

УДК 550.377

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ НА ОБЪЕДИНЕННУЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ ЦЕНТРА РОССИИ

© 2023 г. А. А. Тренькин<sup>1</sup>, С. В. Воеводин<sup>1</sup>, О. Н. Коблова<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН В. Д. Селемир<sup>1</sup>, В. В. Вахнина<sup>2,\*</sup>, А. А. Кувшинов<sup>2</sup>, А. Н. Черненко<sup>2</sup>

Поступило 30.08.2022 г.

После доработки 30.08.2022 г.

Принято к публикации 12.10.2022 г.

Представлены результаты расчетного моделирования воздействия ожидаемых при сильной магнитной буре геоиндуцированных токов на Объединенную энергетическую систему Центра России. Показано, что при таком воздействии возникает комплекс факторов, способный вызвать развитие системной аварии: значительное снижение напряжения на ряде объектов энергетической системы, массовое отключение линий электропередачи действием релейной защиты и недопустимый нагрев элементов конструкций некоторых силовых трансформаторов.

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, геомагнитная буря, геоиндуцированный ток, подмагничивание трансформаторов, системная авария

DOI: 10.31857/S2686740023010108, EDN: UNPFOP

Во время геомагнитных бурь (ГМБ) в земной коре возникают геоиндуцируемые токи (ГИТ), которые втекают в глухозаземленные нейтрали силовых трансформаторов (СТ) и вызывают их подмагничивание. В результате чего происходит значительное увеличение тока намагничивания СТ, рост потребляемой ими реактивной мощности, генерация высших гармоник, недопустимый нагрев элементов конструкции СТ [1–9]. Указанные факторы могут являться причиной повреждения мощного оборудования, сбоев в работе систем релейной защиты (РЗ) и автоматики и вызывать крупные системные аварии.

Негативные воздействия ГИТ на электроэнергетические системы (ЭЭС) с высоким экономическим ущербом неоднократно происходили во время сильных магнитных бурь, преимущественно в высокоширотных районах [4–6]. В этой связи многие промышленно развитые страны предпринимают значительные усилия, направленные на защиту или снижение тяжести последствий от негативных воздействий космической погоды и других электромагнитных факторов на свою критическую инфраструктуру.

Актуальность повышения надежности электроснабжения не только в высокоширотных областях связана с тем, что с ростом интенсивности ГМБ области максимального воздействия смещаются в направлении низких широт. При сильных ГМБ максимальное воздействие ожидается на магнитных широтах 40°–60° [10], куда попадает энергонасыщенная часть территории России.

Для расчета режимов работы Объединенной энергетической системы (ОЭС) Центра России при воздействии ГИТ разработана ее модель, включающая наиболее мощные объекты (электрические станции, трансформаторные подстанции) и линии электропередачи (ЛЭП), образующие электрическую сеть с номинальным напряжением 500 и 750 кВ (рис. 1). В модель входят 10 электростанций, 31 подстанция, 12 ЛЭП 750 кВ и 61 ЛЭП 500 кВ. Связь со смежными ОЭС осуществляется через подстанции: три выхода 750 кВ и шесть – 500 кВ.

Исходные данные по параметрам индуцируемого при ГМБ геоэлектрического поля взяты из американского стандарта [11], что обусловлено отсутствием отечественной нормативной документации, касающейся вопросов воздействия ГМБ на ЭЭС.

Ввиду сложности решаемой задачи для исследования воздействия ГМБ на ЭЭС выделен ряд наиболее существенных эффектов – изменение реактивной мощности и температуры элементов конструкции СТ при их подмагничивании, а также работа РЗ ЛЭП. Исходя из этого, была развита

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская область, Россия

<sup>2</sup> Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Самарская область, Россия

\*E-mail: vvhahina@yandex.ru

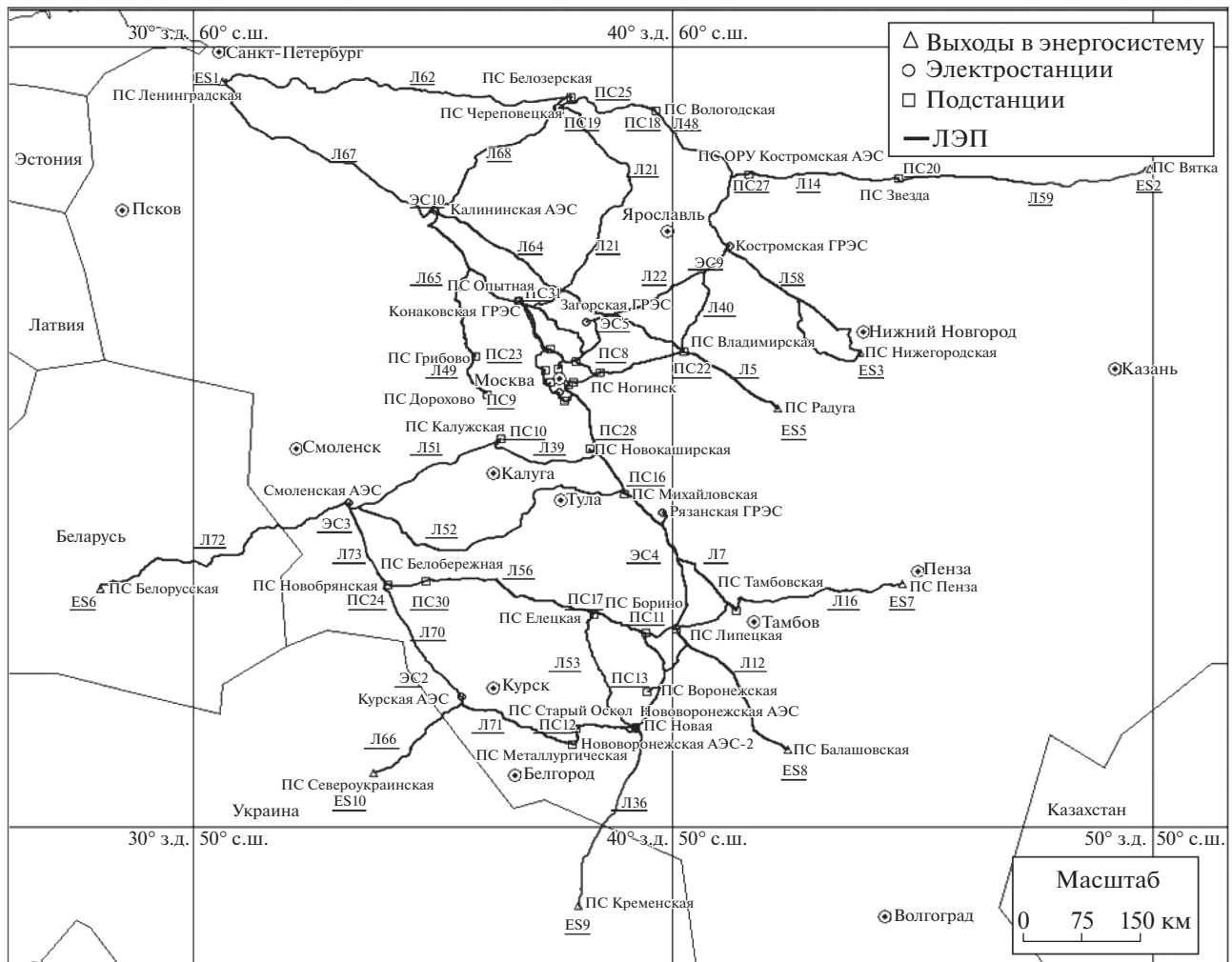


Рис. 1. Расположение объектов модели ОЭС Центра.

методология моделирования (рис. 2), заключающаяся в следующем.

Интегрирование вектора напряженности геоэлектрического поля вдоль трасс ЛЭП дает вариации напряжения между заземляющими устройствами СТ. Для каждого силового трансформатора проводятся расчеты величины тока подмагничивания  $i_0$ , вычисляется временная зависимость потерь реактивной мощности  $\Delta Q_p$ , вызванная насыщением магнитных систем СТ [12]. Результаты определения  $\Delta Q_p$  на объектах (Q-модель) являются исходными данными для расчета “утяжеленных” (послеаварийных) установившихся режимов и оценки нагрева элементов конструкции СТ.

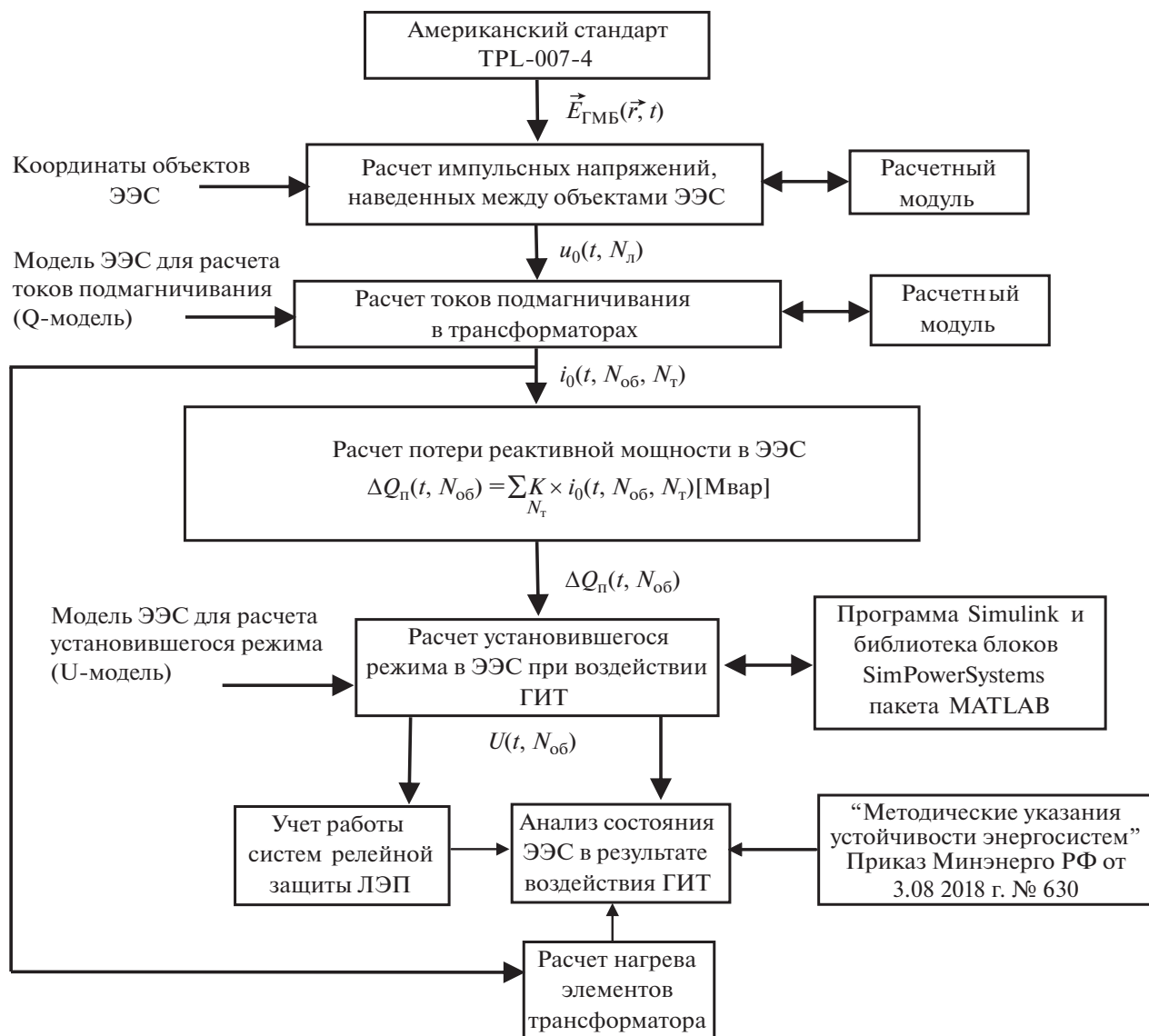
Расчеты исходного и последующих утяжеленных режимов проводятся с использованием соответствующей модели (U-модель), построенной с учетом полных схем замещения электроэнергетических объектов. При этом на стороне высокого напряжения СТ подключается дополнительная,

вызванная ГИТ, изменяющаяся во времени реактивная нагрузка. Затем рассчитываются действующие значения напряжений на шинах объектов и согласно нормативным требованиям [13] оценивается степень влияния воздействий ГИТ на модель ОЭС Центра.

Эффект форсировки возбуждения генераторов электростанций моделировался путем увеличения перед началом расчетов на 50% уровня вырабатываемой ими реактивной мощности по сравнению с номинальным.

При моделировании работы систем РЗ, а именно III ступени дистанционной защиты, было принято, что характеристика ее срабатывания для всех линий соответствует характеристике, реализованной в шкафу защиты типа ШЭ2710-521.

Также выполнялись расчеты температуры наиболее нагретой точки СТ – прессующей (стяжной) пластины при его намагничивании [9]. При этом полагалось, что параметры тепловой



**Рис. 2.** Блок-схема расчетного моделирования воздействия ГИТ на ЭЭС.  $\vec{E}_{ГМБ}$  – напряженность электрического поля на поверхности земли при ГМБ;  $u_0$  – импульс напряжения, индуцируемый между объектами;  $i_0$  – ток подмагничивания трансформатора;  $N_{об}$ ,  $N_L$ ,  $N_T$  – соответственно, номера объектов (электростанции или подстанции), линий электропередачи, трансформаторов на объекте;  $\Delta Q_p$  – потери реактивной мощности, вызванные подмагничиванием трансформатора.

модели СТ такие же, как у однофазного мощностью 167 МВ·А напряжением 400 кВ из [14].

В результате моделирования получено, что максимальная суммарная потеря реактивной мощности в силовых трансформаторах ОЭС Центра из-за воздействия ГИТ составляет 20% от ее суммарной генерации. Наиболее тяжелому воздействию подвергается подстанция ПС20, где относительные потери реактивной мощности составили 66%. Заметное снижение напряжения происходит на подстанциях ПС9, ПС18, ПС19, ПС23, ПС25. На остальных объектах сохраняется номинальный уровень напряжения.

Учет работы РЗ устанавливает каскадное отключение, как минимум, девяти ЛЭП 500 кВ: Л6, Л22–Л24, Л31, Л34, Л40, Л44, Л45 в течение 30 с.

Наибольшему тепловому воздействию подвержены СТ подстанций ПС18 и ПС20: на ПС20 максимальной перепад температур составил 92 К, а на ПС18 – 67 К. В этом случае возникает вероятность пробоя изоляции СТ или срабатывания его газовой защиты: на ПС20 – при температуре масла  $\theta_m > 88^\circ\text{C}$ , а на ПС18 – при  $\theta_m > 113^\circ\text{C}$  [15].

Таким образом, проведенное моделирование воздействия геомагнитной бури на ОЭС Центра России свидетельствует о высокой вероятности развития крупной системной аварии и возмож-

ном выходе из строя некоторых силовых трансформаторов. При этом с учетом используемых допущений по воздействующим факторам геомагнитной бури и параметрам модели ОЭС Центра данный результат, по-видимому, следует рассматривать как оптимистичный.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пилипенко В.А.* Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 3. С. 72–110. <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>
2. *Kappenman J.* (Oak Ridge National Laboratory / Metatech Corporation) Geomagnetic storms and their impacts on the U.S. power grid [Electronic resource]: Goleta, California; 2010 January. Available at: [https://www.ferc.gov/industries/electric/industry/reliability/cybersecurity/ferc\\_Meta-R-319.pdf](https://www.ferc.gov/industries/electric/industry/reliability/cybersecurity/ferc_Meta-R-319.pdf) (20.09.2017) – Meta-R-319.
3. *Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Билин В.А. и др.* Анализ результатов многолетнего мониторинга токов в нейтральных автотрансформаторов // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21. № 4. С. 607–615. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-4-607-615>
4. *Bolduc L., Langlois P., Boteler D., et al.* A study of geoelectromagnetic disturbances in Quebec, 2. Detailed analysis of a large event // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. V. 15. Iss. 1. P. 272–278. <https://doi.org/10.1109/61.847262>
5. *Kappenman J.G.* An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // Space Weather. 2005. V. 3. Iss. 8. S08C01. <https://doi.org/10.1029/2004SW000128>
6. *Pulkkinen A., Lindal S., Viljanen A., et al.* Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish highvoltage power transmission system // Space Weather. 2005. V. 3. Iss. 8. S08C03. <https://doi.org/10.1029/2004SW000123>
7. *Вахнина В.В.*, ред. Механизмы воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети. М.: Инфра-Инженерия, 2018. 256 с.
8. *Кувшинов А.А.*, ред. Влияние квазипостоянных токов на электродинамическую стойкость силовых трансформаторов: элементы теории и методы испытаний. В 2 ч. М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2019.
9. Transformer Thermal Impact Assessments for DC Withstand Capability: Examining the Impacts of Geomagnetically Induced Current (GIC) on Transformer Thermal Performance: EPRI, Palo Alto, CA: 2019. – 3002017708.
10. *Pulkkinen A., Bernabeu E., Eichner J., et al.* Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios // Space Weather. 2012. V. 10. S04003. <https://doi.org/10.1029/2011SW000750>
11. NERC Standard TPL-007-4: Transmission System Planned Performance for Geomagnetic Disturbance Events. March 19, 2020.
12. *Воеводин С.В.* Аналитическое выражение для тока возбуждения силового трансформатора при его подмагничивании геоиндуцированным током. В сб.: Пятнадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”; 10–14 февраля 2020 г. Москва; 2020. Доступно по: <https://plasma2020.cosmos.ru/docs/PLASMA-2020-IKI-AbstractBook.pdf>.
13. Методические указания по устойчивости энергосистем: требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок, утверждены приказом Минэнерго России от 03.08.2018 № 630.
14. *Picher P., Bolduc L., Dutil A., et al.* Study of the Acceptable DC Current Limit in Core-Form Power Transformer // IEEE Transactions on Power Delivery. 1997. V. 12. № 1. P. 163–168. <https://doi.org/10.1109/61.568248>
15. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под. ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.

## A STUDY OF IMPACT OF STRONG MAGNETIC STORM ON CONSOLIDATED POWER SYSTEM OF CENTRE OF RUSSIA

**A. A. Trenkin<sup>a</sup>, S. V. Voevodin<sup>a</sup>, O. N. Koblova<sup>a</sup>, Corresponding Member of the RAS V. D. Selemir<sup>a</sup>, V. V. Vakhnina<sup>b</sup>, A. A. Kuvshinov<sup>b</sup>, and A. N. Chernenko<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

<sup>b</sup> Togliatti State University, Togliatti, Russia

This article represents results of simulation of geomagnetically induced current impact on Consolidated power system of Centre of Russia during strong magnetic storm. The paper shows that complex of factors appears during this impact which can induce progress of blackout: significant decrease of voltage on a set of electrical power elements, mass cutoff of power transmission lines under the influence of relay protection and dangerous heating of construction elements of power transformers.

**Keywords:** electrical power system, geomagnetic storm, geomagnetically induced current, magnetic bias of transformers, blackout