

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.632

## 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\*\**

*\* г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет*

*\*\* г. Снежинск, Снежинский завод специальных электрических машин*

## SCHEME, ENGINEERING AND DESIGN SOLUTIONS OF COMPENSATED POWER SUPPLY SYSTEM OF SUPER-DISTANT DRILLING DEVICES WITH OTHER ESSENTIAL LOADS

*Y.I. Khokhlov\*, M.Y. Fyodorova\*, S.G. Shabiev\*, A.A. Mayer\*\**

*\* Chelyabinsk, South Ural State University*

*\*\* Snezhinsk, Snezhinsk Special Electrical Machines Plant*

Рассмотрены схемные, конструкторские и дизайнерские решения компенсированной системы электроснабжения наиболее удаленных буровых установок нефтегазодобывающего комплекса при наличии значительной величины нагрузки прочих потребителей электрической энергии. Приведены результаты моделирования и параметры основного оборудования предложенной системы.

**Ключевые слова:** буровая установка, компенсированная система электроснабжения, трехфазное трансформаторное корректирующее устройство, компенсационный трансформатор, конденсаторная батарея, фильтр, конструктивное решение, дизайн.

The scheme, engineering and design solutions for the compensated power supply systems of the most-remote drilling devices (involved in oil-and-gas producing complex) with significant load of other energy consumers have been considered. The results of modeling and parameters for the main equipment of the suggested system are presented.

**Keywords:** drilling device, compensated power supply system, three-phase transformer correcting unit, compensating transformer, capacitors battery, filter, engineering solution, design.

Развитие нефтегазодобывающего комплекса неизбежно сталкивается с необходимостью освоения месторождений в труднодоступных местах, удаленных от баз обслуживания на многие километры. Это для питания буровых установок (БУ) обусловило создание высоконадежной перспективной системы электроснабжения (СЭС) на основе частотно-регулируемого электрического привода переменного тока [1-4]. В известной СЭС на асинхронные двигатели БУ переменное напряжение регулируемой частоты подается посредством общего двенадцатифазного некомпенсированного выпрямительного агрегата и индивидуальных автономных инверторов напряжения. С целью по-

вышения энергоэффективности технологических процессов в работах [5, 6] предложено указанную СЭС перевести в компенсированный режим работы с использованием двенадцатифазного симметричного компенсированного выпрямительного агрегата (СКВ) с пятой и седьмой гармониками тока в коммутирующих конденсаторах. В результате аналитических исследований и подробного моделирования электромагнитных процессов [7, 8] с целью увеличения допустимой длины воздушной ЛЭП, передающей электрическую энергию от питающей подстанции до БУ, в работе [9] предложено компенсированную СЭС дополнить автотрансформаторными корректирующими устройствами и

фильтром одиннадцатой гармоники, включаемым на входе СКВ. Этих решений оказывается достаточно при длине ЛЭП до 10–12 км и относительно не большой величине прочей электрической нагрузки в виде вспомогательных механизмов и других потребителей в районе БУ.

Реальная практика бурения в современных условиях сталкивается с необходимостью работы буровых установок при еще больших длинах ЛЭП и при такой величине прочей нагрузки, которые диктуют необходимость создания компенсированной СЭС, удовлетворяющей данным условиям. Требования к подобным СЭС сформулированы специалистами ОАО «Сургутнефтегаз». Эти требования предусматривают снижение потерь электрической энергии в столь длинных ЛЭП за счет уменьшения протекающего по ним тока, обеспечения номинальной величины и требуемого по ГОСТу качества напряжения на входе работающей БУ, а также не превышения 7,2 кВ действующего значения напряжения на БУ в режиме ее холостого хода.

Указанные требования удовлетворяются в рассматриваемой ниже компенсированной СЭС,

принципиальная схема которой представлена на рис. 1. По сравнению с СЭС, описанной в работе [9], здесь для снижения протекающего по ЛЭП тока используется включаемый на входе линии повышающий регулировочный трансформатор (или автотрансформатор), а для обеспечения номинального напряжения и повышения тока, потребляемого БУ и прочей нагрузкой, на выходе ЛЭП включается ТТКУ по схеме на рис. 2 с регулировочным понижающим трансформатором. Такое решение одновременно с указанным защищает потребителей электрической энергии от превышения допустимого напряжения при холостом ходе БУ. Следует заметить, что коэффициенты трансформации повышающего и понижающего трансформаторов определяются длиной ЛЭП.

Другой особенностью рассматриваемой СЭС является способ компенсации реактивной мощности. В данной системе введенное в состав ТТКУ компенсирующее устройство выполнено в виде компенсационного трансформатора и подключенной к его компенсационной обмотке конденсаторной батареи. Принципиальным моментом является то, что в отличие от СЭС, рассмотренной в [9],

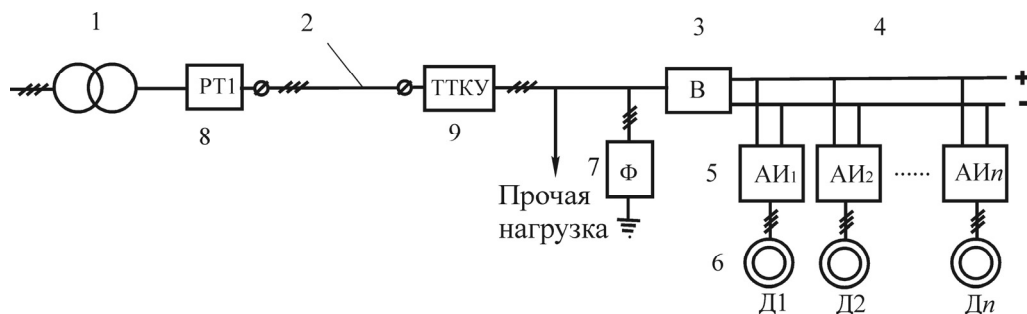


Рис. 1. Принципиальная однолинейная схема компенсированной СЭС:

1 – понижающая подстанция 35/6 кВ; 2 – воздушная ЛЭП 6 кВ; 3 – двенадцатифазный диодный выпрямительный агрегат; 4 – распределительное устройство постоянного тока; 5 – автономные инверторы напряжения; 6 – асинхронные двигатели механизмов буровой установки; 7 – фильтр одиннадцатой гармоники; 8 – регулировочный трансформатор повышающий; 9 – трехфазное трансформаторное корректирующее устройство (ТТКУ)

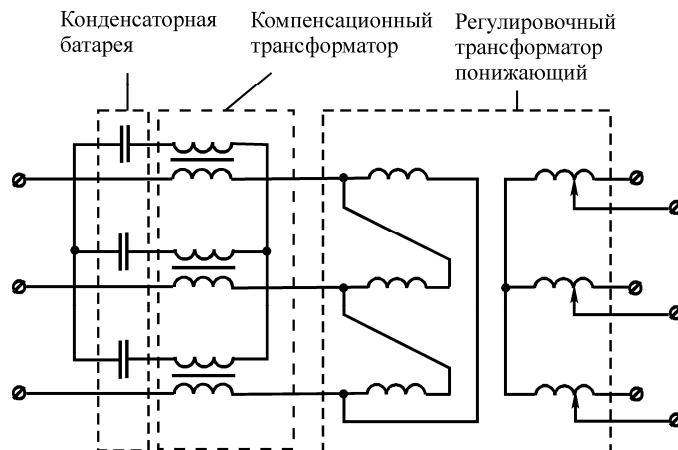


Рис. 2. Принципиальная схема ТТКУ

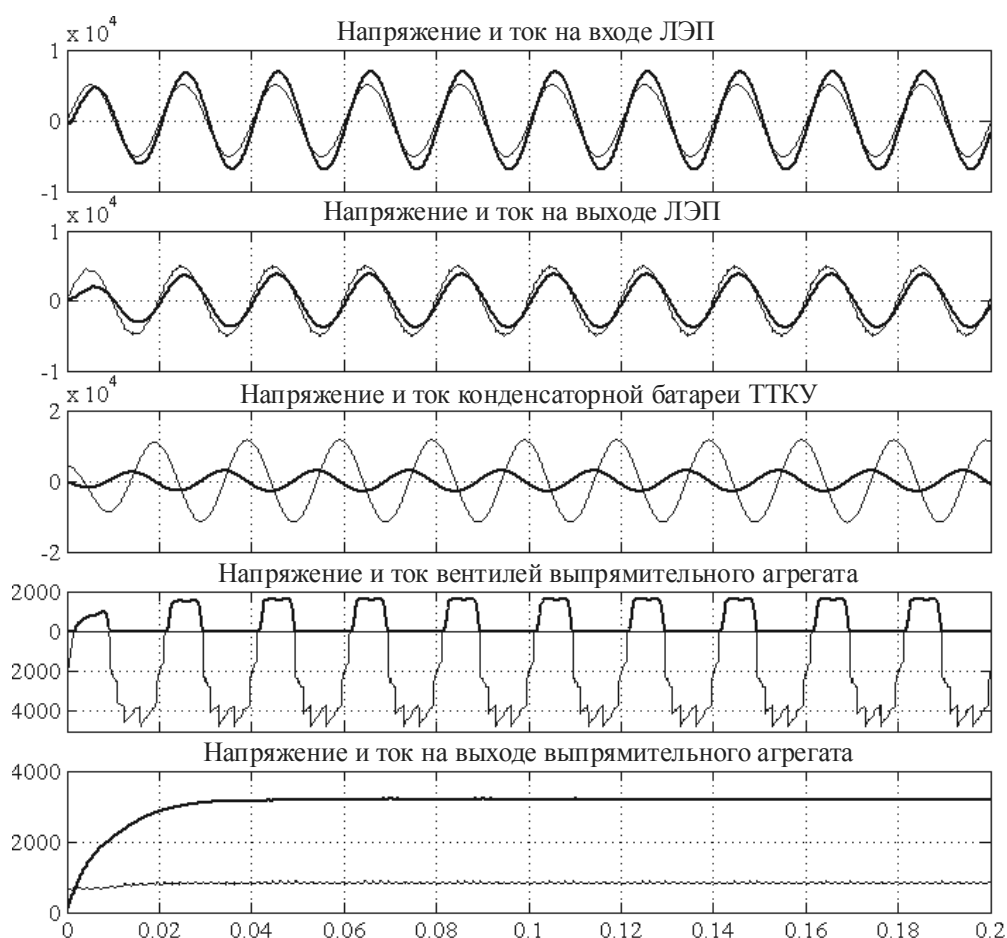


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений и токов системы электроснабжения

компенсирующее устройство здесь работает на более низкой частоте, а именно, на частоте питающей сети. Естественным при этом является возрастание установленной мощности компенсирующего устройства. Однако одновременно увеличиваются и его компенсирующие возможности.

В пакете MATLAB разработана модель и выполнено моделирование электромагнитных процессов в СЭС по схеме (см. рис. 1). На рис. 3 в качестве примера приведены временные диаграммы напряжений и токов на входе и выходе ЛЭП, на конденсаторной батарее компенсирующего устройства, на вентиле выпрямительного агрегата, а также на входах автономных инверторов СЭС. На временных диаграммах толстыми линиями показаны токи, а тонкими – напряжения на элементах СЭС. При моделировании приняты реальные параметры СЭС [9]. В частности, длина ЛЭП принята равной 15 км, прочая нагрузка – 35 % от суммарной нагрузки, коэффициент трансформации повышающего трансформатора – 1,9, коэффициент трансформации понижающего трансформатора – 1,7, мощность компенсационного трансформатора

– 2500 кВА, мощность конденсаторной батареи – 2500 кВАр.

Как и в работе [9] для снижения несинусоидальности напряжения на выходе ЛЭП использован пассивный фильтр одиннадцатой гармоники минимальной установленной мощности по схеме (рис. 4), в основном решающий только задачу компенсации мощности искажения.

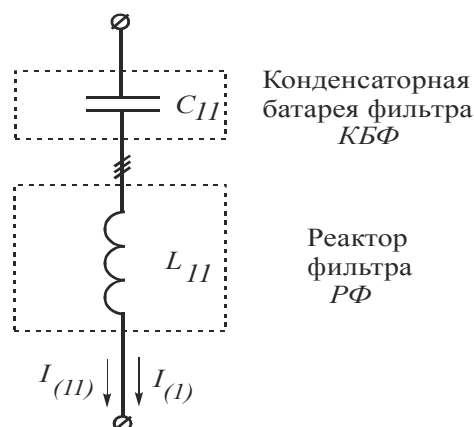


Рис. 4. Принципиальная схема фильтра одиннадцатой гармоники

Проведенными исследованиями показано, что построение СЭС на основе применения элементов гибких линий электропередачи (продольная компенсация реактивной мощности, регулирование напряжения на входе и выходе ЛЭП и др.) позволяет создать системы электроснабжения, обеспечивающие надежное и энергоэффективное электроснабжение БУ. При длине ЛЭП до 10–12 км предпочтительны СЭС с компенсированными выпрямителями, конденсаторы компенсирующих устройств которых работают на повышенной частоте, что обеспечивает существенное снижение установленной мощности компенсирующего оборудования [5–9]. Однако в связи с возможным появлением режима повторной проводимости вентилей в таких выпрямителях, обусловленного тем, что в непроводящую часть периода напряжения на

вентильях могут принимать положительные значения (см. диаграммы напряжения на вентильях на рис. 4 в работе [9]), возможности таких выпрямителей по компенсации реактивной мощности ограничиваются. В рассматриваемых в данной работе СЭС с компенсирующим устройством, работающим на частоте питающей сети, как следует из диаграмм напряжения и тока на вентильях на рис. 3, такого ограничения нет. Поэтому даже для сверхудаленных ЛЭП при значительной прочей нагрузке задача компенсации реактивной мощности полностью решается. Это видно из диаграмм токов и напряжений, как на входе, так и на выходе ЛЭП (см. рис. 3 в данной работе). Применением фильтра обеспечивается необходимое качество напряжения на БУ по несинусоидальности. Проведенными исследованиями также показана возмож-

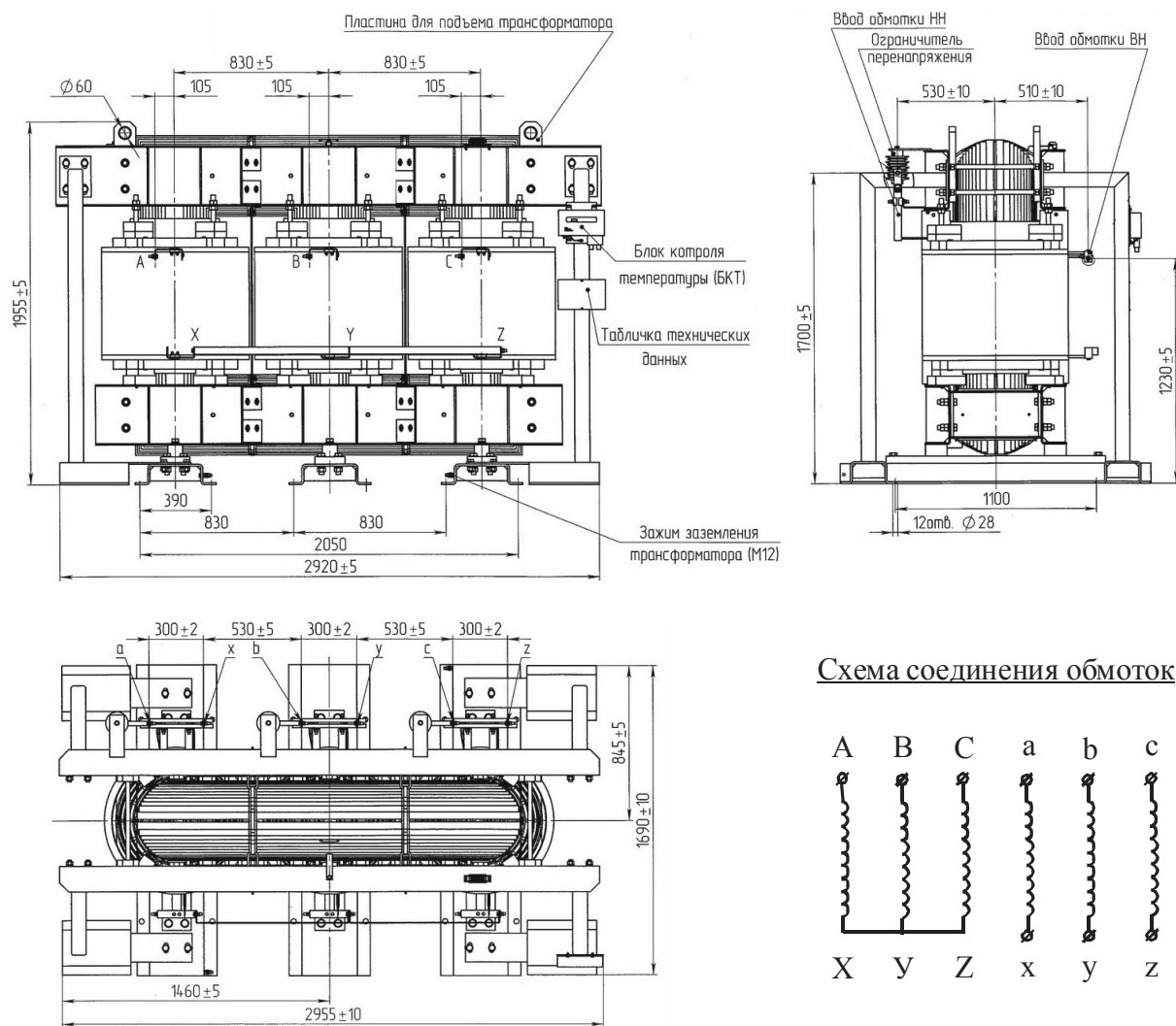


Рис. 5. Конструктивное решение и схема соединения обмоток компенсационного трансформатора ТКУ

ность обеспечения номинальной величины напряжения на работающих сверхудаленных БУ, снижения потерь электрической энергии в ЛЭП за счет примерно полторакратного уменьшения тока в линии по сравнению с суммарным током нагрузки и непревышения допустимого напряжения на БУ в режиме ее холостого хода.

На основании проведенных исследований электромагнитных процессов разработаны технические условия на выполнение предложенных СЭС. Совместно со специалистами ООО НТЦ «Приводная техника» (г. Челябинск) и ООО «Снежинский завод специальных электрических машин» ведется проработка конструктивных решений и модульно-блочного дизайна предложенных систем. На рис. 5 представлен пример «штучной» конструкторской и дизайнерской работы по созданию компенсационного трансформатора ТТКУ.

Трансформатор выполняется на жесткой опорной раме без катков и размещается в блоке цельнометаллического утепленного контейнера со степенью защиты IP54 по ГОСТ 14254-96, оборудованного автоматической системой обогрева и приточно-вытяжной вентиляцией. Для крепления трансформатора к полу контейнера в раме предусмотрены отверстия, а для строповки – крюки и проушины.

Магнитопровод трансформатора выполняется из электротехнической, холоднокатаной, анизотропной, тонколистовой стали марки 3408 (толщина 0,3 мм по ГОСТ 21427.1-83). Шихтовка магнитопровода по технологии «step-lap». Покрытие торцевых частей магнитопровода – композиция ОС-12-03 V.УХЛ2. Толщина покрытия 80–100 мкм.

Система изоляции обмоток воздушно-барьерная (открытые обмотки). Обмотка низкого напряжения – многослойная цилиндрическая сечением 148,15 кв. мм, число витков – 72. Обмотка высокого напряжения непрерывная сечением 59,26 кв. мм, число витков – 180. Проводниковый материал – медь марки ПСДКТ 3,55×8,5 ТУ 16. К71.129-91. Обмотки дважды пропитываются лаком КО-916к и запекаются. Класс нагревостойкости обмоток «F». Вводы трансформатора высокого напряжения (3 шт.) и низкого напряжения (6 шт.) изготавливаются из шинной меди ШМТ сечением соответственно 4×40 и 6×40 мм по ГОСТ 434-78 и располагаются вдоль широких сторон трансформатора в верхней части.

Для защиты изоляции на трансформатор со стороны низкого напряжения устанавливаются ограничители перенапряжений 1 класса типа HDA-12MA-NHF производителя Raychem. Для поочередной индикации температуры трех обмо-

ток и магнитопровода на трансформатор устанавливается блок контроля температуры сухих трансформаторов БКТ-3. Выдача информации по температуре в систему мониторинга подстанции осуществляется по стандартным цифровым интерфейсам связи (RS-232, RS-485).

Трансформатор имеет сейсмостойкое исполнение. Механическая прочность соответствует группе условий эксплуатации М18 по ГОСТ 17516.1–90.

В настоящее время проводятся работы по «системному дизайну» СЭС, предусматривающему компоновку вновь разрабатываемого отдельного оборудования в блоки и органичное вхождение их в состав СЭС и всей БУ.

### Литература

1. Чердабаев Р.Т. Нефть: Вчера, сегодня, завтра / Р.Т. Чердабаев. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2010. – 352 с.
2. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование / Коллектив авторов; под общ. ред. А.М. Гусмана, К.П. Порожского. – Екатеринбург: УГГГА, 2002. – 592 с.
3. Частотно-регулируемый электропривод буровых установок БУ-4200/250 / Б.И. Абрамов, А.И. Коган, Б.М. Бреслав и др. // Электротехника. – 2009. – № 1. – С. 8–13.
4. Чупин, С.А. Современные системы управления механизмами буровых установок российского производства / С.А. Чупин // Энергетика Тюменского региона. – 2008. – № 1. – С. 61–64.
5. Пат. 2400917 Российская Федерация. Компенсированная система электроснабжения разночастотных потребителей электрической энергии / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, С.А. Чупин // Бюл. изобр. – 2010. – № 27.
6. 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.
7. 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(190). – С. 4–10.
8. Федорова, М.Ю. MATLAB-моделирование как средство разработки исходной информации для конструирования и дизайна компенсированной системы электроснабжения буровой уста-

новки / М.Ю. Федорова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 15. – № 15(232). – С. 36–39.

9. Федорова, М.Ю. Повышение энергоэффективности и разработка дизайна систем электро-

снабжения удаленных буровых установок нефтегазодобывающего комплекса / М.Ю. Федорова, Ю.И. Хохлов, А.В. Хлопова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 42–46.

*Поступила в редакцию 04.09.2012 г.*

**Хохлов Юрий Иванович** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет. Специалист в области теоретических основ электротехники, силовой электроники и энергосбережения. Контактный телефон: 8-(351) 267-99-16.

**Khokhlov Yuriy Ivanovich** – Doctor of Science (Engineering), Professor, Corresponding Member of Electrotechnical Sciences Academy of the Russian Federation, Head of Power Supply Systems Department of South Ural State University; specialist in the sphere of theoretical bases for electrical engineering, power electronics and energy saving. Contact telephone number: 8-(351) 267-99-16.

**Федорова Мария Юрьевна** – старший преподаватель кафедры «Дизайн», Южно-Уральский государственный университет. Специалист в области промышленного дизайна. Контактный телефон: 8-(351) 267-94-26.

**Fedorova Mariya Yurievna** – Senior Professor of Design Department of South Ural State University; specialist in the sphere of industrial design. Contact telephone number: 8-(351) 267-94-26.

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

**Shabiev Salavat Galievich** – Doctor of Architecture, Professor, Corresponding Member of International Architecture Academy of Oriental Countries, Dean of Architecture Faculty of South Ural State University, Head of Architecture Department. Specialist in sphere of civil and industrial projects architecture. Contact telephone number: 8-(351) 267-98-24.

**Майер Александр Андреевич** – главный конструктор по трансформаторам ООО «Снежинский завод специальных электрических машин». Специалист в области конструирования трансформаторного и реакторного оборудования. Контактный телефон: 8-(343) 380-75-85.

**Mayer Aleksandr Andreevich** – Chief designer of LLC “Snezhinsk Special Electrical Machines Plant” transformers. Specialist in the sphere of engineering of transformer and reactor equipment. Contact telephone number: 8-(343) 380-75-85.