емкость батареи на частоте 50 Гц устанавливается из приведенного выше выражения для v .

8. Выбираются конденсаторы конденсаторной батареи. Для наибольшей эффективности использования конденсаторной батареи целесообразно применение специальных конденсаторов, рассчитанных (см. рис. 2) на частоту 250 Гц. При применении промышленных конденсаторов, рассчитанных на работу в синусоидальном режиме с частотой 50 Гц, определяется предельно допустимое напряжение по трем критериям: по не превышению размаха изменения напряжения (сохранению электрической прочности), потерь в диэлектрике и номинального тока. При этом используются зависимости от I_{d*} и v коэффициентов амплитуды напряжения на конденсаторах в КВА (рис. 10, а) равенства потерь электрической энергии в диэлектрике (рис. 10, б) и равенства действующих значений токов через конденсаторы (рис. 10, в) [6].

9. По наименьшему предельному напряжению устанавливаются коэффициенты трансформации реакторов КУ и соответственно пересчитываются токи, напряжения и параметры элементов КУ.

10. По рис. 11 и 12 определяются и сравниваются с допустимыми по ГОСТ 13109–97 коэффи-

циент искажения синусоидальности и уровень высших гармоник напряжения питающей сети. При превышении допустимых значений, что может произойти при необходимости значительного возрастания длины воздушной ЛЭП, решается вопрос о применении на входе КВА резонансных фильтров минимальной установленной мощности, рассчитанных лишь на исключение в напряжении на входе КВА одиннадцатой и тринадцатой гармоник [7].

С использованием предложенной методики рассчитаны параметры КВА описанной выше СЭС при следующих исходных данных:

- мощность короткого замыкания на шинах 35 кВ – 500 МВ·А;

- трансформатор Т1 – ТМ-6300/35; $u_k\% = 7,5$;

- ЛЭП-6кВ – воздушная, одноцепная линия длиной 1 км с реактансом $x_0 = 0,4$ Ом/км;

- трансформатор Т2 – трехобмоточный преобразовательный трансформатор $S_T = 3200$ кВА; $U_{1л} = 6,3$ кВ; $U_{2л} = U_{3л} = 0,38$ кВ;

$u_{kBC} = u_{kBH} = u_{kCH} = 8\%$;

- номинальное линейное напряжение на двигателях главных электроприводов 690 В.

Приведем основные результаты расчета для номинального режима работы СЭС с последовательным соединением выпрямительных мостов. Выбранная величина $v = 6$. К установке приняты конденсаторы типа КЭКФ-4-2УХЛ1 с номинальной частотой 50 Гц, для которых в соответствии с рис. 10 минимальным оказалось напряжение, определенное из условия сохранения потерь в диэлектрике и равное 1,72 кВ. Выпрямленное напряжение и компенсируемая реактивная мощность агрегата $U_d = 1013$ В; $\Delta Q_e = 760$ квар. Мощность реакторов компенсирующего устройства 160 В·А при одном витке рабочей обмотки. Коэффициенты трансформации реакторов Р1 и Р2 равны 33 и 57. Действующие значение тока и напряжения на рабочих обмотках реакторов 2,42 кА; 51,3 В. То же для компенсационных обмоток реактора Р1 – 73 А, 1,72 кВ и реактора Р2 – 42 А, 2,98 кВ. Действующие значения тока, напряжения и емкость фазы конденсаторной батареи соответственно равны 32 А, 1,72 кВ, 11,5 мкФ. Установленная мощность всех трех фаз конденсаторной батареи КУ – 180 квар. Таким образом, конденсаторная батарея в КВА используется более чем в 4 раза эффективнее, чем при включении ее в питающую сеть. Гармоническое воздействие КВА на питающую сеть в соответствии с рис. 11, 12 при выбранной длине воздушной ЛЭП удовлетворяет требованиям ГОСТ 13109–97 во всех точках СЭС.

Рассмотренные выше компенсированные СЭС для нефтегазодобывающего комплекса будут разрабатываться впервые. Как и к любым объектам электроэнергетики к ним будут предъявлены вы-

сокие требования, в том числе и по техническому дизайну. В системах появляется новое электротехническое оборудование, поэтому возникает необходимость развития ранее принятых дизайнерских решений [1] применительно к этому оборудованию и его органичному вхождению в состав всей буровой установки. В соответствии с общей тенденцией создания буровой техники эти решения должны быть подчинены простоте, надежности, высокой ремонтоспособности оборудования, а также минимальным срокам при введении оборудования в эксплуатацию и возможности удобной транспортировки его автомобильным, морским и железнодорожным транспортом. Поэтому основное трансформаторное, реакторное, конденсаторное оборудование КВА, а при необходимости и фильтровое оборудование, предлагается выполнить в виде отдельного блока и расположить в специальном контейнере 2, а диодные выпрямительные мосты ВМ1 и ВМ2 – в контейнере 1 (см. рис. 2). Оба контейнера должны быть изготовлены в климатическом исполнении УХЛ1 по ГОСТ 15150-69. Все изложенные в [1] требования к контейнеру 1 относительно оснащения системами освещения, обогрева, кондиционирования, связи и пожарной сигнализации должны быть сохранены. Требования к контейнеру 2 в части регулирования температуры, обогрева и кондиционирования могут быть существенно упрощены. Габаритные размеры коридоров обслуживания в обоих контейнерах и современный дизайн должны полностью отвечать нормативным требованиям.

Литература

1. Технические решения и дизайн современной компенсированной преобразовательной подстанции нефтегазодобывающего комплекса / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, Ф.Ф. Бахтияев, С.А. Чупин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 11. – № 15. – С. 4–9.
2. Федорова, М.Ю. Проблемы разработки дизайна современных энергосберегающих систем электроснабжения нефтегазодобывающего комплекса / М.Ю. Федорова, Ю.И. Хохлов, С.Г. Шабиев // Вопросы планирования и застройки городов: материалы Междунар. конф. – Пенза: ПГУАС. – 2009. – С. 281–284.
3. Хохлов, Ю.И. Схемотехника и дизайн основного оборудования компенсированной преобразовательной системы электроснабжения буровой установки / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, Ф.Ф. Бахтияев // Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений: труды XXXIX конференции по электрификации. – М.: Технетика. – 2009. – Т. 1. – С. 217–219.
4. Частотно-регулируемый электропривод буровых установок БУ-4200/250 / Б.И. Абрамов и др. // Электротехника. – 2009. – № 1. – С. 8–13.

5. Пат. 1124414 Российская Федерация. Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное / Ю.И. Хохлов. – заявл. 24.06.83; опубл. 15.11.84, Бюл. № 42.

6. Хохлов, Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы

нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 355 с.

7. Пат. 2107374 Российская Федерация. Компенсированная преобразовательная система электроснабжения / Ю.И. Хохлов. – заявл. 10.07.96; опубл. 20.03.98, Бюл. № 8.

Поступила в редакцию 14.02.2010 г.

Хохлов Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, декан энергетического факультета Южно-Уральского государственного университета, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения». Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения. Контактный телефон: 8-(351) 267-90-83.

Khohlov Yuri Ivanovich – doctor of technical sciences, professor, corresponding member of the Academy of Electrotechnical Science of the Russian Federation, Dean of the Power Engineering Faculty of South Ural State University, Head of the Power Supply Systems department, expert in the field of electrical engineering theory, power electronics and power saving systems. Contact phone: 8-(351) 267-90-83.

Федорова Мария Юрьевна – старший преподаватель кафедры «Дизайн» ЮУрГУ. Специалист в области промышленного дизайна. Контактный телефон: 8-(351) 267-94-26.

Fyodorova Maria Yuryevna – senior lecturer of the Design department of South Ural State University, expert in the field of industrial design. Contact phone: 8-(351) 267-94-26.

Шабиев Салават Галиевич – доктор архитектуры, профессор, член-корреспондент Международной Академии архитектуры стран Востока, декан архитектурного факультета Южно-Уральского государственного университета, заведующий кафедрой «Архитектура». Специалист в области архитектуры гражданских и промышленных объектов. Контактный телефон: 8-(351) 267-98-24.

Shabiyev Salavat Galiyevich – doctor of architecture, professor, corresponding member of the International Academy of Architecture of East Countries, Dean of the Architectural Faculty of South Ural State University, Head of the Architecture department, expert in the field of architecture of civil and industrial units. Contact phone: 8-(351) 267-98-24.