

Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов, М.А. Шурупов

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОБЪЕКТОВ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ
ВОЗМУЩЕНИЯМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ПЕРИОДЫ
ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Статья посвящена обеспечению надежности и безопасности работы объектов электроэнергетики в условиях воздействия геоиндуцированных токов, генерируемых возмущениями магнитного поля Земли в периоды геомагнитных бурь. Рассматриваются мероприятия по этой проблеме, включенные в проект «Стратегия обеспечения безопасности Единой энергетической системы России в условиях естественных и искусственных электромагнитных воздействий». Сформулированы пути повышения надежности работы объектов электроэнергетики для предотвращения вероятных чрезвычайных ситуаций в регионах России с повышенным уровнем геоиндуцированных токов.

Ключевые слова: электроэнергетика, чрезвычайная ситуация, надежность, безопасность, информационно-управляющие системы, геомагнитные бури, возмущения магнитного поля, электромагнитная защищенность.

E.P. Grabchak, E.L. Loginov, M.A. Shurupov

INCREASING THE OPERATION RELIABILITY OF POWER PLANTS
UNDER IMPACT CONDITIONS GEOINDUCTED CURRENTS
GENERATED DISTURBANCES OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD
DURING GEOMAGNETIC STORM

The article is devoted to ensuring the reliability and safety of the operation of electric power facilities under the influence of geoelectric currents generated by disturbances of the Earth's magnetic field during periods of geomagnetic storms. Measures on this problem, included in the draft "Strategies for ensuring the security of the Unified Energy System of Russia in the conditions of natural and artificial electromagnetic influences" are considered. The ways of increasing the reliability of the electric power facilities to prevent possible emergencies in the regions of Russia with an increased level of geoelectric currents are formulated.

Keywords: electric power industry, emergency situation, reliability, safety, information and control systems, geomagnetic storms, magnetic field disturbances, electromagnetic protection.

Введение

Серьезной угрозой для энергетической инфраструктуры являются геомагнитно-индуцированные токи в проводящих системах, вызванные резкими изменениями геомагнитного поля [5].

Проблемой, затрудняющей предотвращение чрезвычайных ситуаций в электроэнергетике, связанных с воздействием геоиндуцированных токов, генерируемых возмущениями магнитного поля Земли в периоды геомагнитных бурь, является отсутствие актуаль-

Грабчак Евгений Петрович

кандидат экономических наук, заместитель Министра энергетики Российской Федерации. Министерство энергетики Российской Федерации, Москва. Сфера научных интересов: энергетика, информатика, экономика. Автор более 100 опубликованных научных работ. Электронный адрес: Grabchak.eugene@gmail.com

Логинов Евгений Леонидович

доктор экономических наук, профессор Российской академии наук, дважды лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, начальник службы Ситуационно-аналитического центра Министерства энергетики Российской Федерации, Москва. Сфера научных интересов: энергетика, информатика, экономика. Автор более 600 опубликованных научных работ. Электронный адрес: evgenloginov@gmail.com

Шурупов Михаил Алексеевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории мощных электромагнитных воздействий. Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва. Сфера научных интересов: физика, энергетика, информатика. Автор более 30 опубликованных научных работ. Электронный адрес: m.a.shurupov@mail.ru

ных методик, стандартов и другой нормативной документации, полноценно регламентирующих требования по электромагнитной защищенности объектов Единой энергетической системы (далее – ЕЭС) России, в настоящий момент и предупреждающих возможные перспективные риски и угрозы преднамеренного применения электромагнитного импульса (далее – ЭМИ) как отдельно, так и в сочетании с природными явлениями (геомагнитными бурями) [3].

Геомагнитные бури как угроза работе электроэнергетической инфраструктуры

Геомагнитные бури (далее – ГМБ) являются причиной разнообразных чрезвычайных ситуаций, в первую очередь функциональных нарушений и аварий электрооборудования в системах проводной связи, электроэнергетических системах, системах сигнализации и связи на железнодорожном транспорте, системах антикоррозионной защиты магистральных нефтегазопроводов [1].

Основным негативным фактором воздействия ГМБ является генерирование геоиндуцированных токов (далее – ГИТ), возникающих в протяженных наземных и подземных проводящих коммуникациях, имеющих гальваническую связь с окружающей землей не менее чем в двух пространственно разделенных точках. В случае протекания указанных токов в трансформаторном оборудовании может произойти смещение рабочей точки вдоль кривой намагничивания сердечника, что приведет к его насыщению. Последнее провоцирует многократное возрастание токов намагничивания, что имеет серьезные негативные последствия, вплоть до выхода оборудования из строя и иных аварийных ситуаций. Масштабность воздействия ГМБ позволяет ожидать одновременного инициирования аварийных ситуаций в множестве точек энергосистемы, что несет потенциальные ри-

ски каскадных отключений оборудования. Подобное негативное влияние геомагнитных возмущений особенно актуально для северных (арктических) районов, что подтверждается событиями в конце прошлого века в США и Канаде.

Продолжающееся расширение высоковольтных электрических сетей, рост связи между ними, увеличение нагрузки и переход на низкоомные линии электропередачи с более высоким напряжением приводят к увеличению вероятности отказов во время космических электромагнитных явлений. Расширение линий передачи за последние несколько десятилетий сделало энергосистему эквивалентом большой антенны, которая электромагнитно связана с воздействиями, создаваемыми возмущениями магнитосферы Земли.

Для примера: электросеть Hydro Quebec 13 марта 1989 года вышла из строя при геомагнитно-индуцированных возмущениях примерно ~ 480 нТл/мин по региону. Произошло отключение электроэнергии по всей провинции через 92 секунды от начала воздействия. Уровни возмущений более 2000 нТл/мин ранее наблюдались по крайней мере трижды во второй половине XX века на геомагнитных широтах, оказывающих влияние на энергосистему Северной Америки, это август 1972-го, июль 1982-го и март 1989 года.

Система мониторинга геоиндуцированных токов

Несмотря на большое внимание, удаляющееся в настоящее время развитию арктических регионов Российской Федерации, в нашей стране отсутствует единая глобальная система мониторинга геомагнитных возмущений и геоиндуцированных токов.

В 2011 году Кольским научным центром РАН совместно с Полярным геофизическим институтом создана единственная локальная система мониторинга геоиндуцированных токов в нейтральных трансформаторов.

Накоплен массив информации о влиянии геомагнитных возмущений на электрическую сеть протяженностью 800 км. Измерений в фазах не проводилось ввиду отсутствия разрешения со стороны собственника линий электропередачи (далее – ЛЭП), хотя указанные измерения необходимы для полноты данных о степени влияния ГИТ на оборудование энергосети.

Для корректной оценки степени угрозы геомагнитных возмущений в отношении протяженных энергосистем необходимо провести мероприятия по наработке научно-технического обеспечения глобальных исследований влияния геоиндуцированных токов, вызванных магнитными бурями, на надежность ЕЭС России. Полученные целевым образом данные о геомагнитной активности позволят провести корреляционный анализ нештатных событий на исследованных энергосистемах с масштабными процессами в магнитосфере Земли.

Наработка научно-технического обеспечения глобальных исследований влияния геоиндуцированных токов, вызванных магнитными бурями, на надежность ЕЭС России

Для решения вышеописанных проблем Минэнерго России совместно с Объединенным институтом высоких температур РАН разработан проект Стратегии обеспечения безопасности Единой энергетической системы России в условиях естественных и искусственных электромагнитных воздействий (далее – проект Стратегии).

В проекте Стратегии обеспечения безопасности ЕЭС России в условиях естественных и искусственных электромагнитных воздействий (программа) включен раздел, посвященный исследованию влияния геоиндуцированных токов, вызванных магнитными бурями, на надежность ЕЭС России.

Проект Стратегии предусматривает:

Повышение надежности работы объектов электроэнергетики в условиях ...

- развитие существующей системы мониторинга геоиндуцированных токов в магистральных электрических сетях в регионах России с повышенным уровнем геоиндуцированных токов;
- выявление объектов электроэнергетики в регионах России с повышенным уровнем геоиндуцированных токов, потенциально подверженных негативному воздействию геомагнитных возмущений;
- разработка требований к выбору и проектированию оборудования электрических сетей, функционирующих в районах с повышенным уровнем геоиндуцированных токов.

Для повышения надежности работы объектов электроэнергетики и предотвращения вероятных чрезвычайных ситуаций в регионах России с повышенным уровнем геоиндуцированных токов предлагается следующее.

1. Исследование воздействий, индуцированных ионосферными токами геомагнитных возмущений, на оборудование технологических систем северных регионов; анализ данных мониторинга геомагнитных воздействий на магистральные сети 330 кВ Кольской энергосистемы, сопоставление их с данными магнитосферных станций Баренцрегиона.

2. Разработка технических средств и программного обеспечения для глобальной системы мониторинга геоиндуцированных токов на территории России, включая Арктический регион.

3. Создание региональных систем мониторинга воздействий геомагнитных возмущений на оборудование технологических систем в регионах России с повышенным уровнем геоиндуцированных токов.

4. Разработка моделей воздействия геомагнитных бурь на наземные технологические объекты, численное моделирование воздействия ГИТ на автотрансформаторы магистральных линий и тупиковых подстанций для оценки возможного негативного влияния на их функционирование [6].

5. Анализ оперативных схем электрических сетей энергосистем в различных режимах работы и оценка степени негативного воздействия на конкретное оборудование для принятия решения о необходимости его защиты.

6. Исследование эффективности технических и организационных мероприятий для уменьшения негативного воздействия геомагнитных возмущений на технологические системы.

7. Разработка технических условий и требований к выбору и проектированию оборудования и объектов технологических систем, функционирующих в районах, подверженных негативному воздействию геомагнитных возмущений.

Программа модификации ионосферы с целью имитации магнитных бурь

Ранее США проводили испытания и активно использовали антенный комплекс HAARP, в том числе для ионосферного рассеивания высокочастотных радиоволн при управлении гидрометеорологическими явлениями, что могло привести к инициированию территориально сконцентрированных очаговых перепадов температур, массивному выпадению осадков, организации на больших территориях засухи и лесных пожаров и др. [4].

Таким образом, актуальной задачей является разработка новых физических и геофизических методов создания долгоживущих плазменных образований в ионосфере, а также электромагнитного излучения, влияющих на работоспособность информационно-управляющих систем в энергетике в аспекте предотвращения чрезвычайных ситуаций [2]. Для

полноценного описания рассматриваемых явлений необходимо верифицировать существующие и вновь разрабатываемые модели на реальных экспериментальных данных.

Решением проблемы является создание новых технологий на основе инъекции в ионосферу высокоскоростных плазменных струй, приводящая к образованию долгоживущих областей с контролируемым изменением характеристик, вторичного электромагнитного излучения, а также возбуждению системы «ионосфера – магнитосфера» в целом.

Для развития данного направления предложены следующие мероприятия.

1. Развитие расчетных моделей и численный анализ возможных воздействий на ионосферу.

2. Разработка исходных данных для практической реализации программы модификации ионосферы с целью имитации магнитных бурь.

3. Разработка, изготовление и наземная отработка генераторов высокоэнергичных потоков плотной плазмы.

4. Разработка диагностических систем для размещения на ракетных носителях и на земле.

При получении исходных требований для масштабного эксперимента целесообразна разработка с участием Российской академии наук отдельной программы с целью проведения экспериментов по модификации ионосферы.

Заключение

Для комплексного повышения устойчивости энергетических объектов в регионах России с повышенным уровнем геоиндуцированных токов и предотвращения чрезвычайных ситуаций необходимо решать как локальные задачи защиты оборудования от внешнего искусственного электромагнитного воздействия, так и глобальную задачу стойкости топологии сети к масштабным электромагнитным воздействиям геоиндуцированных токов, генерируемых возмущениями магнитного поля Земли в периоды геомагнитных бурь, или множеству аналогичных, но локальных событий явного и латентного характера.

Литература

1. Анализ результатов многолетнего мониторинга токов в нейтральных автотрансформаторов / В.Н. Селиванов, М.Б. Баранник, В.А. Билин [и др.] // Вестник МГТУ. 2018. № 1. С. 607–615.
2. Грабчак Е.П., Григорьев В.В., Логинов Е.А. Поддержание работы управляющих систем энергетической инфраструктуры в условиях воздействий электромагнитного импульса природного или техногенного происхождения // Новые информационные технологии и системы: сборник научных статей по материалам XVII Международной научно-технической конференции. Пенза: Пензенский государственный университет, 2020. С. 3–5.
3. Грабчак Е.П., Логинов Е.А. Комплексные подходы к защите систем автоматики и информационных сетей сложных энергетических объектов от естественных или искусственных электромагнитных воздействий критического характера // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность-2020): материалы II Международной научно-практической конференции. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2020. С. 8–10.

4. Грабчак Е.П., Логинов Е.А. Проблемы защиты информационных систем и систем автоматического и автоматизированного управления в электроэнергетике от космических и воздушных средств создания сигналов помех и воздействия ЭМИ // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2020. С. 307–1–307–3.
5. Грабчак Е.П., Логинов Е.А. Противодействие угрозам воздействия электромагнитного импульса: стратегические подходы к защите критической энергетической инфраструктуры в США // Вестник Российского нового университета. Серия: сложные системы: модели, анализ и управление. 2021. № 2. С. 74–84.
6. Ефимов Б.В., Селиванов В.Н. Комплексные исследования внешних воздействий на электрические сети Кольской энергосистемы // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 10. С. 34–35.

References

1. Selivanov V.N., Barannik M.B., Bilin V.A. (2018) *Analiz rezul'tatov mnogoletnego monitoringa tokov v nejtralyah avtotransformatorov* [Analysis of the results of long-term monitoring of currents in the neutrals of autotransformers]. *Vestnik MGTU*, no. 1, pp. 607–615 (in Russian).
2. Grabchak E.P., Grigor'ev V.V., Loginov E.L. (2020) *Podderzhanie raboty upravlyayushchih sistem energeticheskoy infrastruktury v usloviyah vozdeystvij elektromagnitnogo impul'sa prirodnogo ili tekhnogennoho proiskhozhdeniya* [Maintaining the operation of the control systems of the energy infrastructure under the influence of an electromagnetic pulse of natural or technogenic origin]. *Novye informacionnye tekhnologii i sistemy. Sbornik nauchnyh statej po materialam XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [New information technologies and systems: a collection of scientific articles based on the materials of the XVII International Scientific and Technical Conference]. Penza, Penzenskij gosudarstvennyj universitet, pp. 3–5 (in Russian).
3. Grabchak E.P., Loginov E.L. (2020) *Kompleksnye podhody k zashchite si-stem avtomatiki i informacionnyh setej slozhnyh energeticheskikh ob"ek-tov ot estestvennyh ili iskusstvennyh elektromagnitnyh vozdeystvij kriticheskogo haraktera* [Integrated approaches to the protection of automation systems and information networks of complex energy facilities from natural or artificial electromagnetic influences of a critical nature]. *Problemy obespecheniya bezopasnosti (Bezopasnost'–2020): materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Problems of security (Safety-2020): materials of the II International scientific-practical conference]. Ufa, Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tekhnicheskij universitet, pp. 8–10 (in Russian).
4. Grabchak E.P., Loginov E.L. (2020) *Problemy zashchity informacionnyh sistem i sistem avtomaticheskogo i avtomatizirovannogo upravleniya v elektroenergetike ot kosmicheskikh i vozdušnyh sredstv sozdaniya signalov pomekh i vozdeystviya EMI* [Problems of protection of information systems and systems of automatic and automated control in the electric power industry from space and air means of creating interference signals and the impact of EMP]. *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika. Sbornik materialov V Vserossijskoj nauchno-*

prakticheskoy konferencii [Energy and energy saving: theory and practice: collection of materials of the V All-Russian scientific and practical conference]. Kemerovo, Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, pp. 307–1–307–3 (in Russian).

5. Grabchak E.P., Loginov E.L. (2021) *Protivodejstvie ugrozam vozdej-stviya elektromagnitnogo impul'sa: strategicheskie podhody k zashchite kriticheskoy energeticheskoy infrastruktury v SSHA* [Countering Electromagnetic Pulse Threats: Strategic Approaches to Protecting Critical Energy Infrastructure in the United States]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, no. 2, pp. 74–84 (in Russian).

6. Efimov B.V., Selivanov V.N. (2015) *Kompleksnye issledovaniya vneshnih vozdeystvij na elektricheskie seti Kol'skoj energosistemy* [Comprehensive studies of external influences on the electrical networks of the Kola energy system]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN*, no. 10, pp. 34–35 (in Russian).