

УДК 621.311.001.57

ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.С. Сероветников^{1, 2}, В.П. Сивоконь^{1, 2}

¹ Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

² Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

E-mail: sas-w@yandex.ru, vsivokon@mail.ru

На примере локальной электросети Камчатского края показана связь высших гармоник промышленного тока и вариаций магнитного поля Земли. Установлена зависимость механизма возникновения геомагнитно-индуцированных токов от топологии электросети.

Ключевые слова: геомагнитно-индуцированные токи, высшие гармоники промышленного тока

© Сероветников А.С., Сивоконь В.П., 2013

MSC 78A25

GEOMAGNETICINDUCED CURRENTSIN ELECTRIC POWER SYSTEMS

A.S. Serovetnikov^{1, 2}, V. P. Sivokon'^{1, 2}

¹ Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

² Vitus Bering Kamchatka State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya st., 4, Russia

E-mail: sas-w@yandex.ru, vsivokon@mail.ru

On the example of the local powergrid of Kamchatka shows the relationship between the magnitude of industrial current harmonics and variations of Earth's magnetic field. Shows dependence of mechanism of geomagnetically induced currents creation from topology of powergrid.

Key words: geomagnetically induced currents, harmonics current industrial

© Serovetnikov A.S., Sivokon' V. P., 2013

Введение

Электроэнергетические системы являются одной из критически важных структур техногенного комплекса страны. Сложность самой системы и происходящей в ней процессов приводит к тому, что риски аварий в ней являются многофакторными.

Одним из таких факторов является природное явление, обусловленное солнечно-земными связями, а именно геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ). Для оценки их влияния на электрические сети в мировой практике, как правило, используется подход, основанный на измерении ГИТ в нейтральном проводе. Так поступают, к примеру, в Финляндии [1] и у нас на Кольском полуострове [2]. Для оценки влияния ГИТ на другие техногенные системы, газо и нефтепроводы, используется вычисление ГИТ на основе данных магнитометрических станций и специальных технологий [3].

В публикации [4] авторами предложен способ оценки влияния ГИТ на электрические сети путём оценки вариаций высших гармоник промышленного тока. На примере локальных электрических сетей Камчатки в публикации [4] показана связь между вариациями магнитного поля Земли и величиной гармоник сети. В 2011 году база наблюдений расширена, что позволило получить в 2011-2012 годах новые результаты, предлагаемые в настоящей статье.

Анализ данных

Степень влияния геомагнитно-индуцированных токов на электрические сети зависит от их величины и степени восприимчивости техногенной системы к ГИТ. Величина ГИТ определяется уровнем возмущения магнитного поля Земли, скоростью его изменения и свойствами подстилающей поверхности в месте расположения системы [5],[6].

Параметры, влияющие на степень восприимчивости системы можно разделить на две составляющие: топологическую и технологическую. Под топологической составляющей следует понимать конфигурацию и протяжённость электрических сетей, их ориентацию относительно силовых линий магнитного поля Земли. Под технологической составляющей подразумеваются технические особенности сети, которые способны увеличить восприимчивость к ГИТ. К ним следует отнести собственный уровень высших гармоник сети [4] и схемные решения нивелирующие, либо усиливающие негативное проявление ГИТ [7]. Структурировав таким образом механизмы реализации ГИТ, проведём анализ данных, полученных в ходе наблюдений.

С 2011 года измерения гармоник сети проводятся в трёх пунктах наблюдения Петропавловск-Камчатский, Паратунка и Усть-Большерецк (рис. 1).

Сведениями о состоянии магнитного поля Земли обеспечивает обсерватория Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, который располагается в посёлке Паратунка. Подача электроэнергии в пункты наблюдения осуществляется с использованием воздушных линий. Из рисунка видно, что линии имеют различную протяжённость и топологию, но, по сути, являются радиально-магистральными.

Запись уровня гармоник в пунктах наблюдения ведётся по технологии, описанной в [4], непрерывно. Выборка данных производится для дней, когда уровень возмущённости поля в единицах планетарного магнитного индекса составляет 9 и выше. Для сопоставления используется вертикальная компонента магнитного поля Земли, по-



Рис. 1. Схема сети пунктов наблюдения

сколько именно она формирует горизонтальную составляющую электрического поля, ответственную за наведение геомагнитно-индуцированного тока в линейных проводах электропередач. Связь уровня гармоник сети с её вертикальной компонентой магнитного поля Земли оценивается, в том числе, с использованием функции корреляции.

Результаты сопоставления уровня гармоник и вариаций вертикальной составляющей магнитного поля в 2011-2012 годах показаны на рис. 2.

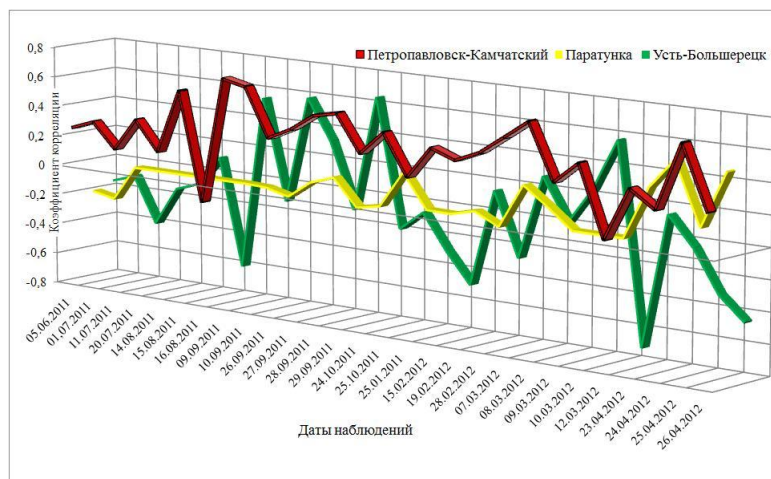


Рис. 2. Корреляция уровня гармоник в трех пунктах наблюдения и вертикальной составляющей вектора магнитного поля Земли

Из рисунка видно, что абсолютное изменение магнитного поля хорошо коррелирует с уровнем гармоник сети в Петропавловске-Камчатском, Паратунке и хуже в Усть-Большерецке.

Если обратиться к рис. 1, то можно увидеть, что протяжённость линии до Усть-Большерецка значительно больше всех остальных, ориентирована она с северо-востока на юго-запад, в первом приближении в меридиональном направлении и,

следовательно, наводимый в ней геомагнитно-индуцированный ток должен быть выше. Но если проанализировать ситуационную схему (рис. 1), то можно обнаружить, что линия Петропавловск-Камчатский – Рыбачий образует контур, который условно можно считать рамкой, у которой линейные размеры несоизмеримо малы по сравнению с длиной волны геомагнитно-индуцированных токов (рис. 3.)

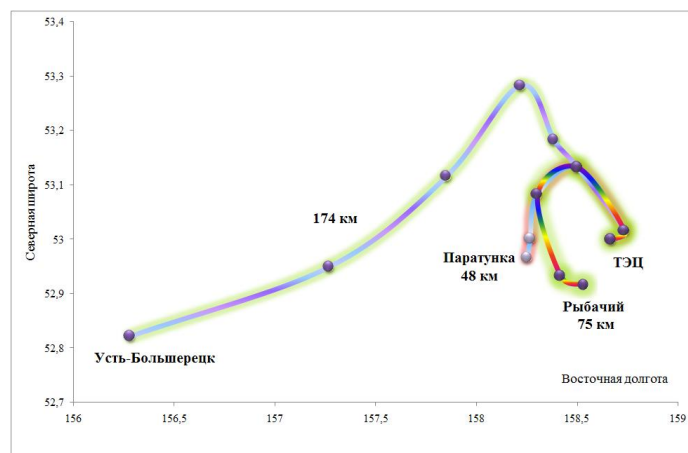


Рис. 3. Схема электрической сети Камчатского края

Таковыми же малыми размерами по сравнению с длиной волны обладает и линия Петропавловск-Камчатский – Усть-Большерецк, но она является линейным проводником.

Взаимодействие линейного проводника и рамки с электромагнитным полем существенно отличаются (рис. 4).

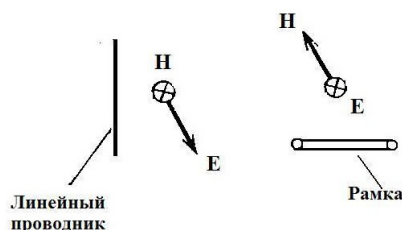


Рис. 4. Схема взаимодействия линейного проводника и тока с электромагнитным полем

В первом ток обусловлен вариациями электрического поля, а во втором магнитного.

Величина тока проводимости в линейном проводнике с удельной проводимостью σ порождаемого электрическим полем $\vec{E}$ равна

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}.$$

Изменение электрического поля $\vec{E}$ в соответствии с законом электромагнитной индукции связано с вариациями магнитной индукции $\vec{B}$:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}.$$

Следовательно, для линейного проводника величина геомагнитно-индуцированного тока зависит от его ориентации относительно силовых линий электрического поля и скорости вариаций магнитного поля. Для рамки, в соответствии с законом полного тока изменение магнитного поля приводит к формированию в контуре тока с плотностью:

$$\vec{J} = \text{rot } \vec{H},$$

где $\vec{H}$ – вектор напряжённости магнитного поля. Если вместо вектора магнитного поля $\vec{H}$ использовать вектор магнитной индукции $\vec{B}$, то

$$\vec{J} = \mu_0 \text{rot } \vec{B},$$

где μ_0 – магнитная постоянная. Следовательно, для линии Усть-Большерецк можно ожидать большей степени коррелированности уровня гармоник не с абсолютными вариациями магнитного поля Земли, а с производной от неё. Результаты сопоставления уровня гармоник сети с производной от вариаций магнитного поля Земли показано, на рис. 5.

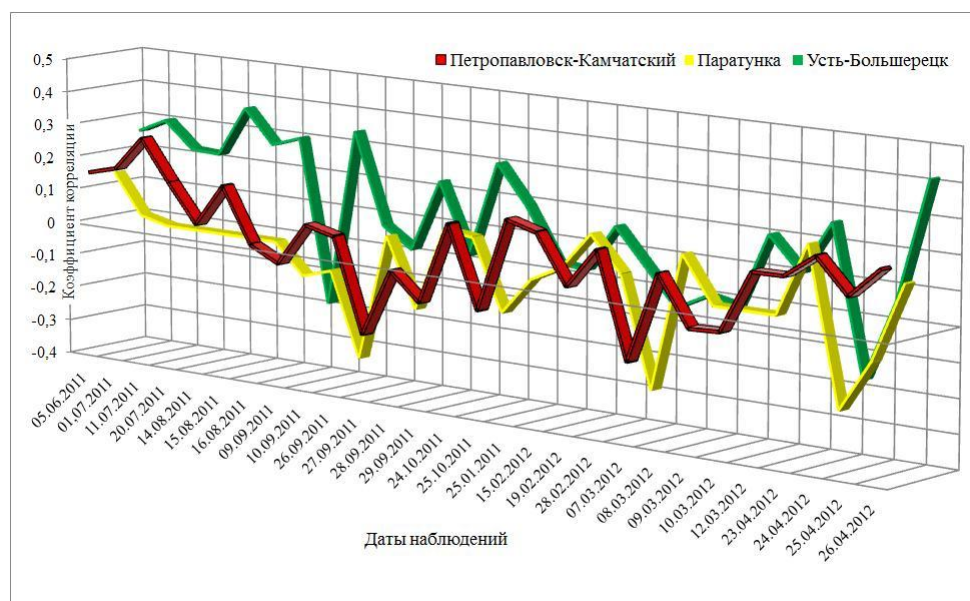


Рис. 5. Корреляция производной по времени от уровня гармоник в трех пунктах наблюдения и вертикальной составляющей вектора магнитного поля Земли

Из рисунка видно, что корреляция процессов в большей степени проявляется для линии Усть-Большерецк и в меньшей степени, линий Петропавловск-Камчатский и Паратунка. Нельзя не обратить внимания ещё на одну существенную особенность линии электропередачи Петропавловск-Камчатский – Рыбачий: она проходит в непосредственной близости от береговых очертаний Авачинского залива (рис. 1). Проводимость морской воды значительно выше суши и этот фактор нельзя не учитывать,

поскольку в работах [8],[9] показано, что существенную роль в величине ГИТ играют свойства подстилающей поверхности. В частности, вследствие существования скин-эффекта связь между электрической и магнитной составляющей поля может быть записано, как [8]

$$E_y = -\sqrt{\frac{\omega}{\mu_0\sigma}} e^{j\frac{\pi}{4}} B_x,$$

где E_y – горизонтальная составляющая электрического поля; B_x – вертикальная компонента магнитного поля; ω – круговая частота.

Из анализа этого выражения следует, что увеличение проводимости подстилающей поверхности уменьшает величину горизонтальной составляющей поля, при неизменной величине вертикальной компоненты магнитного поля, что для линии Петропавловск-Камчатский – Рыбачий означает уменьшение влияния горизонтальной составляющей электрического поля.

Таким образом, для различных участков электрической сети Камчатки имеющих отличную топологию, генезис геомагнитно-индуцированных токов носит значительно отличающийся и комплексный характер, что в частности подтверждает правильность выбранного нами структурирования задачи определения степени восприимчивости отдельных элементов энергосистемы.

При рассмотрении технологической составляющей рисков проявления ГИТ следует особо выделить фактор высших гармоник промышленного тока. Известно, что именно рост высших гармоник при увеличении ГИТ явился причиной катастрофы в Квебеке [10]. Интересно отметить, что задолго до событий в Канаде возможный механизм проблем с ГИТ был смоделирован для штатов Миннесота и Висконсин, США [11]. В этой работе показано, что протекании ГИТ вызовет значительный рост высших гармоник, но рассматриваются они как возможный источник проблем при разного рода оперативных переключениях и недопустимо больших токов в фильтрах гармоник.

Уровень высших гармоник определяется нелинейными свойствами нагрузки [12] и режимом работы трансформаторов [7]. Если выбрать данные по максимальным значениям уровня гармоник сети в ранее приводимые дни наблюдений, то результат будет выглядеть, как показано на рис. 6.

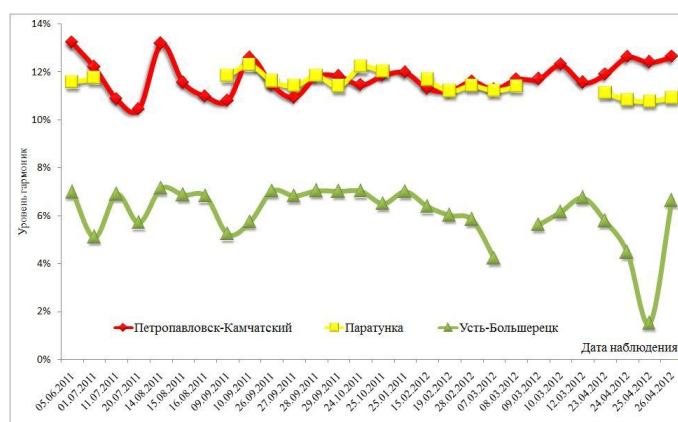


Рис. 6. Выборка по максимальным значениям гармоник

Из рисунка видно, что в Петропавловске-Камчатском и Паратунке величина высших гармоник в магнитоактивные дни превышает предельно допустимый уровень определяемый ГОСТ 13109-97 и только в Усть-Большерецке соответствует его требованиям. Максимальное значение параметра не в полной мере оценивает его изменчивость, поэтому была произведена оценка вариаций среднестатистического отклонения уровня гармоник в магнитоактивные дни. Результат показан на рис. 7, из которого можно сделать вывод о том, что более динамичные процессы обусловленные ГИТ наблюдаются в Петропавловске-Камчатском и Усть-Большерецке.

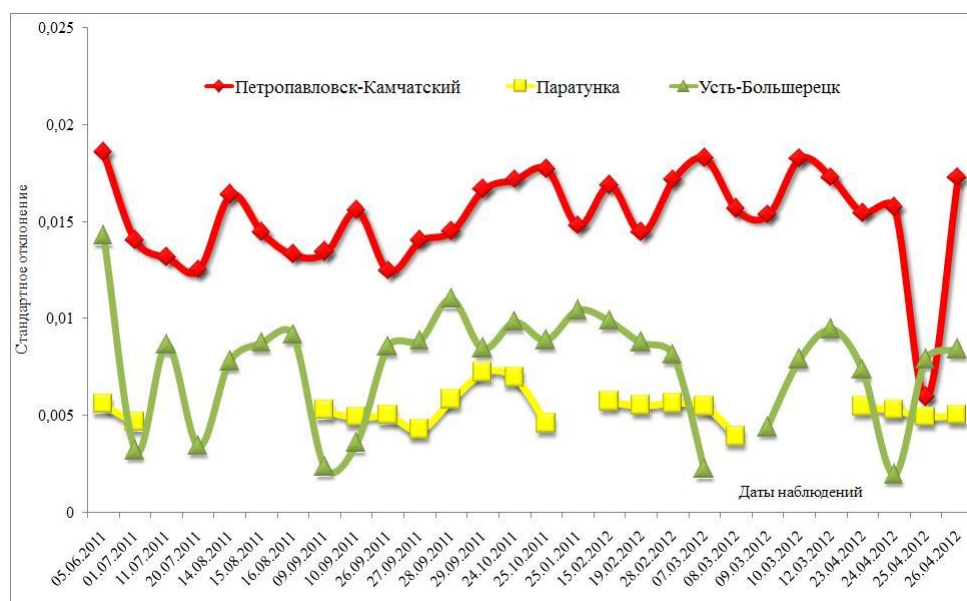


Рис. 7. Выборка по значению стандартного отклонения

Рассматривая вопрос о роли гармоник в проявлении ГИТ, следует обратить внимание на возможность их миграций внутри сети. Так в работе [13] показано, что распространение высших гармоник тока вдоль линии электропередачи зависит от их порядка, в том числе и от образуемой ими последовательности. Кроме того в работе обращается внимание на то обстоятельство, что распространение высших гармоник сопряжено с возможностью резонансных явлений в сетях. Вероятность их появления зависит от параметров схемы сети, расположения самих источников в её узлах и порядка генерируемых ими гармоник.

Ранее [4] при рассмотрении возможных мер снижения риска проявления ГИТ предлагалось снизить уровень гармоник, в том числе за счёт снижения нагрузки трансформаторов [14]. За прошедшее с момента публикации [4] время появились иные предложения по снижению рисков проявления ГИТ. Так известная своими разработками в этой области компания Metatech, США [15] предлагает за счёт существенной разницы частот промышленного тока и ГИТ реализовать блокировочные схемы с использованием конденсаторов и активных сопротивлений рис. 8.

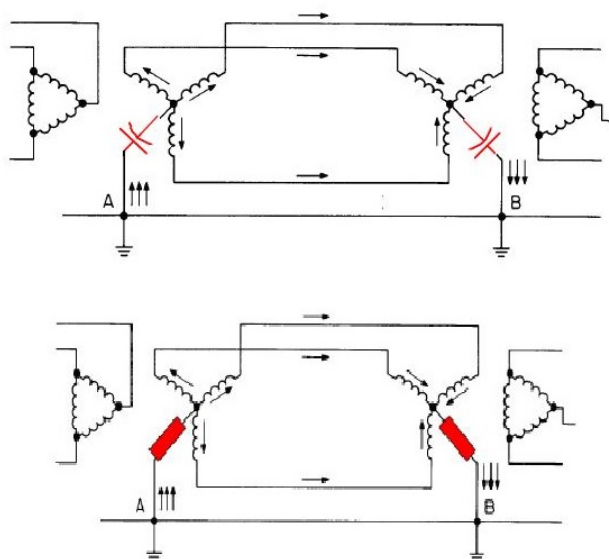


Рис. 8. Схема включения токоограничивающих элементов в цепь нейтрали трансформатора

Заключение

В заключение можно отметить, что в отличие от применяемых в зарубежных программах способов оценки ГИТ, в предлагаемом подходе мониторинг вариаций критических параметров проводится в самой электрической системе, а не по результатам оценки гелиогеофизической обстановки. При отсутствии элементов прогнозирования космической погоды, таких как американская система Solar Dynamic Observatory, используемый подход является достаточно эффективным. Применительно к исследуемой локальной электрической сети Камчатки, из вышеприведённого анализа экспериментальных данных следует, что в случае развития сильной магнитной бури, наиболее вероятным участком проявления ГИТ будет магистраль Петропавловск-Камчатский – Рыбачий.

Библиографический список

1. Geomagnetically Induced Currents in the Finnish High-Voltage Power System, Finnish Meteorological Institute, Reports, 2000:2. 2000.
2. URL: <http://eurisgic.org/measuring>.
3. Boteler D.H., R. Pirjola, L. Trichtchenko On calculating the electric and magnetic fields produced in technological systems at the Earth's surface by a "wide" electrojet // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2000. Vol. 62 P. 1311-1315.
4. Сивоконь В.П., Сероветников А.С., Писарев А.В. Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов // Электро. 2011 №3. С.30-34
5. Lahtinen M. , R. Pirjola: Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically-induced electric fields Annales Geophysicae, no 4, p479-484,1995.
6. Viljanen, A., Nevanlinna, H., Pajunp K., and Pulkkinen, A.: Time derivative of the horizontal geomagnetic field as an activity indicator // Annales Geophysicae. 2001. № 19. P. 1107–1118.

7. Карташев И.И, Нгуен Динь Дык. Влияние характеристик намагничивания трансформатора на спектр генерируемых им высших гармоник // Вестник МЭИ. 2007. №1. С. 56-63.
8. Pirjola R. Electromagnetic induction in the earth by a plane wave or by fields of line currents harmonic in time and space // *Geophysica*. Vol.18. Nos. 1-2, P.1-161.
9. Pirjola R., A. Viljanen Complex image method for calculating electric and magnetic fields produced by an auroral electrojet of finite length. // *Ann. Geophysicae*. 1998. Vol. 16. P. 1434-1444.
10. Kappenman, J.G. Geomagnetic Storms and Their Impact on Power Systems // *IEEE Power Eng.* 1996. Rev. 5.
11. Mohan N., Kappenman, J.G., V.D. Albertson Harmonics and switching transients in the presence of geomagnetically induced currents // *IEEE transaction on power apparatus and systems*. 1981. Vol. 2.
12. Климов В.П., Москалев А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // *Практическая силовая электроника: Науч.-техн. сб. / Под ред. Малышкова Г.М., Лукина А.В. М.: ММП-Ирбис, 2002. Вып 5.*
13. Н. Динь Дык Разработка методики исследования распространения высших гармоник в электро-энергетических системах: дис. ... канд. техн. наук, МЭИ, 2008.
14. Kappenman J. G. , S. R. Norr, G. A. Sweezy, D. L. Carlson, V. D. Albertson, J. E. Harder, B. L. Damsky. GIC Mitigation: A Neutral Blocking/ Bypass Device to Prevent the Flow of GIC in Power Systems // *IEEE PES Special Publication 90TH0357-4-PWR. Special Panel Session, July 17. 1990. P. 45-52.*
15. Kappenman J. G. Low-Frequency Protection Concepts for the Electric Power Grid // *Geomagnetically Induced Current (GIC) and E3 HEMP Mitigation. Metatech Corporation, 2010.*

Поступила в редакцию / Original article submitted: 04.10.2013