

## СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С АНСАМБЛЕМ НЕЧЕТНО-КРАТНЫХ ГАРМОНИК ТОКА В ОДНОРЕАКТОРНОМ КОМПЕНСИРУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ ДВЕНАДЦАТИФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, С.Г. Шабиев, А.А. Майер

Предметом работы являются системы электроснабжения (СЭС) буровых установок нефтегазодобывающего комплекса с частотным электроприводом основных механизмов и общим диодным выпрямителем. Сформулированы требования к таким системам. При построении подобных СЭС предложено использовать принципы, применяемые в гибких линиях электропередач. С этой целью для компенсации продольного индуктивного сопротивления систем показана целесообразность использования в качестве общего выпрямителя симметричных компенсированных выпрямительных агрегатов. Предложен вариант такого агрегата с ансамблем нечетно-кратных гармоник тока в однореакторном компенсирующем устройстве. На основе анализа электромагнитных процессов пояснены особенности работы агрегата. Рассмотрены способы регулирования напряжений в СЭС. Показано, что при относительно небольшой удаленности буровых установок от понижающей подстанции для управления напряжениями может быть использовано автотрансформаторное регулирование либо в начале линии электропередачи, либо в ее расщелке. Для сверхудаленных буровых установок следует применять либо электронное векторное управление в начале линии электропередачи, либо автотрансформаторное регулирование в начале и в конце линии. Приведены схемные решения СЭС, а также результаты конструкторской и дизайнерской разработки реактора компенсирующего устройства выпрямительного агрегата.

*Ключевые слова:* система электроснабжения, буровая установка, ансамбль нечетно-кратных гармоник тока, реактор, компенсирующее устройство, двенадцатифазный выпрямительный агрегат, конструкторское решение, дизайн.

Энергоэффективность буровых работ в нефтегазодобывающем комплексе во многом определяется надежным и экономичным функционированием систем электроснабжения (СЭС) буровых установок (БУ). Специфика построения таких СЭС требует учитывать:

- удаленность БУ от питающих понижающих подстанций;
- необходимость транспорта электрической энергии по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП) с относительно большими как реактивными, так и активными сопротивлениями на значительные расстояния;
- нахождение БУ и ЛЭП в труднодоступных местах со сложными климатическими условиями;
- перспективность сформировавшегося в последние годы направления использования для питания асинхронных двигателей основных механизмов БУ общего выпрямительного агрегата и индивидуальных автономных инверторов напряжения [1].

В этих условиях для указанных СЭС весьма актуальным является решение научных и практических проблем, связанных со снижением потерь электрической энергии при ее передаче, с поддержанием номинальных качественных показателей электрической энергии как на БУ, так и на обеспечивающих ее жизнедеятельность потребителей в нормальном режиме работы буровой, а также с ограничением напряжения на всех потребителях в режиме холостого хода БУ. Такие требования при построении подобных СЭС приводят к целесооб-

разности обращения к принципам, реализуемым в гибких (управляемых) ЛЭП [2]. Эти принципы предусматривают применение продольной компенсации индуктивного сопротивления линии, а также управление напряжениями на входе и выходе ЛЭП.

В соответствии с отмеченным, разработан ряд перспективных вариантов систем электроснабжения БУ [3–6], в которых продольная компенсация индуктивного сопротивления осуществляется путем перевода общего выпрямительного агрегата в компенсированный режим работы. В разработанных вариантах указанный перевод выполняется путем включения в выпрямительный агрегат специального компенсирующего устройства, содержащего два реактора и конденсаторную батарею [7–9].

В данной работе ставится задача дальнейшего повышения эффективности работы разработанных СЭС за счет применения в выпрямительном агрегате совмещенного однореакторного компенсирующего устройства и рекомендаций по выбору способа управления напряжениями в СЭС в зависимости от удаленности БУ от понижающей подстанции.

Принципиальная схема двенадцатифазного симметричного компенсированного выпрямительного агрегата (СКВА) с однореакторным компенсирующим устройством представлена на рис. 1. Двенадцатифазный СКВА содержит два шести-фазных преобразовательных блока. Первый блок образован сетевой, вентильной, соединенной в треугольник, обмотками трансформатора и выпрямительным мостом *ВМ1*. Второй блок образо-

ван сетевой, вентильной, соединенной в звезду, обмотками трансформатора и выпрямительным мостом *ВМ2*. Общее для обоих блоков компенсирующее устройство состоит из одного реактора с двумя рабочими *PO1*, *PO2*, одной компенсационной *КО* обмотками и конденсаторной батареи *КБ*.

В результате подробного анализа электромагнитных процессов в СКВА при обычных для мощных преобразователей допущениях установлены соотношения, определяющие спектр входного тока первого блока. Принимая, как и в [10], в качестве базисной величины амплитуду установившегося значения тока коммутации, для амплитуды синусоидальной составляющей *k*-той гармоники фазы А входного тока первого блока в относительной форме получаем:

$$B_{\sigma 1k*} = \frac{2[1+(-1)^{k+1}]I_{d*}}{\pi kh_2} \sin k \frac{\pi}{m} \left\{ \frac{\cos}{\sin} k \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m} \right) \cos k \frac{\gamma}{2} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2(v^2-1)I_{d*}} \left\{ \frac{k}{k-1} \frac{\sin}{\cos} \left[ (k-1) \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) + k \frac{\pi}{m} \right] \sin(k-1) \frac{\gamma}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{k}{k+1} \frac{\sin}{\cos} \left[ (k+1) \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) + k \frac{\pi}{m} \right] \sin(k+1) \frac{\gamma}{2} \right\} - \right. \\ \left. - \frac{A_{1*}}{2I_{d*}} \left\{ \frac{k}{k-v} \frac{\sin}{\cos} \left[ k \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m} \right) - \frac{v\gamma}{2} \right] \sin(k-v) \frac{\gamma}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{k}{k+v} \frac{\sin}{\cos} \left[ k \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m} \right) + \frac{v\gamma}{2} \right] \sin(k+v) \frac{\gamma}{2} \right\} - \right. \\ \left. - \frac{A_{2*}}{2I_{d*}} \left\{ \frac{k}{k-v} \frac{\cos}{\sin} \left[ k \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m} \right) - \frac{v\gamma}{2} \right] \sin(k-v) \frac{\gamma}{2} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{k}{k+v} \frac{\cos}{\sin} \left[ k \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m} \right) + \frac{v\gamma}{2} \right] \sin(k+v) \frac{\gamma}{2} \right\} \right\}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\gamma$  – углы включения и коммутации вентилялей;  $m=3$  – число фаз в коммутирующей группе вентилялей;  $v$  – собственная частота контура коммутации, отнесенная к частоте напряжения питающей сети;  $A_1^*$ ,  $A_2^*$ ,  $I_{d*}$  – относительные величины постоянных интегрирования и выпрямленного тока [11].

Амплитуда косинусной составляющей определяется путем замены в (1) тригонометрических функций и знаков сложения на указанные над горизонтальными скобками. Соответственно амплитуда *k*-й гармоники фазы А входного тока первого блока равна:

$$I_{\sigma 1mk*} = \sqrt{B_{\sigma 1k*}^2 + C_{\sigma 1k*}^2}. \quad (2)$$

Как следует из соотношений (1) и (2), спектр входного тока первого блока содержит гармоники порядка  $k = 6s \pm 1$ , где  $s = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ . Значениям  $s = 0, 2, 4, \dots$  отвечает ансамбль четно-кратных, а значениям  $s = 1, 3, 5, \dots$  – нечетно-кратных гармоник тока. На рис. 1 рядом с первым блоком представлено векторное изображение

спектра тока фазы А этого блока, построенного в соответствии с соотношениями (1) и (2).

Принятая на рис. 1 группа соединения обмоток преобразовательного трансформатора осуществляет сдвиг в сторону опережения на 30 эл. град. мгновенного значения входного тока второго блока. В результате векторное изображение спектра входного тока фазы А второго блока принимает вид, представленный на рис. 1 рядом с этим блоком. При трансформации отдельных гармоник в питающую сеть с учетом той последовательности фаз, которую они образуют, в питающей сети суммируются ансамбли четно-кратных и уничтожаются ансамбли нечетно-кратных гармоник токов первого и второго блоков. Векторное представление спектра тока фазы А сети показано на входе СКВ. Оно отвечает двенадцати фазному режиму преобразования электрической энергии.

Схемой соединения рабочей обмотки *PO2* реактора компенсирующего устройства в зигзаг и ее противофазным включением по отношению к рабочей обмотке *PO1* обеспечивается встречное направление МДС, создаваемых ансамблями четно-кратных гармоник токов, протекающих в рабочих обмотках. Для ансамблей МДС, создаваемых нечетно-кратными гармониками токов в рабочих обмотках, соединение рабочих обмоток является согласным. Поэтому результирующая МДС рабочих обмоток реактора определяется только суммарным ансамблем нечетно-кратных гармоник входных токов блоков. Под действием результирующей МДС в магнитопроводе реактора создается соответствующий магнитный поток, а на компенсационных обмотках *КО* и конденсаторах конденсаторной батареи *КБ* формируются напряжения с ансамблем нечетно-кратных гармоник. Векторное представление спектра напряжения фазы А конденсаторной батареи показано на рис. 1 рядом с *КБ*. Напряжения на конденсаторах *КБ* осуществляют одноступенчатую искусственную коммутацию вентилялей СКВА, а СЭС приобретает описанные в [10,11] свойства высокоэффективной продольной компенсации индуктивного сопротивления и совершенствования основных ее характеристик.

С использованием описанной картины поведения спектров и выражений (1) и (2) рассчитаны амплитудные и действующие значения токов и напряжений на элементах СКВА. В результате разработаны технические условия на перевод в компенсированный режим работы выпрямительного агрегата мощностью 3200 кВА с номинальными выпрямленными напряжением и током 825 В, 3200 А для буровой установки БУ-4200/250 ЭК-БМ (Ч). С целью практической реализации проведенных исследований совместно со специалистами группы компаний «Приводная техника» (г. Челябинск) и ООО «Снежинский завод специальных электрических машин» ведется проработка конструктивных решений и модульно-блочного дизайна предложенных систем, а также способов



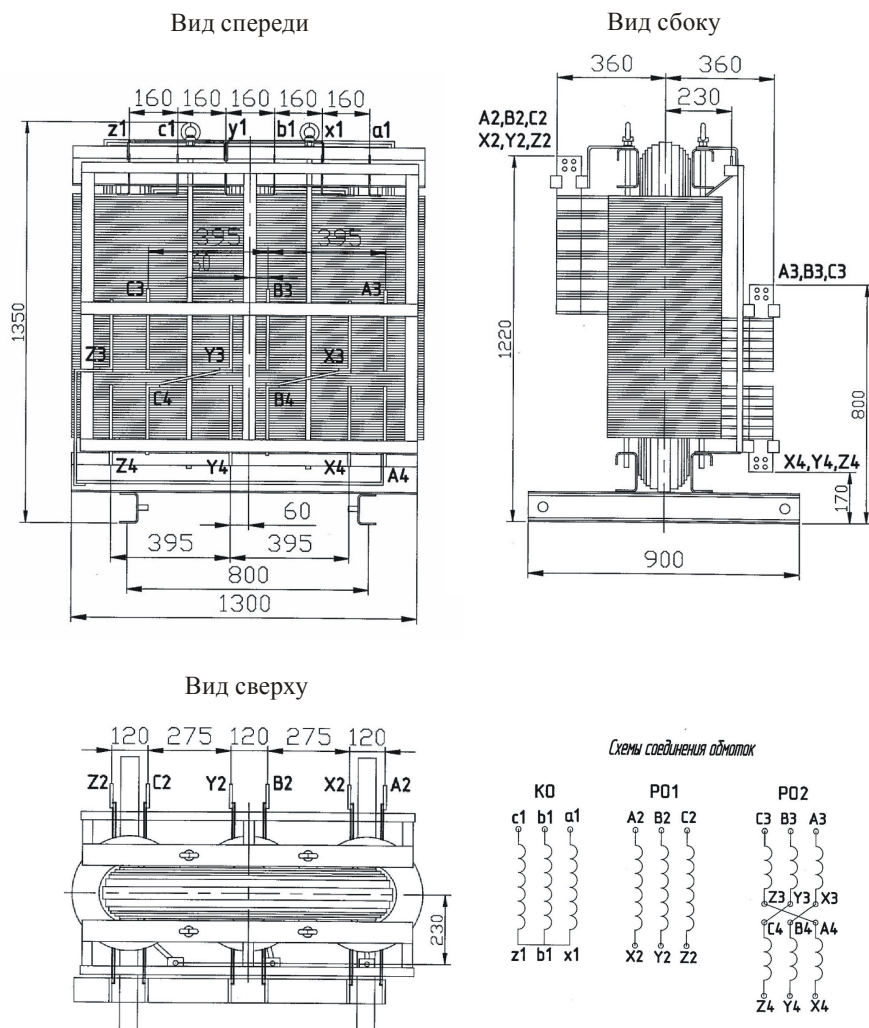


Рис. 2. Конструктивное решение и схемы соединения обмоток реактора компенсирующего устройства СКВА

буровых и цементировочных насосов, роторного ствoла, лебедки  $D_1 - D_n$ ) посредством автономных инверторов напряжения  $AI_1 - AI_n$  и общего выпрямительного агрегата.

В СЭС по схеме на рис. 3 регулирование напряжения осуществляется с помощью трехфазного корректирующего устройства  $TKU1$  в виде повышающего автотрансформатора (или трансформатора) с изменяемым в зависимости от длины ЛЭП коэффициентом трансформации.  $TKU1$  может включаться либо в начале ЛЭП, либо в ее рассечку. В последнем случае при необходимости возможно повторное включение  $TKU1$  [5]. Достоинством СЭС является ее простота. К недостаткам можно отнести то, что при ее использовании для сверхудаленных ЛЭП становится затруднительным поддержание в допустимых пределах напряжения на буровой и прочей нагрузке в режиме холостого хода БУ. Данная СЭС рекомендуется для электроснабжения БУ со средней длиной ЛЭП.

В СЭС по схеме на рис. 4 используется два аналогичных трехфазных корректирующих устройства:  $TKU1$  повышающего и  $TKU2$  понижающего типа [6]. При относительной простоте в такой СЭС удовлетворяются все указанные выше требования к ней даже для сверхудаленных БУ. При этом существенно снижаются потери электрической энергии при передаче по ЛЭП за счет уменьшения тока в линии, обеспечивается необходимая токовая нагрузка прочих потребителей в районе БУ и ограничивается напряжение на всех потребителях в режиме холостого хода БУ. Данная СЭС особенно целесообразна для электроснабжения БУ с большой длиной ЛЭП.

В СЭС по схеме на рис. 5 используется аналогичное рассмотренному в [2] векторное управление напряжением на входе ЛЭП. В соответствии с векторной диаграммой управления достоинством варианта является возможность плавного регулирования напряжения на входе ЛЭП с одновременным управлением потоком реактивной мощности.

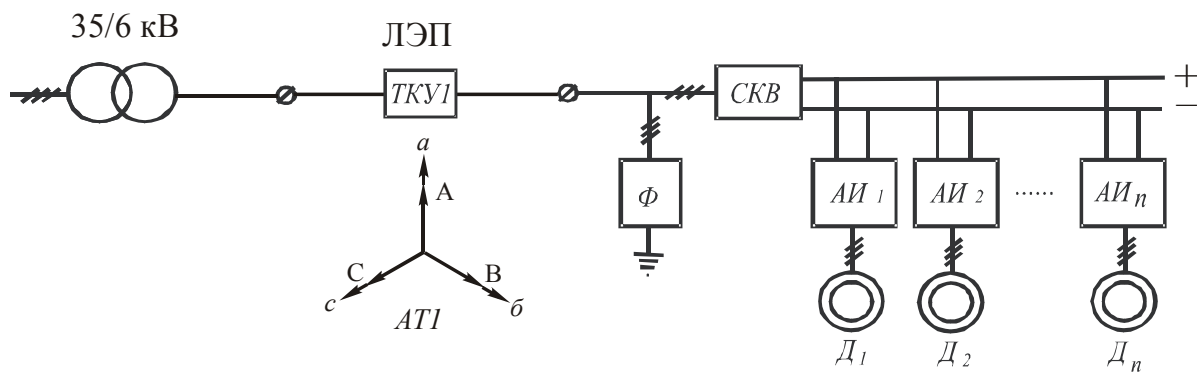


Рис. 3. СЭС с повышающим ТКУ1 в расщепе ЛЭП

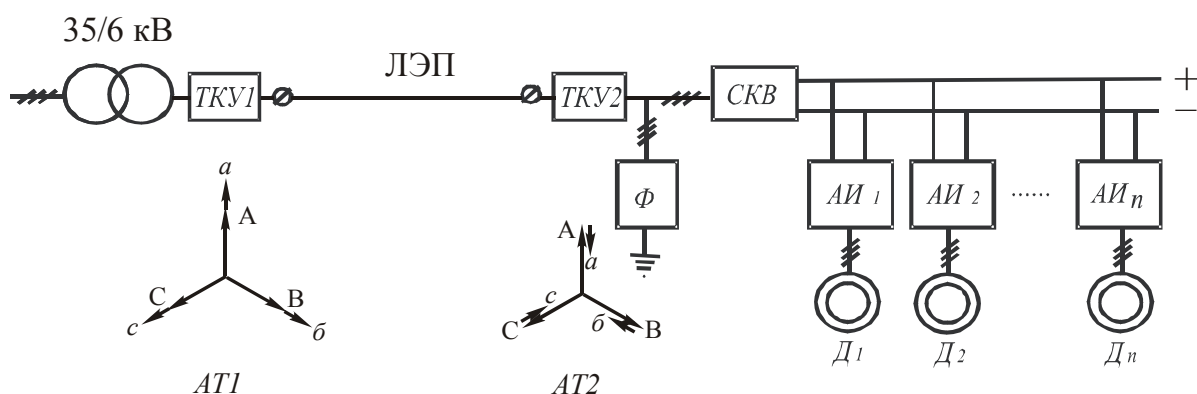


Рис. 4. СЭС с повышающим ТКУ1 и ТКУ2 по концам ЛЭП

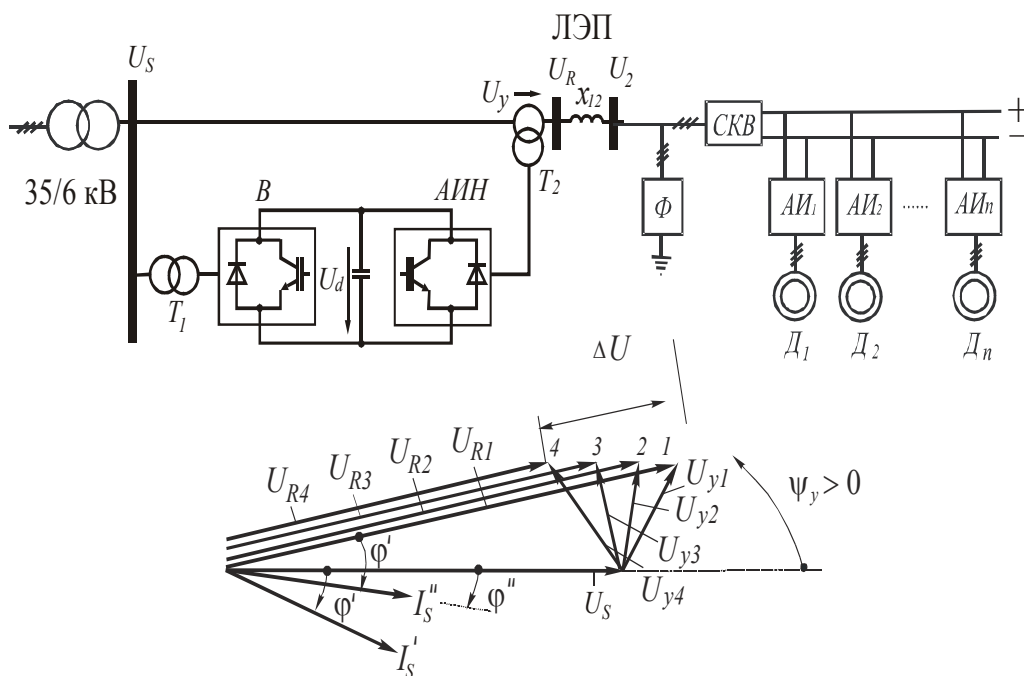


Рис. 5. СЭС с векторным управлением

К недостаткам следует отнести определенную сложность устанавливаемого на питающей подстанции дополнительного оборудования в виде параллельного и последовательного трансформаторов, управляемого выпрямителя и автономного инвертора напряжения с синусоидальной ШИМ. Данная СЭС может быть использована при любой длине ЛЭП.

С целью снижения несинусоидальности напряжения выпрямительный агрегат во всех представленных СЭС выполняется в диодном двенадцатиразном исполнении. В том случае, когда требуется дополнительное снижение несинусоидальности напряжения на БУ, на входе СКВ включается фильтр одиннадцатой гармоники Ф минимальной установленной мощности [11], рассчитанный только на компенсацию мощности искажения.

#### **Заключение**

Разработаны новые энергоэффективные варианты компенсированных систем электроснабжения буровых установок нефтегазодобывающего комплекса и способы управления ими. На основе анализа электромагнитных процессов определены параметры и выполнены конструкторские и дизайнерские работы по созданию реакторного оборудования систем.

#### **Литература**

1. Частотно-регулируемый электропривод буровых установок БУ-4200/250 / Б.И. Абрамов и др. // *Электротехника*. – 2009. – № 1. – С. 8–13.
2. Кочкин, В.И. Традиционные и новые технологии управления режимами работы электрических сетей на основе устройств силовой электроники / В.И. Кочкин // *Электротехника*. – 2009. – № 6. – С. 3–14.
3. Пат. 2400917 Российская Федерация. Компенсированная система электроснабжения разночастотных потребителей электрической энергии / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, С.А. Чупин // *Бюл. изобр.* – 2010. – № 27.
4. Технические решения и дизайн современной компенсированной преобразовательной подстанции нефтегазодобывающего комплекса / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, Ф.Ф. Бахтиев, С.А. Чупин // *Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика*. – 2009. – Вып. 11. – № 15. – С. 4–9.
5. Федорова, М.Ю. Повышение энергоэффективности и разработка дизайна систем электроснабжения удаленных буровых установок нефтегазодобывающего комплекса / М.Ю. Федорова, Ю.И. Хохлов, А.В. Хлопова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 17. – № 16. – С. 42–46.
6. Схемные, конструкторские и дизайнерские решения компенсированной системы электроснабжения сверхудаленных буровых установок с существенной величиной прочей нагрузки / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, С.Г. Шабиев, А.А. Майер // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 18. – № 37. – С. 6–11.
7. Пат. 1124414 Российская Федерация. Компенсированный преобразователь переменного напряжения в постоянное / Ю.И. Хохлов // *Бюл. изобр.* – 1984. – № 42.
8. Khokhlov, Yu.I. Electromagnetic compatibility of «The supply network – semi-conductor converter system – load» complexes / Yu.I. Khokhlov // *Proceedings of international conference on electromagnetic compatibility ICEMC' 95 KUL. Kuala Lumpur*. – 1995. – P. 197–199.
9. Khokhlov, Yu.I. Stochastic electromagnetic processes of the complex «Power system – compensated rectifiers – random load» / Yu.I. Khokhlov, D.N. Nikulin, E.V. Sherruble // *Fourth International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical systems*. – Szczecin, 1999. – V. 3. – P. 1085–1088.
10. Хохлов, Ю.И. 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 // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2010. – Вып. 13. – № 14. – С. 4–10.
11. Федорова, М.Ю. MATLAB-моделирование как средство разработки исходной информации для конструирования и дизайна компенсированной системы электроснабжения буровой установки / М.Ю. Федорова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2011. – Вып. 15. – № 15. – С. 36–39.

**Хохлов Юрий Иванович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета. Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения, khokhlov@energo.susu.ac.ru.

**Федорова Мария Юрьевна**, старший преподаватель кафедры «Дизайн» Южно-Уральского государственного университета. Специалист в области промышленного дизайна, mariafedorova74@mail.ru.

**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, shabiev@susu.ac.ru.

**Майер Александр Андреевич**, главный конструктор по трансформаторам ООО «Снежинский завод специальных электрических машин». Специалист в области конструирования трансформаторного и реакторного оборудования, mayeralex2006@mail.ru.

**Power Supply Systems of Drilling Rigs  
with an Ensemble of Odd-Fold Current Harmonics  
in a Single-Reactor Compensating Device  
of a Twelve-Phase Rectifier Unit**

**Yu.I. Khokhlov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*Khokhlov@energo.susu.ac.ru*

**M.YU. Fyedorova**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*mariafedorova 74@mail.ru*

**S.G. Shabiev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*Shabiev@susu.ac.ru*

**A.A. Mayer**, Special Electrical Machine Plant, Snezhinsk, Russian Federation,  
*mayeralex 2006@mail.ru*

The subject of this work is power supply systems (PSS) of drilling rigs of an oil-and-gas extracting complex with a frequent electrical drive of basic equipment and a general diode rectifier unit. The requirements for these systems are formulated. It is suggested to use principles applied in FACTS while building such PSS. To this end for compensating longitudinal inductive reactance of systems advisability of using symmetric compensated rectifier units as a general rectifier is shown. A variant of such unit with an ensemble of odd-fold current harmonics in a single-reactor compensating device is suggested. Some work characteristics of the unit are explained on the basis of electromagnetic process analysis. Voltage control methods in PSS are considered. It is shown that with a relatively short distance of drilling rigs from a decreasing substation for voltage control autotransformer control can be used either in the beginning of the power transmission line or in its cutting. For super-distance drilling rigs it is necessary to use either electronic vector control in the beginning of a power transmission line or autotransformer control in the beginning and in the end of the line. Scheme decisions of PSS and the results of constructive and design development of a compensating device reactor of a rectifier unit are given.

*Keywords: power supply system, drilling rig, ensemble of odd-fold current harmonics, reactor, compensating device, twelve-phase rectifier unit, constructive decision, design.*

**References**

1. Abramov, B.I., Kogan A.I., Breslav B.M., Kochetkov V.D., Kozhakov O.I., Shilenkov V.A., Vasilev V.K., Kirilov E.V., Lyulkovich P.R. Chastotno-reguliruemyy elektroprivod burovykh ustanovok BU-4200/250, *Russian Electrical Engineering*, no 1, 2009, pp. 8–13.
2. Kochkin, V.I. Traditsionnye i novye tehnologii upravleniya rezhimami raboty elektricheskikh setey na osnove ustroystv silovoy elektroniki, *Russian Electrical Engineering*, no. 6, 2009, pp. 3–14.
3. Patent 2400917 (Rossiyskaya Federatsiya). Kompensirovannaya sistema elektrosnabzheniya raznochastotnykh potrebiteley elektricheskoy energii, YU.I. Khokhlov, M.YU. Fedorova, S.A. Chupin, Byul. izobr. 2010, no 27.
4. Khokhlov YU.I., Fyedorova M.YU., Bakhtiev F.F., Chupin S.A., Technical decisions and design of modern compensated converting substation of oil and gas extraction complex, *Bulletin of South Ural State University, Series "Power Engineering"*, Chelyabinsk, vol. 11, no. 15, 2009, pp. 4–9.
5. Fyedorova, M.YU., Khokhlov YU.I., Khlopova A.V., Power efficiency increase and power supply systems design development of distant drilling installations of oil and gas extraction system, *Bulletin of South Ural State University, Series "Power Engineering"*, Chelyabinsk, vol. 17, no. 16, 2012, pp. 42–46.
6. Khokhlov YU.I., Fyedorova M.YU., Shabiev S.G., Mayer A.A., Scheme, engineering and design solutions of compensated power supply system of super-distant drilling devices with other essential loads, *Bulletin of South Ural State University, Series "Power Engineering"*, Chelyabinsk, no37, 2012, pp. 6–11.
7. Patent 1124414 (Rossiyskaya Federatsiya). Kompensirovannyy preobrazovatel peremennogo napryazheniya v postoyannoe Byul. izobr. 1984, no 42.
8. Khokhlov, YU.I. Electromagnetic compatibility of «The supply network – semi-conductor converter system – load» complexes *Proceedings of international conference on electromagnetic compatibility ICEMC' 95 KUL.*, Kuala Lumpur, 1995, pp. 197–199.
9. Khokhlov, YU.I. Nikulin D.N. Sherruble E.V. Stochastic electromagnetic processes of the complex «Power system – compensated rectifiers – random load» / YU.I. Khokhlov, *ourth International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical systems*, Szczecin, vol. 3, 1999, pp. 1085–1088.
10. YU.I. Khokhlov, M.YU. Fyedorova, S.G. Shabiev, 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, *Bulletin of South Ural State University, Series "Power Engineering"*, Chelyabinsk, vol. 13, no 14, 2010, pp. 4–10.
11. Fyedorova, M.YU. MATLAB-modelling as a development means of source information for construction and design a compensated power supply system of a drill rig, *Bulletin of South Ural State University, Series "Power Engineering"*, Chelyabinsk, vol. 15, no. 15, 2011, pp. 36–39.

*Поступила в редакцию 21.03.2013 г.*