

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ КАК ИНДИКАТОР ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ

Сивоконь В.П., докт. техн. наук
Сероветников А.С., Писарев А.В.

Разработан и апробирован способ мониторинга геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в электрических сетях. В ранее использовавшихся способах ГИТ определялся на основе данных магнитометрических станций. Мониторинг уровня высших гармоник может служить действенным инструментом оценки устойчивости энергосистемы к деструктивному воздействию ГИТ. Апробация способа в трех пунктах энергосистемы Камчатки, отличающихся типом и протяженностью питающих линий электропередачи, показала взаимосвязь уровня высших гармоник с возмущениями магнитного поля Земли.

Ключевые слова: электрические сети; геомагнитно-индуцированные токи; высшие гармоники промышленного тока; мониторинг; устойчивость энергосистемы

Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) хорошо известны геофизикам, но в повседневной деятельности энергетиков они скорее экзотика. В связи с чем авторы сочли необходимым сделать небольшие пояснения. В ионосфере на высотах от 80 до 120 км протекает ток, именуемый электроджетом. Ключевую роль в происхождении электроджета играют солнечно-земные связи. Солнце в огромном количестве выбрасывает плазму, которая движется от него во всех направлениях, в том числе и к Земле. Эту плазму называют солнечным ветром. Магнитное поле Земли взаимодействует с солнечным ветром и является своеобразным защитным экраном и одновременно передаточным звеном энергии солнечной плазмы в нижележащие слои атмосферы. В результате этого взаимодействия возникает ионосферный ток – электроджет, интенсивность которого определяется количеством и скоростью плазмы, то есть солнечной активностью. Поскольку Земля является проводником, то электроджетом в ней, как и в любом проводнике на поверхности земли, индуцируются токи, которые называются геомагнитно-индуцированными.

Влияние геомагнитно-индуцированных токов на техногенные системы известно достаточно давно. Впервые они были зафиксированы на трансатлантической линии связи в середине XIX века. По мере развития и усложнения техногенных систем последствия деструктивного воздействия естественных процессов становятся в ряде случаев катастрофическими, что делает актуальным изучение их проявлений и по возможности предотвращения. В электроэнергетике как технологической системе, имеющей важнейшее значение в нашей жизни и подверженной влиянию этих природных процессов, деструктивное воздействие последних

A technique of monitoring of geomagnetically induced currents (GIC) in power grids is developed and approved. Previous technique of GIC estimation uses the magnetometric station data. Monitoring of ultraharmonics level may be used as an effective tool of estimation of electric power system stability destructively affected by GIC. Approbation of the technique in three points of Kamchatka power system, which differ by power supply line type and extent, showed dependence of ultraharmonics level on magnetic disturbance of the Earth.

Keywords: power grids; geomagnetically induced currents; ultraharmonics of industrial frequency current; monitoring; electric power system stability

наиболее явно проявилось в событиях, произошедших 13 марта 1989 года в Канаде. В этот день на 9 часов была полностью обесточена энергосистема провинции Квебек, и без электроснабжения остались 6 миллионов человек. Последствия аварии устранялись в течение нескольких недель. При этом все технологические параметры энергосистемы находились в допустимых пределах, и ничто не предвещало подобных катастрофических последствий. Анализ событий, приведших к краху энергосистемы провинции Квебек, показал, что причиной является сильное возмущение магнитного поля Земли – магнитная буря. В свою очередь магнитная буря ассоциируется с электроджетом. В большинстве техногенных систем присутствуют протяженные проводники, такие как линии электропередач, нефте- и газопроводы и т.д. В любом из них электроджетом индуцируются токи, величина которых зависит от интенсивности, протяженности и конфигурации проводника, свойств подстилающей поверхности в месте его расположения, а также взаимного пространственного положения электроструи и техногенной системы.

Воздушные линии электропередачи являются достаточно хорошими «приемниками» вариаций ионосферного тока и именно через них совершается деструктивное воздействие электроджета. Основное отличие ГИТ от промышленного тока заключается в частоте: она меньше герца, т.е. геомагнитно-индуцированный ток по сравнению с промышленным является практически постоянным. При протекании такого тока через трансформатор происходит подмагничивание сердечника и смещение рабочей точки в область нелинейного режима. Этот переход приводит к увеличению уровня высших гармоник промышленного тока. Электродинамиче-

ские параметры изоляционных материалов, входящих в состав трансформатора, зависят от частоты, а поскольку частоты высших гармоник значительно выше основной, то неизбежно увеличение диэлектрических потерь. Вследствие этого происходит локальный перегрев, последующий виток ухудшения диэлектрических свойств и, в конце концов, выход из строя трансформатора без всяких видимых причин.

После катастрофы, случившейся в Канаде, развитием мониторинга геомагнитно-индуцированных токов занялись в Канаде, США, Великобритании, Швеции, Норвегии, Финляндии, Азербайджане. Если обратиться к модели распределения ГИТ, построенной американскими специалистами Metatech Corp., то можно увидеть, что большая часть России подвержена влиянию геомагнитно-индуцированных токов. Более того, технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф решением Президента РФ ПР-842 от 21 мая 2006 г. отнесены к перечню критических, что в совокупности делает исследования деструктивного воздействия ГИТ не только актуальными, но и необходимыми.

Увеличение высших гармоник как следствие воздействия ГИТ приводит к необходимости проанализировать сопутствующие проблеме факторы. Характер нагрузки существенно влияет на форму напряжения сети, поэтому, на наш взгляд, необходимо учесть тенденции изменения параметров потребителей электроэнергии. За прошедшее с момента катастрофы в Квебеке время изменился характер нагрузки – она все более становится нелинейной, то есть генерирующей высшие гармоники промышленного тока [2]. Если ранее таковыми потребителями являлись крупные предприятия, оснащенные, к примеру, дугоплавильными печами, то теперь нелинейные потребители есть в каждом доме. Увеличение уровня высших гармоник приводит к тому, что приходится накладывать ограничения на номинальную мощность трансформатора. Европейский комитет по стандартизации CENELEC рекомендует использовать специальный коэффициент, позволяющий учесть влияние высших гармоник

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{\text{RMS}}}\right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{40} n^q \cdot \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}, \quad (1)$$

где I_1 – первая гармоника тока;

I_{RMS} – среднеквадратичная величина тока;

e и q – коэффициенты, учитывающие потери в меди и железе трансформатора.

В результате при номинальной мощности $P_{\text{НОМ}}$ рекомендуемая для безопасной работы трансформатора мощность может быть определена как

$$P = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi}{K}. \quad (2)$$

По разным оценкам [1,3], для нагрузки, имеющей $\cos \varphi = 0,8$, рекомендуемая нагрузка может составлять от 0,8 до 0,5 от номинальной.

Поскольку насыщение электрических сетей нелинейными потребителями и деструктивное прояв-

ление геомагнитно-индуцированных токов приводит к увеличению высших гармоник, оценку воздействия геомагнитно-индуцированных токов логичнее производить комплексно, с учетом нелинейных свойств потребителя, что и заложено в предлагаемый подход. Одновременно меры, принимаемые к снижению влияния высших гармоник, пригодны и для уменьшения неблагоприятного воздействия ГИТ.

В странах Запада подход к мониторингу геомагнитно-индуцированных токов основан на комплексной оценке его последствий для различных техногенных систем, таких как нефте- и газопроводы, линии электропередач, магистральные линии связи и т.д. В этом случае электроджет представляется в виде линейного тока, имеющего определенную протяженность по широте [7]. Магнитное и электрическое поля, создаваемые этим током на поверхности Земли, представляются как

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{h+a}{(h+a)^2 + x^2} + \frac{h+a+2p}{(h+a+2p)^2 + x^2} \right],$$

$$B_z = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{x}{(h+a)^2 + x^2} - \frac{x}{(h+a+2p)^2 + x^2} \right],$$

$$E_y = -\frac{i\omega\mu_0 I}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h+a+2p)^2 + x^2}}{\sqrt{(h+a)^2 + x^2}} \right],$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

p – комплексная глубина подстилающей поверхности;

h – высота электроджета;

a – поправка к высоте, исходя из того, что плотность тока в электроджете имеет распределение Коши;

ω – круговая частота тока I .

На следующем шаге, исходя из топологии и электродинамических свойств технологической системы, вычисляется геомагнитно-индуцированный ток [8,9]. Поскольку перед нами стоит задача наблюдения за конкретной технической системой – электросетями, то в исследованиях можно использовать более простой подход, когда отслеживаются вариации гармоник сети, а затем эти изменения сопоставляются с местным локальным магнитным индексом.

При рассмотрении трансформаторов как источников высших гармоник использованы материалы, полученные в [4]. В публикации, в частности, показано, что ток намагничивания трансформатора несинусоидальный и содержит 3, 5 и 7-ую гармоники. Из материалов публикации следует, что спектр тока зависит от характера нагрузки трансформатора, степени насыщения (индукции) магнитопровода и схемы соединения обмоток. Эти выводы подтверждают правильность предлагаемого подхода, поскольку в нем заложена необходимость учета нелинейности нагрузки (характер нагрузки) и влияние ГИТ (насыщенность магнитопровода).

Для измерения гармоник промышленного тока можно использовать целый ряд приборов, таких как ПКЭ [6] или ЭРИС [5]. С использованием этих приборов проводят специализированные всесторонние измерения параметров сети: активную, реактивную, полную мощ-

ность, величину и уровни гармоник тока и напряжения, провалы и перенапряжения в сети и т.д. Хорошие метрологические возможности приборов приводят к их значительной стоимости, что при проведении инициативных научно-исследовательских работ является решающим фактором. К тому же, приобретать приборы, имеющие линейку опций, и использовать только одну из них само по себе расточительно. Если учесть, что в нашем случае должны проводиться достаточно долговременные синхронные наблюдения в нескольких пунктах, становится очевидна необходимость иного подхода. Для наблюдений используется обычный компьютер, на вход звуковой платы которого через понижающий трансформатор подается напряжение сети. Коэффициент трансформации выбирается таким образом, чтобы напряжение на сопротивлении нагрузки было ниже максимального входного напряжения звуковой платы, что обеспечивает отсутствие искажений при записи. Для записи используются две программы. Одна программа с частотой дискретизации 12 кГц делает контрольную запись большой протяженности, до суток. Вторая записывает с частотой дискретизации 44 кГц, пакетами по 20 мин. Контрольная запись позволяет просмотреть записанные события в диапазоне частот до 3,8 кГц и обнаружить нестандартные возмущения, которые могут повлиять на точность измерения. Рабочей является вторая запись, которая позволяет оценить гармоники в большем диапазоне частот и проще в обработке, поскольку отличается меньшей длительностью. Анализ проводится для гармоник с первой по девятую, поскольку, как показали предварительные измерения, гармоники от 9 до 40 составляют порядка 1,5% и существенного влияния на точность измерения не оказывают.

При выборе индексов, применяемых для оценки состояния магнитного поля Земли, исходили из следующих соображений. Планетарный магнитный индекс Кр используется для оценки глобальной геомагнитной активности с трехчасовым интервалом. Геомагнитный индекс Dst содержит информацию о планетарных возмущениях во время геомагнитных бурь. В отличие от Кр Dst измеряется на среднеширотных станциях каждый час и показывает не только абсолютное состояние магнитного поля, но и фазу возмущения. Детальную структуру флуктуаций токов авроральной зоны характеризуют индексы авроральной электроструи AU и AL. В [10] показано, что влияние на техногенные системы проявляется через сравнение ГИТ с Кр. Можно положить, что локальные возмущения в авроральной зоне, характеризующиеся локальным индексом К, для магнитной станции, расположенной в одном из пунктов наблюдения, а именно в пункте Паратунка, будут наиболее адекватны для решения поставленной задачи.

Наблюдения начались в июне 2010 г. первоначально в Паратунке Камчатского края, Елизовского района. Подача электроэнергии в этот населенный пункт осуществляется воздушными линиями. С июля 2010 г. к измерениям подключились два пункта в Петропавловске-Камчатском. Первый пункт наблюдения, расположенный в здании Камчатского государственного

университета имени В. Беринга (КамГУ), запрашивается через слабо нагруженный трансформатор. Второй находится в спальном районе «9 километр» с нормально нагруженным трансформатором. Выбор пунктов наблюдения сделан таким образом, чтобы они отличались типом и протяженностью питающих линий, характером нагрузки. На начальном этапе при определении объекта наблюдений исходили из известной закономерности: уровень нечетных гармоник выше четных и, возможно, вследствие этого вариации четных гармоник будут более адекватно отражать влияние геомагнитно-индуцированных токов на электросети. Сравнение поведения четных и нечетных гармоник проводилось в одно и то же время суток с тем, чтобы и положение электроджета, и по возможности свойства нагрузки были сопоставимы. Сопоставление уровня гармоник в день возмущенного электроджета 26 июня 2010 г. и спокойного 19 июня 2010 г. показало, что и по величине, и по вариациям они существенно отличаются. Из рис. 1 видно, что четные гармоники больше подвержены изменениям, в то время как поведение нечетных гармоник существенно не отличаются. Источником информации о состоянии электроджета являлись данные по индексам AU и AL университета Киото (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_realtime/).

Измерения, проведенные в июле в трех пунктах наблюдения, показали, что общий уровень гармоник в двух из них находится в зоне максимальных значений, предусмотренных ГОСТ 13109-97 для гармоник от 2-й до 40-й включительно, при том, что гармоники оцениваются со второй по девятую. Сопоставление изменений уровня гармоник с локальным магнитным индексом в пункте Паратунка, имеющем воздушные линии, показало интересный результат (рис. 2). Из рисунка видно, что поведение уровня гармоник и местного магнитного индекса хорошо коррелируются, что особенно проявляется в поведении трендов, показанных пунктирными линиями. Коэффициенты корреляции уровня гармоник с локальным магнитным индексом для пунктов наблюдения составляют: КамГУ - 0,17; «9 километр» - 0,04; ИКИР - 0,59.

В 2010 г. максимальное возмущение магнитного поля имело место 8 и 24 сентября 2010 г. Спокойным в

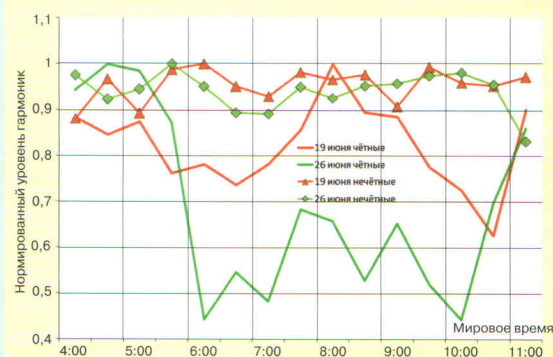


Рис. 1. Нормированные вариации четных и нечетных гармоник в условиях спокойного (19 июня 2010 г.) и возмущенного (26 июня 2010 г.) магнитного поля Земли



Рис. 2. Изменение уровня гармоник и локального магнитного индекса в июле 2010 г. и их тренды

магнитном отношении был день 10 сентября. 8 сентября максимум возмущения приходится на 12-18 часов мирового времени, что соответствует 0-6 часам местного времени, т.е. времени, когда воздействие электродрожжа на электрические системы наиболее вероятно. С другой стороны, в это время нагрузка в сети минимальна и, следовательно, уровень гармоник, как правило, проходит минимум. Результаты наблюдений в двух пунктах, «9 километр» и Паратунка, показаны на рис. 3, 4. Из этих рисунков видно, что для пункта наблюдения Паратунка в магнитоспокойный день 10 сентября 2010 г. в интервале времени 12-18 часов происходит снижение уровня гар-

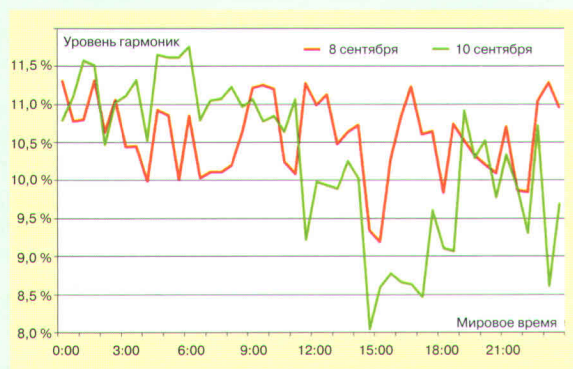


Рис. 3. Сравнение поведения гармоник 8 и 10 сентября 2010 г. в п. Паратунка

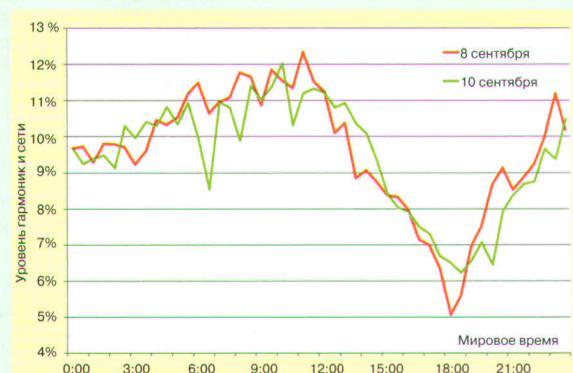


Рис. 4. Сравнение поведения гармоник 8 и 10 сентября 2010 г. в г. Петропавловске-Камчатском

моник. В этот же интервал времени 8 сентября 2010 г., когда магнитное поле Земли возмущено, подобного снижения не происходит. Для пункта наблюдения, расположенного в черте г. Петропавловска-Камчатского и снабжение которого электроэнергией происходит без применения протяженных воздушных линий, распределение гармоник не претерпевает изменений, характерных для Паратунки, (см. рис. 4).

Второе возмущение магнитного поля Земли в сентябре 2010 г. пришлось на 24 сентября. Для сравнения используем спокойный в магнитном отношении день 22 сентября. В течение суток 24 сентября магнитное поле Земли было слабо возмущено, и максимум возмущения приходится на интервал времени 12-15 час. мирового времени. 22 сентября слабое возмущение магнитного поля Земли наблюдалось в начале и в конце суток. Результаты обработки записей за эти дни для двух пунктов наблюдений представлены на рис. 5, 6.

Из сопоставления данных, полученных в сентябре 2010 г., прослеживается четкая тенденция увеличения уровня гармоник в интервале времени, когда проявление геомагнитно-индуцированных токов наиболее вероятно: магнитное поле возмущено, время суток соответствует времени максимального развития электродрожжа для данной территории.

В первой половине октября 2010 г. максимум возмущения магнитного поля Земли пришелся на 11-12



Рис. 5. Вариации гармоник сети 22 и 24 сентября 2010 г. в п. Паратунка

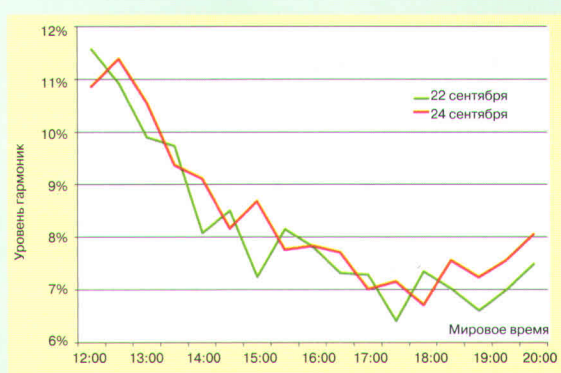


Рис. 6. Вариации гармоник сети 22 и 24 сентября 2010 г. на 9 км г. Петропавловска-Камчатского

октября. Если рассмотреть суточные вариации локального магнитного индекса 11 октября 2010 г., то окажется, что возмущение нарастало в течение суток и оказалось максимальным в полдень по мировому времени и затем уменьшалось к исходу суток. В день, с которым производится сравнение, а именно 1 октября, наблюдалось незначительное возмущение в начале суток, а затем локальный магнитный индекс равнялся нулю. Сравнение поведения гармоник показало ту же тенденцию, что и в сентябре (рис. 7, 8).

В заключение необходимо отметить еще один аспект, связанный с геомагнитно-индуцированными токами. Максимальный уровень гармоник (максимум нагрузки), как и максимум электроджета, находится в определенных временных коридорах и крайне нежелательно их совмещение. Новации с часовыми поясами, объединение в один часовой пояс нескольких районов, приводят к синхронизации этих районов по прохождению максимума нагрузки и, следовательно, высокого уровня гармоник. Уменьшение количества часовых поясов приводит к временному сдвигу в сторону максимума электроджета, что увеличивает вероятность деструктивного проявления ГИТ на фоне и без того сложной ситуации, связанной с насыщением сетей нелинейными потребителями. Ближайший пик солнечной активности ожидается в 2012 г.

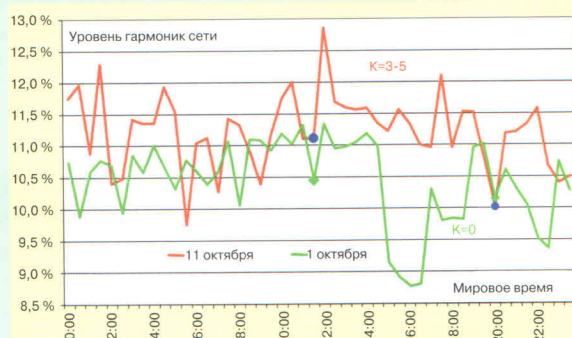


Рис. 7. Вариации гармоник сети 1 и 11 октября 2010 г. в п. Паратунка



Рис. 8. Вариации гармоник сети 1 и 11 октября 2010 г. в г. Петропавловске-Камчатском

ВЫВОДЫ

На примере локальных электрических сетей Камчатки показана связь между вариациями магнитного поля Земли и величиной гармоник сети.

Средняя величина измеренных гармоник (от 2-ой по 9-ую) в двух пунктах наблюдения находилась в зоне максимальных значений, предусмотренных ГОСТ 13109-97 для гармоник от 2-й до 40-й включительно, что существенно увеличивает вероятность проявления геомагнитно-индуцированных токов.

Поскольку проблемы высших гармоник и геомагнитно-индуцированных токов имеют совпадающие варианты возможного решения, целесообразно их совместное исследование.

В целях энергетической безопасности электроснабжения необходимо инициировать развитие наблюдений в пунктах, имеющих воздушные линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабич В.И. Задачи и методы обследования электрооборудования // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. 2003. Вып. 3.
2. Бирюлин В.И., Ларин О.М., Рыбалкин О.М., Хорошилов Н.В. Генерация высших гармоник тока и напряжения газоразрядными лампами при регулировании питающего напряжения // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2006. № 2. С. 11-14.
3. Капустин В.М., Лопухин А.А. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть // Современные технологии автоматизации – СТА. 1997. № 2.
4. Карташев И.И., Нгуен Динь Дык. Влияние характеристик намагничивания трансформатора на спектр генерируемых им высших гармоник // Вестник МЭИ. 2007. №1. С. 56-63.
5. Музыка М.М., Сковпень С.М., Черевко А.И. Анализатор качества электроэнергии // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2005. № 3. С. 27-29.
6. Соколов В.С. Контроль, мониторинг и управление качеством электроэнергии // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2003. № 5. С. 3-8.
7. Pirjola R, A. Viljanen Complex image method for calculating electric and magnetic fields produced by an auroral electrojet of finite length. Ann. Geophysicae 16, 1434-1444 (1998).
8. 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 62 (2000) 1311-1315.
9. Pirjola R., Boteler D. Calculation methods of the electric and magnetic fields at the Earth's surface produced by a line current. RADIO SCIENCE, VOL. 37, NO. 3, 10.1029/2001RS002576, 2002.
10. Huttunen K. E. J., S. P. Kilpua, A. Pulkkinen, A. Viljanen, and E. Tanskanen Solar wind drivers of large geomagnetically induced currents during the solar cycle 23. Space Weather, Vol. 6, S10002, doi: 10.1029/2007SW000374, 2008.

Сивоконь Владимир Павлович – докт. техн. наук, главный научный сотрудник Института космических исследований и распространения радиоволн РАН, зав. лабораторией прикладной радиофизики
(415) 3133193, (914) 6264725 vsivokon@mail.ru

Писарев Андрей Валерьевич – ст. преподаватель кафедры физики (415) 2426828, (924) 7843545 avp@kamgu.ru

Сероветников Андрей Сергеевич – студент
(415) 2299246, (909) 8347631 sas-w@yandex.ru

Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский