

УДК 621.311

В. Н. Селиванов, М. Б. Баранник, В. А. Билин,  
Б. В. Ефимов, В. В. Колобов, Я. А. Сахаров

## **Анализ результатов многолетнего мониторинга токов в нейтральных автотрансформаторов**

Кольский научный центр РАН совместно с Полярным геофизическим институтом проводит работы по исследованию влияния геомагнитных бурь на состояние электрических сетей и трансформаторных подстанций на Кольском полуострове и в Карелии. Создана региональная система мониторинга токов в нейтральных трансформаторов, собравшая значительный массив информации о влиянии геомагнитных возмущений на электрическую сеть протяженностью 800 км. Воздушные линии электропередачи являются гигантскими антеннами, улавливающими из окружающего пространства электромагнитную энергию любой природы. Анализ накопленных за многие годы данных показывает, что в токе заземленной нейтрали присутствуют достоверные отклики на широкий спектр электромагнитных явлений на Земле и в околоземном пространстве: импульсные и квазисинусоидальные пульсации геомагнитного поля, крайне низкочастотные составляющие сигналов искусственного происхождения, разряды молний и внутренние переходные процессы в энергосистеме. Для идентификации явлений используется визуальный метод анализа временных и спектральных характеристик сигналов, который занимает много времени и является достаточно субъективным. Всегда существует вероятность, что останутся незамеченными какие-либо важные, ранее не идентифицированные явления. В статье описаны характерные особенности сигналов, обнаруженных в токах нейтрали силовых трансформаторов. Рассмотрены алгоритмы цифровой обработки сигналов, которые могут быть использованы для создания программ автоматического анализа больших массивов данных. В наибольшей степени для исследования нестационарных сигналов сложной структуры подходят численные методы, основанные на вейвлет-разложении и преобразовании Фурье.

**Ключевые слова:** геомагнитная буря, геоиндуцированный ток, воздушная линия электропередачи, цифровая обработка сигналов, вейвлет-преобразование.

### **Введение**

Линии электропередачи являются гигантскими антенными системами, улавливающими электромагнитные волны на большой территории. С ноября 2003 г. на ряде подстанций Кольской энергосистемы проводятся измерения токов в нейтральных трансформаторов и автотрансформаторов. Основная цель этих измерений – регистрация геоиндуцированных токов (ГИТ), протекающих в нейтральных в периоды геомагнитных бурь (ГМБ) [1]. Однако анализ накопленных данных показывает, что устройства регистрации ГИТ позволяют получать информацию о таких явлениях в энергосистеме, как переходные процессы при коммутациях, грозовые перенапряжения, влияние сторонних источников и т. д. Измерение тока в нейтральных трансформаторов магистральных подстанций позволяет проводить сбор и анализ данных, прямо или косвенно характеризующих влияние различных внешних воздействий на работу энергосистемы и исследовать ее реакцию на эти воздействия. За 15 лет проведения регистраций ГИТ нами накоплен значительный массив данных, касающихся не только ГМБ, но и иных явлений, как в высоковольтных сетях, так и в магнитосфере.

Уникальное расположение и развитая энергетическая инфраструктура Мурманской области позволяют использовать ее магистральные электрические сети в качестве лаборатории по исследованию воздействия на них электромагнитных излучений природного и техногенного характера. Мировой опыт показал, что ГМБ являются причиной разнообразных функциональных нарушений и аварий электрооборудования в системах проводной связи, электроэнергетических системах, системах сигнализации и связи на железнодорожном транспорте, системах антикоррозионной защиты магистральных нефтегазопроводов, системах управления и контроля, которые интенсивно оснащаются новой микропроцессорной техникой, высокочувствительной к помехам. Поэтому обеспечение надежного функционирования топливно-энергетического комплекса и систем связи в условиях электромагнитных воздействий в Арктическом регионе России является актуальной проблемой в настоящее время, и для ее решения необходима разработка методов прогнозирования и профилактики рисков природных и техногенных катастроф, включая моделирование чрезвычайных ситуаций.

### **Методы исследования**

Кольский научный центр РАН совместно с Полярным геофизическим институтом проводит работы по исследованию влияния ГМБ на состояние энергетических сетей и трансформаторных подстанций на Кольском полуострове и в Карелии с использованием разработанной региональной системы мониторинга ГИТ [2]. Для исследования выбраны подстанции в Кондопоге, Лоухах, Апатитах и Мурманске на магистральной линии 330 кВ и подстанция в пос. Ревда на линии 110 кВ.

Система мониторинга ГИТ позволяет проводить регистрацию квазипостоянных токов в нейтралах автотрансформаторов, а также контролировать содержание гармоник в сети. Каждые 0,1 с регистрируются и записываются в файл следующие составляющие полного тока в нейтрали, полученные разложением в ряд Фурье с интегрированием на временном интервале 0,1 с:

– постоянная составляющая  $I_0$ , несущая информацию непосредственно о ГИТ; она содержит также сигнал смещения нуля датчика тока, обусловленного остаточной индукцией в магнитопроводе датчика и температурным дрейфом в элементах схемы. Сигнал может быть положительным или отрицательным

в зависимости от направления тока и вычисляется по формуле  $I_0 = \frac{1}{5T} \int_0^{5T} IN(t) dt$ , где  $IN(t)$  – мгновенное значение тока нейтрали;  $T = 0,02$  с – период промышленной частоты;  $5T = 0,1$  с – интервал интегрирования;

– амплитудные значения токов первой, второй и третьей гармоник, которые позволяют оценить изменение гармонического состава полного тока в нейтрали при протекании ГИТ значительной амплитуды. В нормальном режиме токи второй и третьей гармоники пренебрежимо малы, поэтому можно считать, что их рост обусловлен только насыщением магнитопровода автотрансформатора, вызванным геоиндуктированным током. Токи гармоник могут быть только положительными, так как они являются значениями амплитуд,

вычисленными по формуле  $I_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}$ , где  $k = 1, 2, 3$  – номер гармоники;  $B_k = \frac{2}{5T} \int_0^{5T} IN(t) \sin\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) dt$

и  $C_k = \frac{2}{5T} \int_0^{5T} IN(t) \cos\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) dt$  – коэффициенты ряда Фурье для  $k$ -й гармоники.

В настоящее время анализ данных выполняется посредством визуальной оценки временных и частотных характеристик сигналов. В ходе предварительного анализа кривых тока нейтрали и их спектральных характеристик выявлены следующие характерные реакции энергосистемы на внешние и внутренние электромагнитные воздействия:

1) собственно ГИТ, для мониторинга которых создана система регистрации. При характерной частоте от 0,001 до 0,1 Гц амплитуда ГИТ может достигать 300 А;

2) пульсации магнитосферы Земли. В качестве примера можно привести пульсации типа Pc1, которые представляют собой квазисинусоидальные колебания с периодом от 0,2 до 5 с, имеющие характерную модуляцию амплитуды в виде отдельных волновых пакетов, создающих сложную картину биений. Длительность серий Pc1 составляет от получаса до нескольких часов, амплитуда не превышает десятков миллиампер, тем не менее система регистрации ГИТ неоднократно фиксировала подобные возмущения;

3) внешние техногенные воздействия. Анализ спектров токов ГИТ позволяет надежно идентифицировать электромагнитные воздействия искусственного происхождения. Например, в 2014 г. совместно с Геологическим институтом КНЦ РАН проводился эксперимент "Феникс-2014" по исследованию строения земной коры с использованием воздушных линий электропередачи. Крайне низкочастотные сигналы, возбуждаемые в воздушной линии в Мурманске, фиксировались нашей системой мониторинга даже в нейтрали трансформатора в Лоухах на расстоянии 380 км от источника сигнала;

4) внешние и внутренние быстропротекающие воздействия электромагнитной природы (например, молниевые разряды, переходные процессы в элементах энергосистемы, смежных с трансформатором, связанные как со штатными коммутациями, так и с технологическими нарушениями: короткие замыкания, автоматические отключения и т. д.). Несмотря на то что любые процессы в нейтрали длительностью меньшей, чем 0,1 с, фиксируются системой мониторинга единственной точкой на кривой тока, факт воздействия регистрируется достаточно надежно, а в некоторых случаях можно даже оценить относительную энергию явления.

За 15 лет наблюдений на пяти подстанциях записано более чем 30 000 файлов суточных данных, ежедневно добавляется от 8 до 16 файлов, поэтому визуальный метод анализа занимает много времени и является субъективным. Нами поставлена задача алгоритмизировать и автоматизировать процесс обработки больших массивов данных с привлечением методов цифровой обработки сигналов.

## Результаты и обсуждение

### *Геоиндуктированные токи, возникающие во время геомагнитных бурь*

Геомагнитные бури сопровождаются протеканием в земной ионосфере мощных электрических токов, которые могут возникать не только на высоких, но и на средних магнитных широтах. В частности, во время магнитных бурь в высоких широтах формируются авроральные ионосферные токи восточного и западного направлений (авроральные электроджеты), причем сила тока в электроджетах на высоте порядка 100 км может достигать 100 кА. Ионосферные токи меняются во времени, перемещаются в пространстве и, благодаря явлению электромагнитной индукции, стимулируют протекание в земле и токопроводящих цепях, имеющих заземление в двух и более точках, квазипостоянных (частотой от 1 до 100 мГц) геоиндуктированных токов. Напряженность наведенных электрических полей относительно

невелика (1–40 В/км), но сила возникающих при этом ГИТ, которая зависит от размеров и ориентации проводников, электропроводности как их самих, так и подстилающей поверхности, может оказаться достаточно большой (от единиц до первых сотен ампер).

Пример ГИТ в нейтрали автотрансформатора на подстанции, расположенной в пос. Выходной, во время сильнейшей бури 8 сентября 2017 г. показан на рис. 1. Характерными чертами сигнала ГИТ являются высокие амплитуда тока и интенсивность его частотного спектра. Кроме того, при высоких значениях ГИТ может возникать насыщение магнитопровода трансформатора, что проявляется в повышении уровня гармоник  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  [3] и предоставляет еще один критерий для идентификации явления.

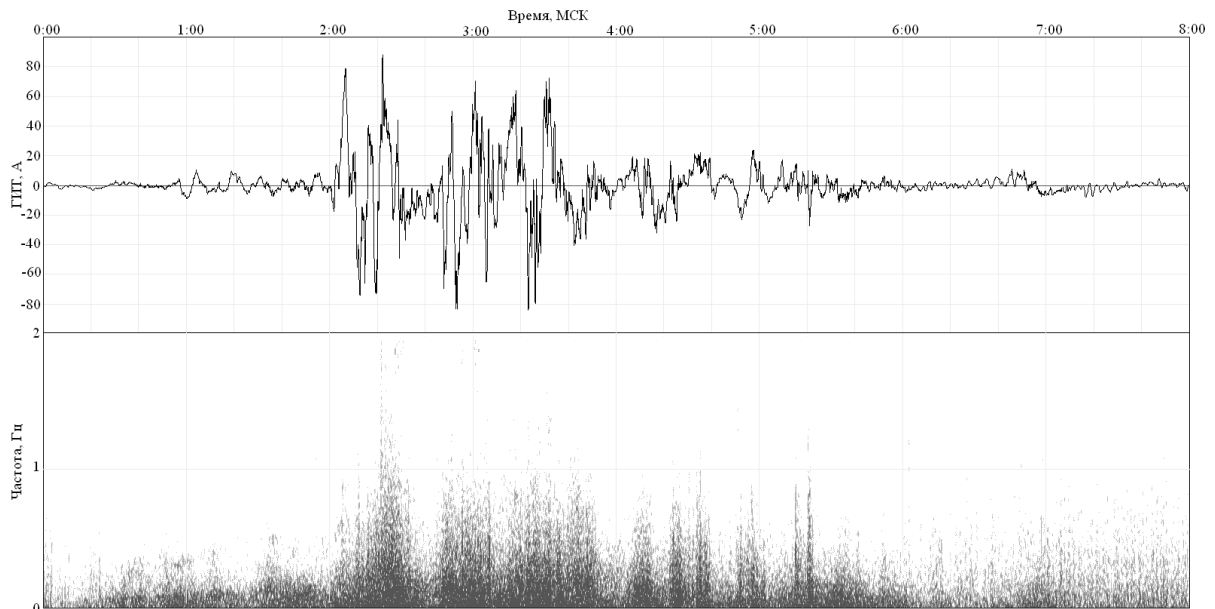


Рис. 1. Кривая геоиндуцированного тока и его спектрально-временная диаграмма  
Fig. 1. The GIC curve and its time-spectral diagram

В соответствии с законом электромагнитной индукции ГИТ пропорциональны первой производной по времени от значения компонент магнитного поля Земли, причем основной вклад вносят горизонтальные компоненты магнитного поля. Вариации магнитного поля Земли в периоды ГМБ изучаются геофизиками десятки лет, разработаны разнообразные алгоритмы идентификации возмущений. В настоящее время наиболее эффективным методом анализа нестационарных сигналов со сложной частотной структурой признано вейвлет-преобразование [4]. Как и спектрально-временные диаграммы, которые построены с использованием Фурье-преобразования с фиксированным окном, вейвлеты являются частотно-временным представлением сигналов, однако вейвлет-преобразование обладает более избирательным частотно-временным разрешением, чем оконное преобразование Фурье. Как показано в работе [4], вейвлет-преобразование наилучшим образом подходит для автоматического анализа состояния геомагнитного поля Земли: данный алгоритм включает декомпозицию регистрируемых вариаций геомагнитного поля на разномасштабные составляющие, оценку степени их возмущенности и формирование заключения о состоянии поля.

#### *Пульсации магнитосферы Земли*

В составе тока в нейтрали можно обнаружить также некоторые из типов пульсаций, выявленных и классифицированных для геомагнитного поля. Одним из таких типов являются достаточно регулярные (квазисинусоидальные) непрерывные пульсации в диапазоне 0,2–5 Гц. Сюда попадают непрерывные магнитные пульсации Pc1, пульсации КУП (колебания убывающего периода), короткие всплески пульсаций, связанные с импульсным воздействием на магнитосферу (типа SSC). Непосредственно объектом, возбуждающим магнитные пульсации, в настоящее время принято считать протоны (захваченные или квазизахваченные); механизм генерации – циклотронная неустойчивость. Динамический спектр колебаний на поверхности Земли определяется глобальными причинами, вызвавшими развитие неустойчивости в каждом событии, а также плотностью протонов в магнитосфере, условиями распространения волн, возможным наличием условий для резонансов и т. д.

Геомагнитные пульсации Pc1 представляют собой регулярные колебания, имеющие характерную модуляцию амплитуды в виде отдельных волновых пакетов, создающих сложную картину биений [5]. Пульсации Pc1 иногда называют "жемчужинами", поскольку их магнитограмма напоминает нитку жемчужного ожерелья. Длительность серий Pc1 составляет от получаса до нескольких часов, амплитуда не превышает

десятков миллиампер, тем не менее система регистрации ГИТ неоднократно фиксировала возмущения, подобные приведенным на рис. 2.

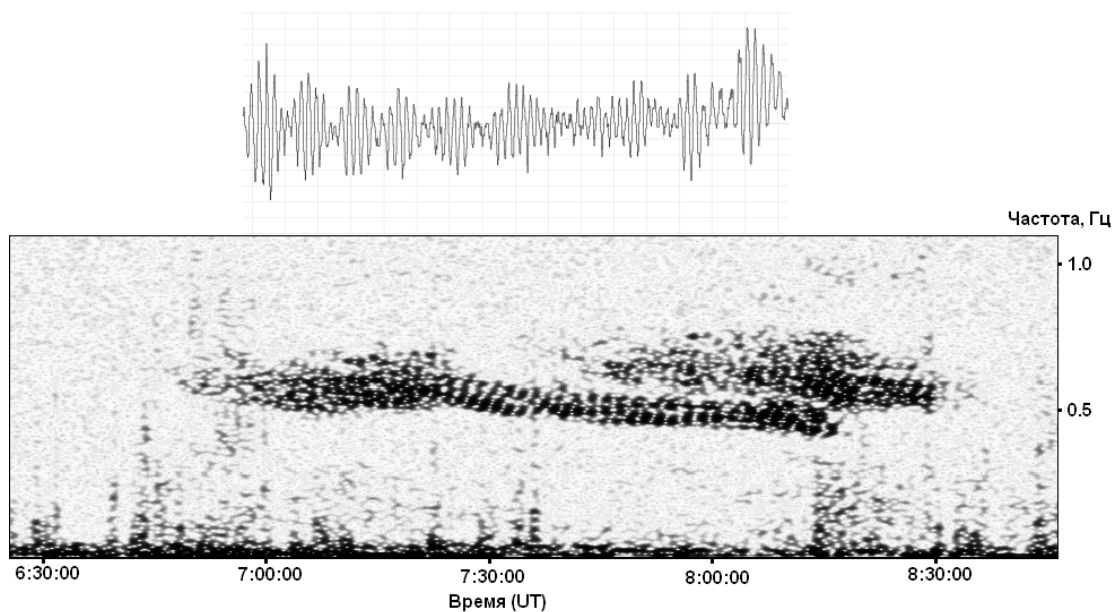


Рис. 2. Фрагмент осциллограммы и динамический спектр геомагнитной пульсации Pc1  
Fig. 2. The oscillogram fragment and the dynamic spectrum of the geomagnetic pulsation Pc1

"Жемчужины" проявляются только в постоянной составляющей тока  $I_0$ , их амплитуда составляет доли ампера, поэтому на магнитную систему трансформатора пульсации никакого воздействия не оказывают. В отличие от иррегулярных пульсаций ГИТ при ГМБ, динамические спектры непрерывных квазисинусоидальных пульсаций представляют собой серии дискретных тонов с возрастающей (или убывающей) частотой. Поэтому, наряду с описанным выше алгоритмом на базе вейвлет-преобразования, для автоматического обнаружения регулярных пульсаций могут быть применены классические методы с использованием анализа спектрально-временных диаграмм [6]. Данные методы основаны на поиске частотных максимумов оконных спектров мощности сигнала, построенных с помощью быстрого преобразования Фурье. Методы позволяют обнаруживать моменты начала и окончания пульсаций, определять амплитуды и частоты отдельных серий пульсаций, а также характер изменения частоты.

#### *Электромагнитные воздействия искусственного происхождения*

Частота дискретизации результирующих сигналов системы мониторинга ГИТ составляет 10 Гц, следовательно, согласно теореме Котельникова максимальная частота в спектре сигналов не может превышать 5 Гц. Сигналы с такой частотой используются только в системах специального применения (например, для геофизических исследований). С другой стороны, такое явление, как алиасинг, позволяет регистрировать и сигналы, создающие в электрических сетях токи с гораздо более высокой частотой.

На Кольском полуострове с 23 августа по 8 сентября 2014 г. проходил третий международный эксперимент FENICS-2014 [7]. Главной его особенностью являлась методика изучения взаимодействия электромагнитного поля с ионосферой и земной корой посредством применения двух взаимно-ортогональных заземленных воздушных линий (ВЛ). В качестве питающих линий использовались ВЛ 330 кВ протяженностью 109 км и ВЛ 154 кВ длиной 120 км. На время эксперимента линии отключались от потребителей и заземлялись на противоположном от генератора конце. В качестве источника токов крайне низкой и сверхнизкой частоты использовался генератор "Энергия-2", формировавший в излучающих ВЛ ток в частотном диапазоне 0,094–194 Гц амплитудой до 200 А. Генератор размещался на электрической подстанции 330 кВ в поселке Выходной. Несмотря на то что генератор также заземлялся, часть его тока через заземляющее устройство подстанции перетекала в соседние присоединения и попадала в смежные электрические сети. На рис. 3 показана схема опыта и указаны подстанции с автотрансформаторами, в нейтралях которых были установлены устройства регистрации тока.

Генерации в ходе эксперимента последовательно проводились на частотах 0,094; 0,382; 0,642; 0,942; 1,942; 3,822; 6,422; 9,422; 19,42; 38,22; 64,22; 94,22; 194,2; 0,194 Гц, причем сигналы с частотами 0,094 и 0,194 имели прямоугольную форму, а форма остальных сигналов была близка к синусоиду. Только сигналы с частотой ниже 5 Гц могли быть напрямую записаны устройством регистрации тока в нейтрали, тем не менее остальные сигналы также отчетливо видны на осциллограммах (рис. 4). Причиной этого является алиасинг – наложение высших гармоник на нижние части спектра при их децимации с низкой

частотой. Так, сигнал с частотой 6,422 Гц отобразился в спектре линией 3,578 Гц, а сигналы  $F$  с частотами 64,22; 94,22; 194,22 Гц дали основную линию  $f=4,22$  Гц в соответствии с общей для всех случаев формулой

$$f = 5 - \left| F - 10 \left[ \frac{F}{10} \right] - 5 \right|.$$

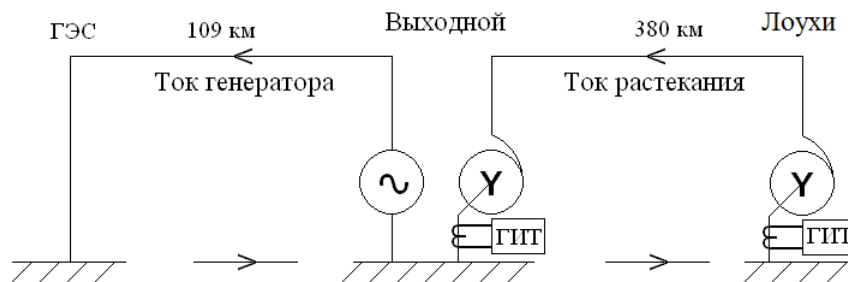


Рис. 3. Схема генерации тока в эксперименте FENICS-2014  
 Fig. 3. Scheme of current generation in the FENICS-2014 experiment

Спектр тока в нейтрали автотрансформатора на подстанции Выходной показан на рис. 4 (в верхней части). Амплитуда тока составляла величину порядка 40 А. Спектру тока, указанному в нижней части рис. 4 (в Лоухах), соответствует амплитуда 0,4 А, т. е. при распространении на расстояние почти 400 км ток уменьшился в 100 раз, однако отчетливо виден в динамическом спектре.

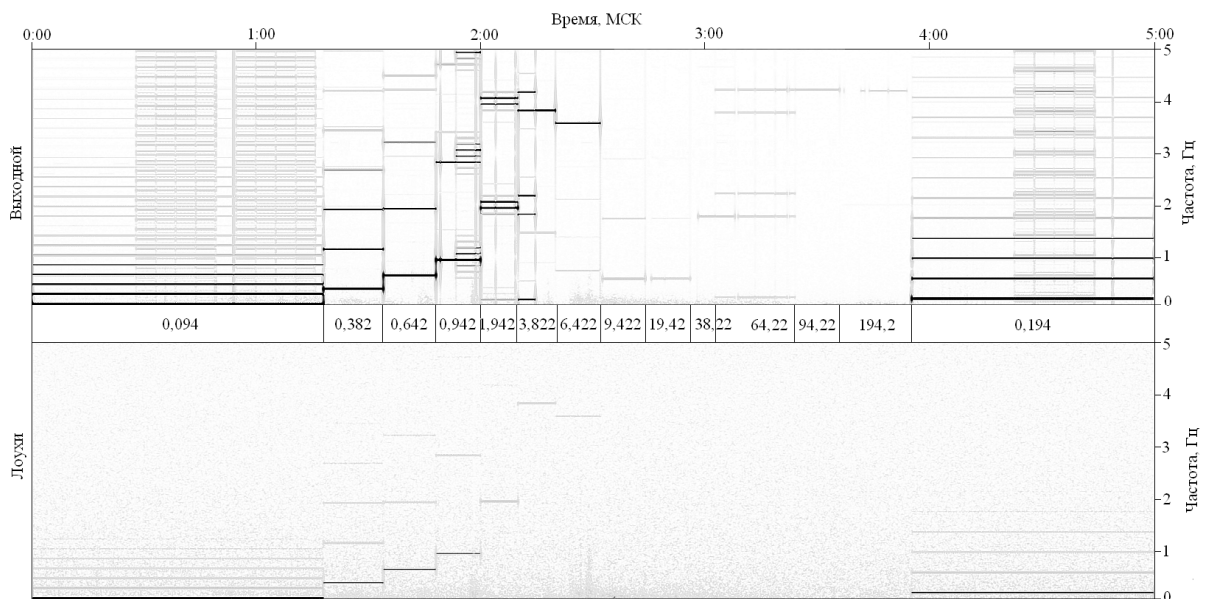


Рис. 4. Частотно-временная диаграмма тока искусственного происхождения в нейтрали  
 Fig. 4. Time-frequency distribution of technogenic neutral current

Ток искусственного происхождения, аналогично току регулярных пульсаций, имеет дискретную частотную характеристику, поэтому для автоматического обнаружения могут быть использованы те же алгоритмы на основе Фурье- или вейвлет-преобразований. Главное отличие этих явлений – ток пульсаций присутствует только в канале  $I_0$ , а гармоники тока искусственного происхождения проникают и в каналы  $I_1, I_2, I_3$ .

#### Быстропротекающие процессы

Приведенные выше примеры касаются сигналов, частотный спектр которых соответствует полосе пропускания измерительной системы. Анализ накопленных данных свидетельствует о том, что система позволяет также фиксировать явления с гораздо более высокой частотой (грозовые воздействия или коммутационные процессы в сети).

Система регистрации ГИТ является своего рода грозоотметчиком, позволяющим обнаружить факт молниевых воздействий на ВЛ, причем фиксируются как токи от индуцированных перенапряжений, так и от прямых ударов молнии. Некоторые сигналы могут иметь длительность более одного промежутка

интегрирования и достигать нескольких секунд. Это объясняется включением в интеграл сигналов как от однократного молниевых разряда, так и последующих компонент молнии, а также их многочисленных отражений от концов ВЛ. Ток постоянной составляющей  $I_0$  при перекрытии линейной изоляции имеет в своем составе аperiodические компоненты тока возникающего короткого замыкания (КЗ). А токи гармоник  $I_1, I_2, I_3$  фиксируют периодические составляющие токов нулевой последовательности, возникающие при КЗ и других несимметричных режимах, появляющихся, например, при действиях токовых защит. В частности, на осциллограмме тока первой гармоники  $I_1$  надежно фиксируется момент короткого замыкания и бестоковая пауза в цикле автоматического повторного включения (АПВ). Поэтому токи  $I_0$  дают информацию обо всех типах молниевых воздействий на ВЛ, питаемые данным автотрансформатором, а токи  $I_1, I_2, I_3$  фиксируют короткие замыкания и аварийные отключения.

Пример регистрации постоянной составляющей тока нейтрали  $I_0$  во время интенсивной грозы показан на рис. 5. За два часа зафиксировано порядка 160 молниевых воздействий с разной амплитудой импульса, причем по осциллограмме отчетливо видно, как грозовой фронт приближается к подстанции, достигнув ее около 8:30 UTC. В этот момент плотность и амплитуда воздействий максимальны.

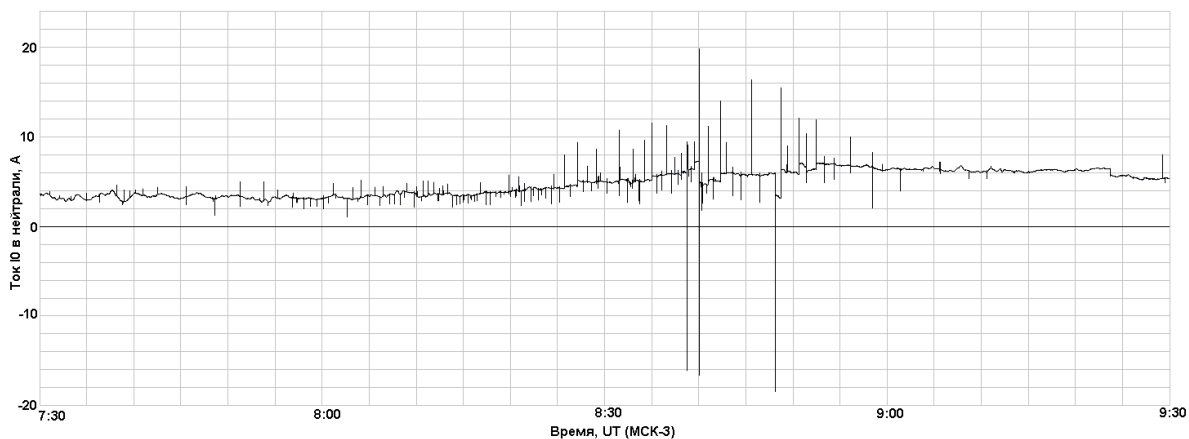


Рис. 5. Осциллограмма тока  $I_0$  в нейтрали автотрансформатора  
Fig. 5. Curve of  $I_0$  autotransformer neutral current

Осциллограмма амплитудного значения первой гармоники тока в нейтрали автотрансформатора за тот же период времени представлена на рис. 6. Токи прямой последовательности возникают в заземленной нейтрали в случае нарушения симметрии фазных токов. В нормальном режиме ток первой гармоники на данной подстанции имеет амплитудное значение порядка 4 А, что обусловлено несимметрией фазных напряжений и нагрузок. Скачки тока (рис. 6) возникли в результате КЗ после перекрытия изоляции ВЛ. За два часа грозовой активности на подходящих к подстанции ВЛ произошло 11 перекрытий с КЗ, вызвавших работу токовых защит и ликвидированных успешными действиями АПВ.

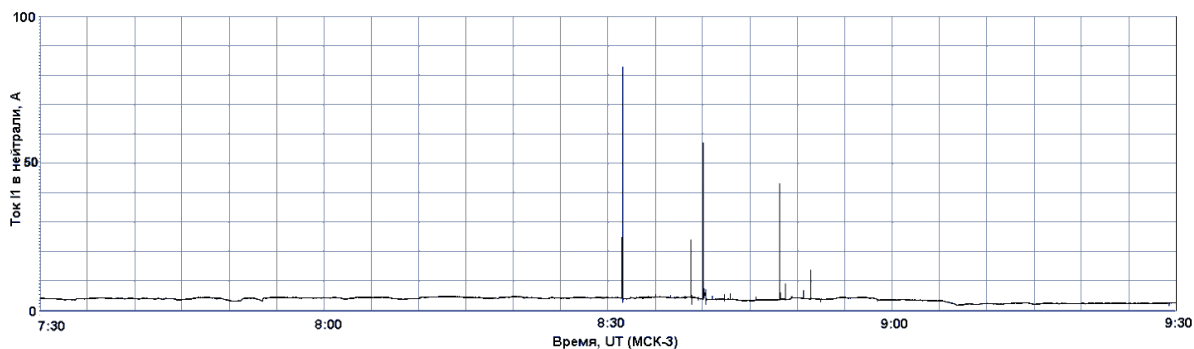


Рис. 6. Осциллограмма тока  $I_1$  в нейтрали автотрансформатора  
Fig. 6. Curve of  $I_1$  autotransformer neutral current

При автоматическом анализе геомагнитных явлений подобные импульсы являются шумом, который устраняется на этапе предварительной фильтрации исходных данных. Для подавления импульсных шумов ("щелчков") используем их обнаружение по условию превышения приращением сигнала определенного уровня: если положительное приращение сигнала превышает этот уровень, то такой сигнал классифицируется как "щелчок" и данное приращение обнуляется. Если количество "щелчков" в канале  $I_0$  велико и одновременно

они отсутствуют в каналах  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , то этот факт является индикатором проявления грозовой активности, если же "щелчки" присутствуют также в каналах гармоник, то указанное условие свидетельствует о коммутационных или аварийных процессах в электрической сети.

### Заключение

К источникам мощных электромагнитных помех, воздействие которых на объекты энергетики практически не изучено, относятся электромагнитные поля ультранизкой частоты естественного и искусственного происхождения. В высоких широтах магистральные сети энергосистем подвергаются воздействию геомагнитных возмущений. В работе описаны предварительные результаты анализа данных, накопленных за 15 лет системой мониторинга геоиндуцированных токов в нейтралях автотрансформаторов в энергосистеме Кольского полуострова и Карелии. На основе анализа временных и спектральных характеристик токов в нейтралях автотрансформаторов выполнена классификация электромагнитных воздействий исходя из природы источников возмущения и характера реакции энергосистемы.

Система регистрации ГИТ в энергосистеме в высоких широтах и накопленные за многие годы данные являются уникальными. Дальнейшее развитие системы мониторинга и увеличение потока данных требует создания автоматических средств обнаружения и классификации событий. В статье показано, что для обработки кривых геоиндуцированных токов применимы уже существующие алгоритмы анализа широкого класса геофизических явлений, основанные на преобразовании Фурье и вейвлет-преобразовании.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 17-48-510199 p\_север\_a).

### Библиографический список

1. Ефимов Б., Сахаров Я., Селиванов В. Геомагнитные штормы. Исследование воздействий на энергосистему Карелии и Кольского полуострова // *Новости электротехники*. 2013. № 2 (80). С. 30–33.
2. Баранник М. Б., Данилин А. Н., Катькалов Ю. В., Колобов Б. Б., Сахаров Я. А. [и др.]. Система регистрации геоиндуцированных токов в нейтралях силовых автотрансформаторов // *Приборы и техника эксперимента*. 2012. № 1. С. 118–123.
3. Селиванов В. Н., Баранник М. Б., Билин В. А., Ефимов Б. В., Колобов В. В. [и др.]. Исследование гармонического состава тока в нейтрали трансформатора в периоды геомагнитных возмущений // *Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика*. 2017. № 1 (8), вып. 14. С. 44–52.
4. Мандрикова О. В., Жижикина Е. А. Автоматический способ оценки состояния геомагнитного поля // *Компьютерная оптика*. 2015. № 3. С. 420–428.
5. Клейменова Н. Г. Геомагнитные пульсации // *Модели космоса : в 2 т. / под ред. М. И. Панасюка*. М. : КДУ, 2007. Т. 1. С. 51–627.
6. Шихова Н. М., Анисимов С. В., Дмитриев Э. М. Автоматическое обнаружение короткопериодных геомагнитных пульсаций Pc1 // *Гелиогеофизические исследования*. 2017. № 16. С. 1–7.
7. Жамалетдинов А. Н., Шевцов Е. П., Велихов Е. П., Скороходов А. А., Колесников В. Е. [и др.]. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ-СНЧ диапазона (0,1–200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент FENICS) // *Геофизические процессы и биосфера*. 2015. Т. 14, № 2. С. 5–49.

### References

1. Efimov B., Saharov Ya., Selivanov V. Geomagnitnyie shtormyi. Issledovanie vozdeystviy na energosistemu Karelii i Kolskogo poluostrova [Geomagnetic storms. Research impacts on the energy system of Karelia and the Kola Peninsula] // *Novosti elektrotehniki*. 2013. N 2 (80). P. 30–33.
2. Barannik M. B., Danilin A. N., Katkalov Yu. V., Kolobov B. B., Saharov Ya. A. [i dr.]. Sistema registratsii geoinduktirovannyih tokov v neytralyah silovyih avtotransformatorov [A system for recording geomagnetically induced currents in neutrals of power autotransformers] // *Pribory i tehnika eksperimenta*. 2012. N 1. P. 118–123.
3. Selivanov V. N., Barannik M. B., Bilin V. A., Efimov B. V., Kolobov V. V. [i dr.]. Issledovanie garmonicheskogo sostava toka v neytrali transformatora v periodyi geomagnitnyih vozmuscheniy [Analysis of frequency response of neutral current in transformer under geomagnetic disturbance] // *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. Energetika*. 2017. N 1 (8), vyip. 14. P. 44–52.
4. Mandrikova O. V., Zhizhikina E. A. Avtomaticheskij sposob otsenki sostoyaniya geomagnitnogo polya [An automatic method for estimating the geomagnetic field] // *Kompyuternaya optika*. 2015. N 3. P. 420–428.
5. Kleymenova N. G. Geomagnitnyie pulsatsii [Geomagnetic pulsations] // *Modeli kosmosa : v 2 t. / pod red. M. I. Panasyuka*. M. : KDU, 2007. V. 1. P. 51–627.

6. Shihova N. M., Anisimov S. V., Dmitriev E. M. Avtomaticheskoe obnaruzhenie korotkoperiodnykh geomagnitnykh pulsatsiy Pc1 [Automatic detection of short-period geomagnetic pulsations Pc1] // Geliogeofizicheskie issledovaniya. 2017. N 16. P. 1–7.

7. Zhamaletdinov A. N., Shevtsov E. P., Velihov E. P., Skorohodov A. A., Kolesnikov V. E. [i dr.]. Issledovanie vzaimodeystviya elektromagnitnykh voln KNCh-SNCh diapazona (0,1–200 Gts) s zemnoy koroy i ionosferoy v pole promyshlennykh liniy elektroperedachi (eksperiment FENICS) [Study of interaction of ELF–ULF range (0.1–200 Hz) electromagnetic waves with the Earth's crust and the ionosphere in the field of industrial power transmission lines (FENICS experiment)] // Geofizicheskie protsessy i biosfera. 2015. V. 14, N 2. P. 5–49.

#### Сведения об авторах

**Селиванов Василий Николаевич** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, канд. техн. наук; e-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru

**Selivanov V. N.** – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Northern Energetics Research Centre – Branch of the Federal Research Centre KSC RAS, Cand. of Tech. Sci.; e-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru

**Баранник Максим Борисович** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: maxbar@ien.kolasc.net.ru

**Barannik M. B.** – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Northern Energetics Research Centre – Branch of the Federal Research Centre KSC RAS, Researcher; e-mail: maxbar@ien.kolasc.net.ru

**Билин Владислав Андреевич** – Академгородок, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Полярный геофизический институт (ПГИ), лаборант; e-mail: bilinvlad@gmail.com

**Bilin V. A.** – 26a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Polar Geophysical Institute (PGI), Laboratory Assistant; e-mail: bilinvlad@gmail.com

**Ефимов Борис Васильевич** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, д-р техн. наук, директор; e-mail: efimov@ien.kolasc.net.ru

**Efimov B. V.** – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Northern Energetics Research Centre – Branch of the Federal Research Centre KSC RAS, Dr. of Tech. Sci., Director, e-mail: efimov@ien.kolasc.net.ru

**Колобов Виталий Валентинович** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: l\_i@mail.ru

**Kolobov V. V.** – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Northern Energetics Research Centre – Branch of the Federal Research Centre KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: l\_i@mail.ru

**Сахаров Ярослав Алексеевич** – Академгородок, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Полярный геофизический институт (ПГИ), канд. физ.-мат. наук; e-mail: sakharov@pgia.ru

**Sakharov Ya. A.** – 26a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Polar Geophysical Institute (PGI), Cand. of Phys.-Math. Sci.; e-mail: sakharov@pgia.ru



V. N. Selivanov, M. B. Barannik, V. A. Bilin, B. V. Efimov,  
V. V. Kolobov, Ya. A. Sakharov

### **Analysis of long-term monitoring of autotransformer neutral currents**

The Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences together with the Polar Geophysical Institute is carrying out research concerning the effect of geomagnetic storms on the state of electrical networks and transformer substations on the Kola Peninsula and in Karelia. A regional system for monitoring currents in transformer neutral was created which collected a huge array of information on the influence of geomagnetic disturbances on a 800 km electric network. Overhead transmission lines are giant antennas that capture electromagnetic energy of any nature from the surrounding space. An analysis of the data accumulated over many years shows that in the current of a grounded neutral there are reliable responses to a wide range of electromagnetic phenomena on the Earth and in the near-Earth space: pulsed and quasisinusoidal pulsations of the geomagnetic field, extremely-low frequency components of artificial signals, lightning discharges and internal transients in the power system. To identify phenomena, a visual method is used to analyze the time and spectral characteristics of signals, which takes a long time and is rather subjective. There is always the possibility that some important, previously unidentified phenomena will go unnoticed. The paper describes the characteristic features of signals detected in neutral currents of power transformers. Algorithms of digital signal processing that can be used to create programs for automatic analysis of large data sets have been considered. To the greatest extent, numerical methods based on wavelet expansion and Fourier transform are suitable for studying nonsteady signals of a complex structure.

**Key words:** geomagnetic storm, geomagnetically induced current, overhead transmission line, digital signal processing, wavelet transform.