

УДК 621.315

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-20-26

Анализ перспективных технологий передачи электрической энергии на дальние расстояния

А.С. Куренев, Е.А. Базалев, Д.В. Божанов, Т.В. Выприцкая, М.В. Дубинин, В.С. Еремин,
А.В. Лебедев, С.В. Юферов, А.А. Гусарова, Ю.Р. Салимова

Изучено влияние глобальных и региональных вызовов на перспективные технологии передачи электрической энергии на дальние расстояния и проведен их анализ, исходя из данных Национальной технической инициативы Агентства стратегических инициатив, международной финансовой организации (The World Bank), а также Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации. Для выявления наиболее значимых вызовов и исследования их влияния на социально-экономическую сферу использован метод стратегического анализа (SWOT-анализ), который показал тесную связь глобальных и региональных вызовов.

Основной угрозой для технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния является активное развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что влечет за собой развитие распределенной генерации. Однако, формирование новых крупных удаленных центров генерации на основе ВИЭ открывает перспективы развития технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния. Активное развитие регионов Арктики, формирование глобальных энергоколец, обеспечение энергетической безопасности даст сильный толчок для дальнейшего развития транспорта электроэнергии на дальние расстояния.

Ключевое влияние глобальных вызовов на социальную сферу в разрезе передачи электроэнергии на дальние расстояния имеет обеспечение всех регионов мира доступной электроэнергией в условиях глобально меняющейся энергетики. Электроэнергия должна быть доступна регионам как для личного использования населением региона, так и для создания благоприятных условий функционирования существующих и создания новых энергоёмких градообразующих предприятий. В связи с важностью решения данной проблемы в мире потенциально должна возникнуть потребность в развитии различных технологий передачи электроэнергии на дальние расстояния с максимальной технико-экономической эффективностью.

Наиболее сильное влияние глобальных вызовов на экономическую сферу окажет необходимость постепенного перестроения схем снабжения электроэнергией различных регионов мира. Активная деятельность развитых стран по диверсификации структуры своей энергетики за счет расширения использования неуглеводородных возобновляемых источников энергии, а также по снижению зависимости от стран-экспортеров традиционных энергоносителей приведёт к постепенному сдвигу мировых центров генерации. Напротив, факторы превращения Индии и Китая в основные локомотивы мирового экономического роста, появление новых мировых центров экономического развития в Азии и Латинской Америке повлекут за собой сдвиг мировых центров потребления электроэнергии населением и промышленностью в новые части света.

Обозначенные тренды потребуют динамически изменить существующую структуру производства электроэнергии, потребуются совершенно новые современные адаптивные электрические сети с организацией длинных транзитных линий по территории азиатской части Евразии и Южной Америки. В случае повышения эффективности технологий солнечной генерации возможно появление энергомоств между Африкой и Европейской и Азиатской частями Евразии.

Ключевые слова: линия электропередачи, переменный и постоянный токи, сверхпроводимость, устройства компенсации реактивной мощности.

Для цитирования: Куренев А.С., Базалев Е.А., Божанов Д.В., Выприцкая Т.В., Дубинин М.В., Еремин В.С., Лебедев А.В., Юферов С.В., Гусарова А.А., Салимова Ю.Р. Анализ перспективных технологий передачи электрической энергии на дальние расстояния // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 20—26. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-20-26.

Analysis of Prospective Technologies of Electric Power Transmission over Long Distances

A.S. Kurenev, E.A. Bazalev, D.V. Bozhanov, T.V. Vypritskaya, M.V. Dubinin, V.S. Eremin,
A.V. Lebedev, S.V. Yuferev, A.A. Gusarova, Yu.R. Salimova

The article analyzes the influence of global and regional challenges on the prospective technologies of electric power transmission over long distances. The analysis is carried out proceeding from the data of the National Technical Initiative set forth by the Agency for Strategic Initiatives, the international financial organization (The World Bank), and the Concept of Long-Term Social and Economic Development of the Russian Federation. To identify the most significant challenges and analyze their influence on the social and economic sphere, the strategic analysis method (SWOT analysis) was used, which has shown that global and regional challenges are closely linked with each other.

Active development of renewable energy sources (RES), which entails the development of distributed generation, is the main factor able to compromise the technology of power transmission over long distances. On the other hand, the emergence of new large remote generation centers based on RES opens prospects for developing the technology of power transmission over long distances. Active development Arctic regions, formation of global energy rings, and energy security concerns give a strong impetus for further development of electric power transmission over long distances.

In the context of global challenges in terms of their effect on the social sphere, the technology of power transmission over long distances is seen as an important tool for providing all regions around the world with accessible electric energy under the conditions of globally

changing power industry. Electric power should be accessible to regions for personal use by the population in the region, and for setting up favorable conditions for functioning of existing and creation of new energy-intensive city-forming enterprises. In connection with the importance of solving this problem, a need for development of various long-distance power transmission technologies with the maximum technical and economic efficiency should emerge around the world.

The need for gradually restructuring the electric power supply arrangements in different regions around the world will have the strongest influence on the economy in the context of global challenges. Active efforts taken by developed countries to diversify the structure of their power industries through expanding the use of non-hydrocarbon renewable energy sources and to make them less dependent on countries exporting conventional energy carriers will entail a gradual shift of the world centers of generation. In contrast, the factors that prompt India and China to become the main locomotives of economic growth around the world and the emergence of the world's new economic development centers in Asia and Latin America will entail the shift of the world's centers of electricity consumption by the population and industry toward new parts of the globe.

The above-mentioned tendencies will generate the need to dynamically change the existing structure of electricity production, and a need will arise to use entirely new modern adaptive electric networks with long transit lines over the territory of Eurasian Asian part and South America. If a significant progress is achieved in the efficiency of solar power generation technologies, power bridges may emerge between Africa and Eurasian European and Asian parts.

Key words: power line, alternating current, direct current, superconductivity, reactive power compensation devices.

For citation: Kurenev A.S., Bazalev E.A., Bozhanov D.V., Vypritskaya T.V., Dubinin M.V., Eremin V.S., Lebedev A.V., Yuferev S.V., Gusarova A.A., Salimova Yu.R. Analysis of Prospective Technologies of Electric Power Transmission over Long Distances. Bulletin of MPEI. 2019;3:20—26. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-20-26.

Анализ глобальных и региональных вызовов

Один из главных катализаторов развития мировой энергетики — конвергенция различных областей науки и технологий. Кроме того, существенное влияние на тренды (в долгосрочной перспективе) оказывают следующие факторы: увеличение спроса на энергию, изменение качественных характеристик спроса, смена климата, развитие интеллектуальных систем управления, экологизация экономики, постепенное движение развитых экономик к «неуглеводородному» обществу. Все указанные аспекты создают почву для новых глобальных и региональных вызовов.

В соответствии со Стратегией научно-технологического развития России, «большие вызовы» — это объективно требующая реакции со стороны государства совокупность проблем, угроз и возможностей, сложность и масштаб которых таковы, что они не могут быть решены, устранены или реализованы исключительно за счет увеличения ресурсов [1]. Под глобальными вызовами понимаются проблемы и угрозы, оказывающие влияние в рамках всемирного масштаба, а под региональными — в рамках одного государства.

Влияние глобальных и региональных вызовов на социально-экономическую сферу

К наиболее критичным относятся вызовы, связанные с высокой стоимостью инвестиционных проектов, изменением климата и активным развитием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также дефицитом научных кадров. Также следует учитывать высокую консервативность традиционных энергетических компаний.

Вызовы, связанные с энергетической безопасностью, формированием глобальных энергообъединений, разработкой новых месторождений и развитием энергетической инфраструктуры, положительно влияют на развитие технологий по передаче электроэнергии на дальние расстояния.

Основными угрозами для технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния считаются изменение климата [2] и активное развитие ВИЭ, которое влечет за собой развитие распределенной генерации. С другой стороны, если смотреть на вызов с точки зрения формирования новых крупных удаленных центров генерации на основе ВИЭ, то он, несомненно, открывает новые перспективы развития технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния.

Вызовы анализируются по методу SWOT-анализа (метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды, организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности), Threats (угрозы)).

Оценка влияния наиболее значимых вызовов представлена на рис. 1.

Основой влияния глобальных вызовов на социальную сферу в разрезе передачи электроэнергии на дальние расстояния является обеспечение всех регионов мира доступной электроэнергией в условиях меняющейся энергетики (рис. 2). Электрификация удаленных регионов и их доступ к централизованному электроснабжению, а также создание новых градообразующих предприятий способствуют развитию технологий транспорта электроэнергии на дальние расстояния с максимальной экономической эффективностью.

В рамках технологического направления передачи электроэнергии на дальние расстояния весомо воздействие необходимости постепенного изменения топологии существующих схем электроснабжения различных регионов мира. Деятельность развитых стран по диверсификации структуры энергетики за счет расширения использования неуглеводородных возобновляемых источников энергии [3], а также по снижению зависимости от стран-экспортеров традиционных энергоносителей постепенно сдвигает мировые центры генерации. Превращение Индии и Китая в лидеров мирового



Рис. 1. SWOT-анализ наиболее значимых вызовов

экономического роста, появление новых центров экономического развития в Азии и Латинской Америке влекут за собой перемещение мировых центров потребления электроэнергии населением и промышленностью в новые части света [4, 5].

Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 и 2030 гг. [6] указывают на четыре ключевых сферы (рис. 3).

Наиболее значимый вызов в социальной сфере — обеспечение доступного, надежного и качественного электроснабжения потребителей. Данный фактор должен стать катализатором активного развития электросетевого комплекса в целом, и передачи электроэнергии на дальние расстояния, в частности.

Результаты анализа рис. 3. показывают необходимость научно-практической работы по совершенствованию существующих технологий передачи энергии на дальние расстояния, даже в условиях обострения вызовов [7]. Без активного внедрения технологий будет замедлено развитие конкурентной энергоемкой промышленности, что усложнит формирование своевременных ответов на динамически меняющиеся вызовы. Россия обладает прорывными технологиями в области ВТСП,

что должно быть успешно использовано с учетом влияния глобальных и региональных вызовов [8].

Технологический этап развития дальних электропередач

В настоящее время отрасли генерации, передачи и распределения электроэнергии претерпевают существенные изменения. Основными трендами, задающими направление, являются распределенная генерация, децентрализация, прорывные технологии накопления, передачи и управления энергетическими ресурсами широкого спектра.

Последующими этапами развития дальних электропередач (ДЭП) станут сверхпроводниковые технологии, повышение «гибкости» передач постоянного тока и совершенствование активно-адаптивных устройств [9].

Тенденция к активному использованию объектов постоянного тока в мировой энергетике объясняется рядом технологических, интеллектуальных, экологических преимуществ. Основные этапы развития технологии электропередачи постоянным током (ППТ):

- широкое использование в энергосистемах ППТ на преобразователях тока с тиристорными вентилями для



Рис. 2. Влияние глобальных вызовов в рамках направления передачи электроэнергии на дальние расстояния на социально-экономическую сферу

передачи мощности на дальние расстояния в странах с протяженной территорией;

- повышение класса напряжения ППТ до ультра-высокого (± 1100 кВ) и пропускной способности до 11...12 ГВт;
- разработка и внедрение многотерминальных ППТ на преобразователях тока с напряжением ± 800 кВ;
- активное применение преобразователей напряжения в составе КЛ и ВЛ ППТ пропускной способностью до 1,4 ГВт при классах напряжения до 525 кВ;
- создание многотерминальных ППТ на преобразователях напряжения;

- развитие гибридных электропередач, в том числе многоподстанционных, с использованием преобразователей тока и напряжения.

Для высокотемпературной сверхпроводимости в электроэнергетике наиболее перспективны силовые сверхпроводящие кабели. Интерес к ним определяется фактом размещения мощных источников электроэнергии на больших расстояниях от крупных городов и потребителей электроэнергии, что приводит к необходимости перемещения значительных потоков энергии на дальние расстояния. Внедрение активно-адаптивных устройств позволит увеличить пропускную способ-

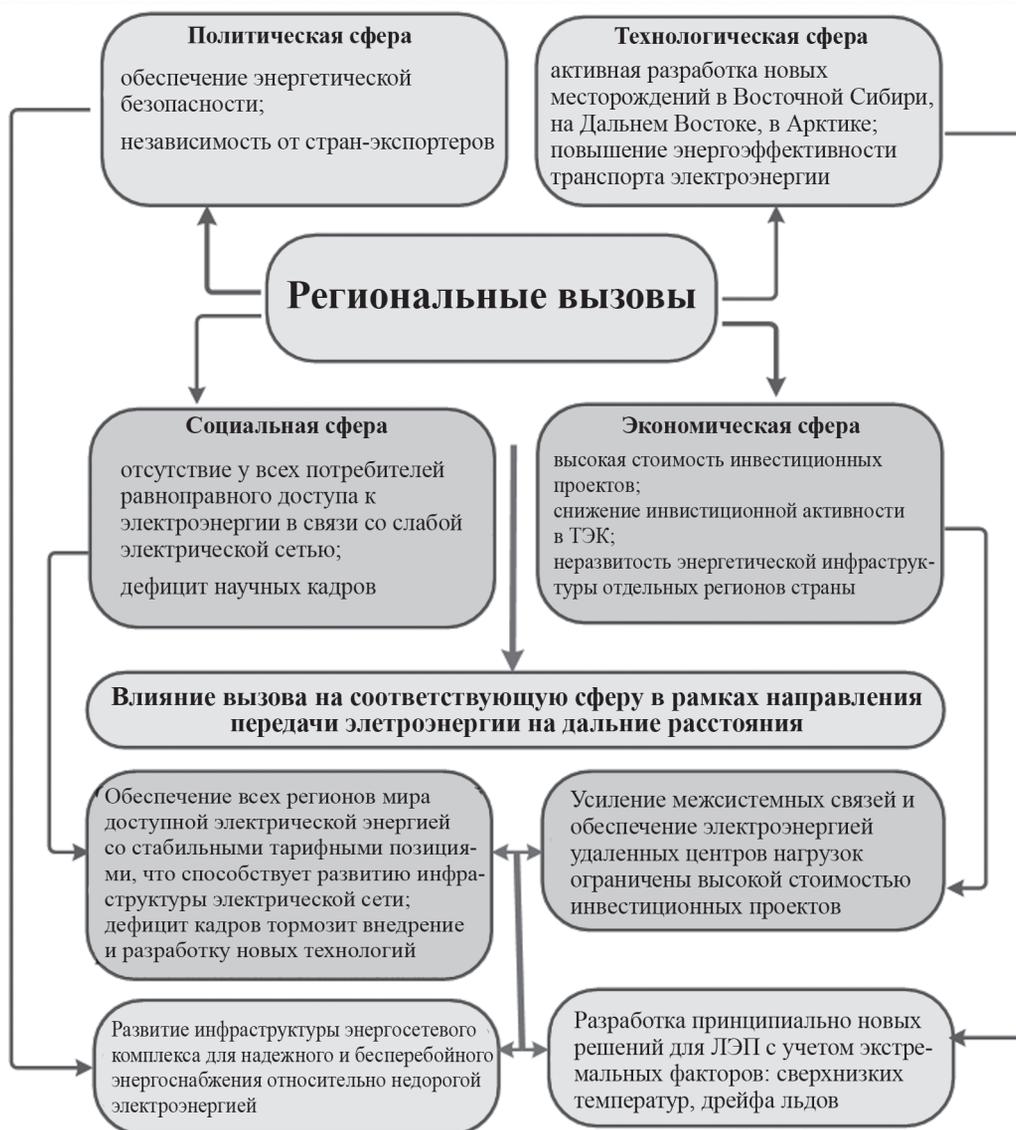


Рис. 3. Влияние региональных вызовов в рамках направления передачи электроэнергии на дальние расстояния на социально-экономическую сферу.

ность существующих линий электропередач переменного тока, вплоть до теплового предела по нагреву, а также обеспечит устойчивый режим работы энергосистемы при различных возмущениях и повысит управляемость сети.

Следующим этапом развития активно-адаптивных устройств станет создание единой системы управления данного оборудования в электросети. Этот шаг позволит наиболее эффективно использовать возмож-

ности устройств и получать более качественный регулирующий эффект.

Таким образом, активное развитие технологий передачи электроэнергии на дальние расстояния с внедрением сверхпроводниковых технологий, повышением «гибкости» передач постоянного тока и совершенствованием активно-адаптивных устройств, внесет существенный вклад в решение наиболее важных существующих глобальных и региональных вызовов.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации № 642 от 01 декабря 2016 г. «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации».
2. **Trends** in Sustainable Development. Towards Sustainable Consumption and Production [Электрон.

References

1. **Ukaz** Prezidenta Rossiyskoy Federatsii № 642 ot 01 Dekabrya 2016 g. «Strategiya Nauchno-tekhnologicheskogo Razvitiya Rossiyskoy Federatsii». (in Russian).
2. **Trends** in Sustainable Development. Towards Sustainable Consumption and Production [Elektron.

ресурс] https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15Trends_in_sustainable_consumption_and_production.pdf (дата обращения 25.05.18).

3. **Global Wind Energy Council** [Электрон. ресурс] <http://gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook/global-wind-energy-outlook-2016/> (дата обращения 24.05.18).

4. **China's Grand Strategy and Energy** [Электрон. ресурс] <http://perthusasia.edu.au/getattachment/Our-Work/Energy-Security-Vol-3-China-s-Grand-Strategy/PUAC-Energy-Security-Program-China-May-2017.pdf.aspx?lang=en-AU> (дата обращения 22.05.18).

5. **China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study** [Электрон. ресурс] <http://www.efchina.org/Attachments/Report/report-20150420/China-2050-High-Renewable-Energy-Penetration-Scenario-and-Roadmap-Study-Executive-Summary.pdf> (дата обращения 04.05.18).

6. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации № 1662-р от 17 ноября 2008 г. «Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года».

7. **Гребенюк А.Ю. и др.** Прогноз научно-технологического развития России: 2030. Биотехнологии. М.: ВШЭ, 2014.

8. **Крупнейший** в мире проект по внедрению ВТСП кабельных линий в энергетику [Электрон. ресурс] <https://www.втсп-кабель.рф> (дата обращения 12.05.18).

9. **Кочкин И.В., Шакарян Ю.Г.** Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: Торус Пресс, 2011.

Resurs] https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15Trends_in_sustainable_consumption_and_production.pdf (Data Obrashcheniya 25.05.18).

3. **Global Wind Energy Council** [Elektron. Resurs] <http://gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook/global-wind-energy-outlook-2016/> (Data Obrashcheniya 24.05.18).

4. **China's Grand Strategy and Energy** [Elektron. Resurs] <http://perthusasia.edu.au/getattachment/Our-Work/Energy-Security-Vol-3-China-s-Grand-Strategy/PUAC-Energy-Security-Program-China-May-2017.pdf.aspx?lang=en-AU> (Data Obrashcheniya 22.05.18).

5. **China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study** [Elektron. Resurs] <http://www.efchina.org/Attachments/Report/report-20150420/China-2050-High-Renewable-Energy-Penetration-Scenario-and-Roadmap-Study-Executive-Summary.pdf> (Data Obrashcheniya 04.05.18).

6. **Rasporyazhenie** Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 1662-r ot 17 Noyabrya 2008 g. «Kontseptsiya Dolgosrochnogo Sotsial'no-ekonomicheskogo Razvitiya Rossiyskoy Federatsii na Period do 2020 goda». (in Russian).

7. **Grebenyuk A.Yu. i dr.** Prognoz Nauchno-tekhnologicheskogo Razvitiya Rossii: 2030. Biotekhnologii. M.: VSHE, 2014. (in Russian).

8. **Krupneyshiy v Mire** Proekt po Vnedreniyu VTSP Kabel'nykh Liniy v Energetiku [Elektron. Resurs] <https://www.vtsp-kabel.rf> (Data Obrashcheniya 12.05.18). (in Russian).

9. **Kochkin I.V., Shakaryan Yu.G.** Primenenie Gibkikh (Upravlyаемых) Sistem Elektroperedachi Peremennogo Toka v Energosistemakh. M.: Torus Press, 2011. (in Russian).

Сведения об авторах:

Куренев Александр Сергеевич — инженер первой категории группы автоматизированных систем управления технологическими процессами службы РЗА и АСУ ТП Хабаровского ПМЭС — филиала ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: kurenev-as@hpmes.khv.ru

Базалев Евгений Александрович — инженер по метрологии второй категории отдела метрологического обеспечения Центрального ПМЭС — филиала ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: Bazalev-EA@zs.fsk-ees.ru

Божанов Денис Витальевич — электромонтер по ремонту аппаратуры релейной защиты и автоматики пятого разряда службы РЗА Хакасского ПМЭС — филиала ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: bozhanov-dv@sibir.fsk-ees.ru

Выприцкая Татьяна Владимировна — инженер второй категории отдела оперативно-технологического управления Центра управления сетями Волго-Донского ПМЭС — филиала ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: vypritskaya@vdpmes.ru

Дубинин Михаил Владимирович — главный специалист ПС 500 кВ Азот Самарского ПМЭС — филиала ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: mikhail_dubinin_tlt@mail.ru

Еремин Вячеслав Сергеевич — главный специалист по релейной защите и автоматике отдела противоаварийной автоматики службы РЗА и АСУ ТП МЭС Юга — филиала ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: eremin_vs@umes.kmv.ru

Лебедев Алексей Владимирович — главный специалист службы эксплуатации и диагностики ПС МЭС Северо-Запада — филиала ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: Lebedev-AV@sz.fsk-ees.ru

Юферев Сергей Валентинович — инженер первой категории отдела формирования балансов и расчета потерь службы оказания услуг по передаче электроэнергии МЭС Урала — филиала ПАО «ФСК ЕЭС», e-mail: Yuferev-SV@ural.fsk-ees.ru

Гусарова Анастасия Александровна — главный специалист Центра удаленного управления и безопасности АО «НТЦ ФСК ЕЭС», e-mail: gusarova_aa@ntc-power.ru

Салимова Юлия Радиковна — инженер-проектировщик проектно-конструкторского отдела АО «НТЦ ФСК ЕЭС», e-mail: Salimova_YR@ntc-power.ru

Information about authors:

Kurenev Aleksandr S. — Engineer of the First Category of the Automated Control Systems of Technological Processes of the Service of Relay Protection and Automation, and Economics in Khabarovsk PMES — Branch of PJSC «FGC UES», e-mail: kurenev-as@hpmes.khv.ru

Bazalev Evgeniy A. — Metrology Engineer of the Second Category of the Department of Metrological Support of the Central PMES — Branch of PJSC «FGC UES», e-mail: Bazalev-EA@zs.fsk-ees.ru

Bozhanov Denis V. — Electrician for Repair of Relay Protection and Automatics of the Fifth Category of Service, RZA Khakassia PMES — Branch of PJSC «FGC UES», e-mail: bozhanov-dv@sibir.fsk-ees.ru

Vypritskaya Tatyana V. — Engineer of the Second Category of the Department of Operational and Technological Management of the Network Management Center of Volga-Don PMES — Branch of PJSC «FGC UES», e-mail: vypritskaya@vdpmes.ru

Dubinin Mikhail V. — Chief Specialist of 500 kV Nitrogen Samara PMES — Branch of PJSC «FGC UES», e-mail: mikhail_dubinin_tlt@mail.ru

Eremin Vyacheslav S. — Chief Specialist of Relay Protection and Automation of the Department Emergency Automation of the Service of Relay Protection and Automation and Automated Process Control System MES South — Branch of PJSC «FGC UES», e-mail: eremin_vs@umes.kmv.ru

Lebedev Aleksey V. — Chief Specialist of the Operation Service and Diagnosis of the Substation of MES North-West — Branch of PJSC «FGC UES», e-mail: Lebedev-AV@sz.fsk-ees.ru

Yuferev Sergey V. — Engineer First Category of Department of Formation of Balances and Losses Calculation Service of Rendering of Services in Electric Power Transmission of MES of Urals — Branch of PJSC «FGC UES», e-mail: Yuferev-SV@ural.fsk-ees.ru

Gusarova Anastasiya A. — Chief Specialist of the Remote Control and Security Center of JSC «NTC FGC UES», e-mail: gusarova_aa@ntc-power.ru

Salimova Yuliya R. — Engineer-designer of Design Department of JSC «NTC FGC UES», e-mail: Salimova_YR@ntc-power.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 22.06.2018

The article received to the editor: 22.06.2018