

7) определяют потери мощностей и квадрат потерь напряжения на сопротивлении Z :

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= P_1 - \Delta P_{10} - P_2 - \Delta P_{20}; \\ \Delta Q_{12} &= Q_1 - \Delta Q_{10} - Q_2 - \Delta Q_{20}; \\ U_{\phi 12}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{12}^2(t_j) \Big|_{j=1}^N = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u_1(t_j) - u_2(t_j))^2 \Big|_{j=1}^N. \end{aligned}$$

8) вычисляют параметры продольной ветви схемы замещения:

$$\underline{Z} = R + jX = \frac{U_{\phi 12}^2}{P_{12} - jQ_{12}};$$

9) находят обобщенные постоянные четырехполюсника по формулам (11);

10) вычисляют волновые и погонные параметры линии по формулам (1–4).

УДК 621.311.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКА В НЕЙТРАЛИ ТРАНСФОРМАТОРА В ПЕРИОД ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Г.Н. Чистяков, С.Н. Сигаев

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск
E-mail: chist2@yandex.ru

Представлены основные результаты статистической обработки данных о нарушениях работы электрооборудования электроэнергетической системы ОАО «Хакасэнерго» с учетом данных о состоянии геомагнитного поля. Приведены данные о результатах экспериментальных исследований в нейтрали трансформатора ТРДН-32000/110, установленного в ОРУ-110 кВ Абаканской ТЭЦ (ТГК-13), проведенные в период повышенной геомагнитной активности и в период спокойного состояния геомагнитного поля. Установлена зависимость отказов оборудования под действием вариаций геомагнитного поля в период геомагнитных бурь.

Ключевые слова:

Геоиндуцированный ток, геомагнитное поле, ток в нейтрали трансформатора, вариация.

Key words:

The geoinduced current, geomagnetic field, the current in the neutral of the transformer, the variation.

При всем многообразии причин, вызывающих перенапряжения в системах электроснабжения, их принято делить на две группы: внутренние и внешние перенапряжения. К последним, до недавнего времени, относили только грозовые перенапряжения. Однако, на основании исследований, выполненных в последние годы, к ним следует отнести также перенапряжения, обусловленные протеканием в электрических сетях геоиндуцированных токов. Естественным источником этих токов являются мировые геомагнитные бури, периодически возникающие на Земле в результате солнечной активности. Соответственно, наиболее часто и с высокой интенсивностью эти возмущения наблюдаются в так называемой авроральной зоне – полосе широт от 60 до 70°. По результатам мониторинга, величины геоиндуцированных токов в электрических сетях 330 кВ для таких широт лежат в интервале 2...7 А, а их редкие кратковременные всплески могут достигать 15...25 А [1].

Повторяемость геомагнитных бурь зависит от фазы 11-летнего цикла солнечной активности и, чаще всего, наблюдается спустя 3–4 года после прохождения ее максимума. Скорость нарастания токов электроджетов составляет у мощных геомагнитных бурь до 400 А/с, а магнитных вариаций до 500 нТл/мин. В этот период активность излуче-

ния Солнца может возникать такой силы, которая вносит перебои в работу спутников на орбите, мешает работе сотовой связи, влияет на электромагнитную обстановку и надежность в системах электроснабжения. В настоящее время активность Солнца, несмотря на новый 11-летний цикл активности, минимальна, но возможно, что после нескольких лет чрезвычайно низкой солнечной активности и отсутствия сильных вспышек, Солнце вновь начнет набирать силу и увеличивать активность.

Электромагнитная обстановка в системах электроснабжения определяется проникаемостью электромагнитных полей в любую точку пространства и взаимным превращением кондуктивной помехи в индуктивную и наоборот. В один и тот же момент времени на систему электроснабжения воздействуют поля различных источников и электромагнитные помехи, в том числе и геомагнитные возмущения. Электромагнитные помехи оказывают существенное влияние на нормальную работу энергосистем, что может привести к ухудшению их работы, сбоям, выходу из строя и развитию аварий с причинением вреда здоровью и жизни людей.

Известно, что протекание по обмоткам силовых трансформаторов и трансформаторов тока квазипостоянных геомагнитных токов, амплитуды

которых могут во много раз превосходить действующее значение переменного тока возбуждения, вызывает насыщение стали сердечников. В результате этого явления происходит увеличение тока намагничивания и рост содержания гармоник в сети. Также одним из видов отрицательного воздействия геоиндуктивных токов на системы электроснабжения является возможное возникновение резонансных перенапряжений при совпадении резонансной частоты какого-либо контура с частотой геоиндуцированного тока.

Впервые нарушения нормальной эксплуатации электроэнергетических систем и устройств связи из-за геоиндуцированных токов были отмечены в середине прошлого столетия. С тех пор эти нарушения периодически отмечаются в северных странах, где имеются развитые сети высокого и сверхвысокого напряжения, в особенности в периоды усиления солнечной активности. В частности в Канаде геоиндуцированные токи регистрируются в течении последних 20 лет [2]. Мировой опыт показывает, что геоиндуцированные токи являются причиной тяжелых аварий, функциональных нарушений и ускоренного старения и накопления дефектов электрооборудования магистральных энергосистем. В России данная проблематика исследуется в Кольском научном центре РАН, причем исследования посвящены мониторингу токов в высоковольтной сети, вызванных геомагнитными процессами, а также их влиянию на надежность работы автотрансформаторов.

Анализ влияния этих явлений на работу электрооборудования проводился применительно для электроэнергетической системы ОАО «Хакасэнерго». За четырехлетний период (2004–2007 гг.) были собраны следующие группы статистических данных:

- Оперативная информация о нарушениях в работе энергообъектов: аварийные донесения о месте, времени, продолжительности и характере отключений, величины недоотпущенной электроэнергии.
- Магнитограммы – суточные вариации элементов земного магнетизма по данным Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, K -индекс, а также компоненты H , D и Z геомагнитного поля в цифровом виде.

Для анализа влияния всех составляющих и полного вектора магнитной индукции на отказы электрооборудования были определены скорости изменения всех составляющих и полного вектора магнитной индукции путем графического дифференцирования магнитограмм.

Статистика K -индекса и скоростей изменения всех составляющих показывает, что из всех 854 случаев отключения энергообъектов геомагнитное поле было возмущенным в 721 случае, а в некоторых случаях были магнитные бури.

Исследованиями, выполненными на основе статистических данных, была подтверждена высокая корреляция ($K_{\text{корр.}}=0,6...0,8$) между отказами эл-

ментов электроэнергетической системы и характеристиками геомагнитных возмущений.

Величины геоиндуцированных токов, измеренные на широте г. Абакана, которая составляет 54° , являются менее опасными, чем токи, возникающие на более высоких широтах. Однако, в электрических сетях сложной конфигурации последствия от протекания таких токов (частота токов лежит в пределах $0...10$ Гц) могут быть отрицательными.

Для оценки геомагнитных токов в нейтрали трансформатора был выбран силовой трансформатор Т1 Абаканской ТЭЦ (ТГК-13), рис. 1.

Целью выполнения экспериментальных измерений является исследование тока в нейтрали трансформатора ТРДН-32000/110, установленного в ОРУ-110 кВ Абаканской ТЭЦ. Трансформатор в период проведения эксперимента работал в режиме холостого хода. Эксперимент проводился в период смешанной геомагнитной активности с 19 по 26 октября 2007 г., рис. 2, 3.

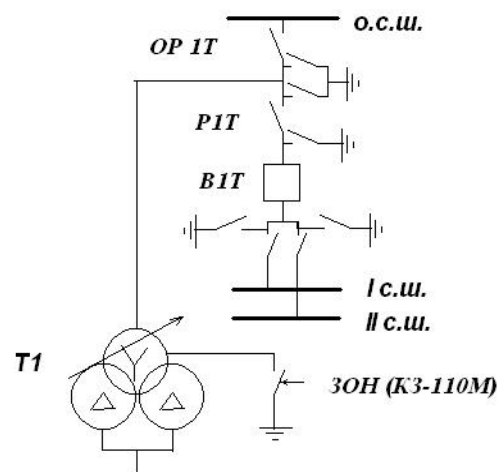


Рис. 1. Схема подключения трансформатора Т1. Т1 – первый силовой трансформатор Абаканской ТЭЦ; 1 с.ш. – первая система шин; 2 с.ш. – вторая система шин; о.с.ш. – обходная система шин; В1Т – выключатель первого силового трансформатора; Р1Т – разъединитель первого силового трансформатора; ОП 1Т – обходной разъединитель первого силового трансформатора; ЗОН – заземлитель

Для оценки степени возмущенности геомагнитного поля был введен K -индекс с девятибалльной шкалой, которая принята в настоящее время во многих странах. K -индекс представляет собой численную характеристику степени возмущенности, выраженную в баллах, где каждому баллу соответствует амплитуда колебаний магнитных элементов за трехчасовой промежуток, с поправкой, на спокойную суточную вариацию. Качественное состояние магнитного поля в зависимости от K -индекса можно охарактеризовать следующим образом: $K \leq 2$ – спокойное; $K=2,3$ – слабовозмущенное; $K=4$ – возмущенное; $K=5,6$ – магнитная буря; $K \geq 7$ – большая магнитная буря [3].

Исходя из данных Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 24.10.2007 г., K -индекс

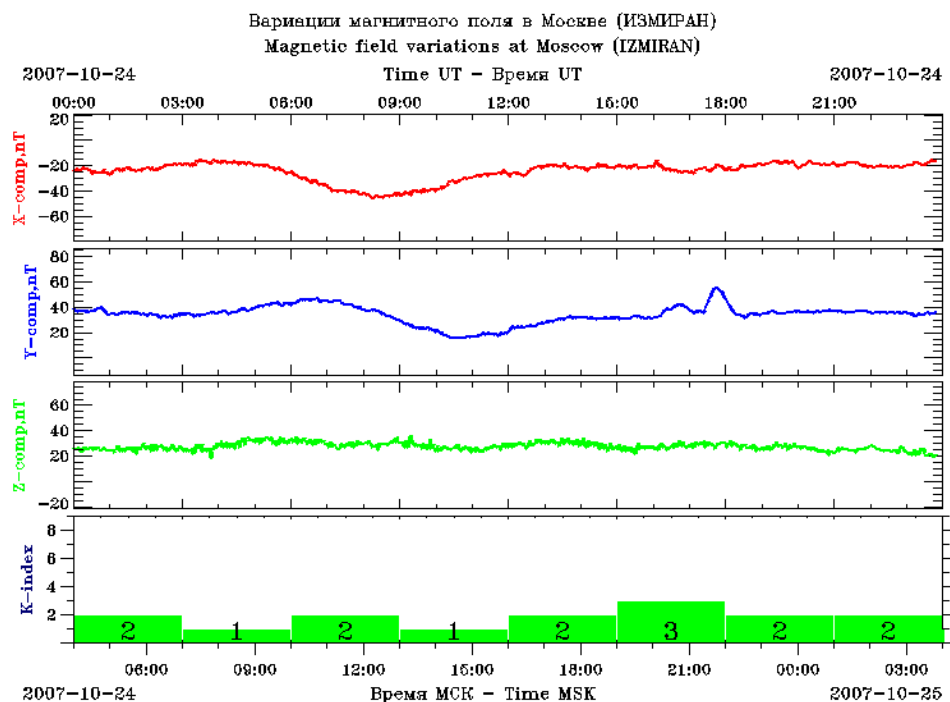


Рис. 2. Спокойное состояние геомагнитного поля

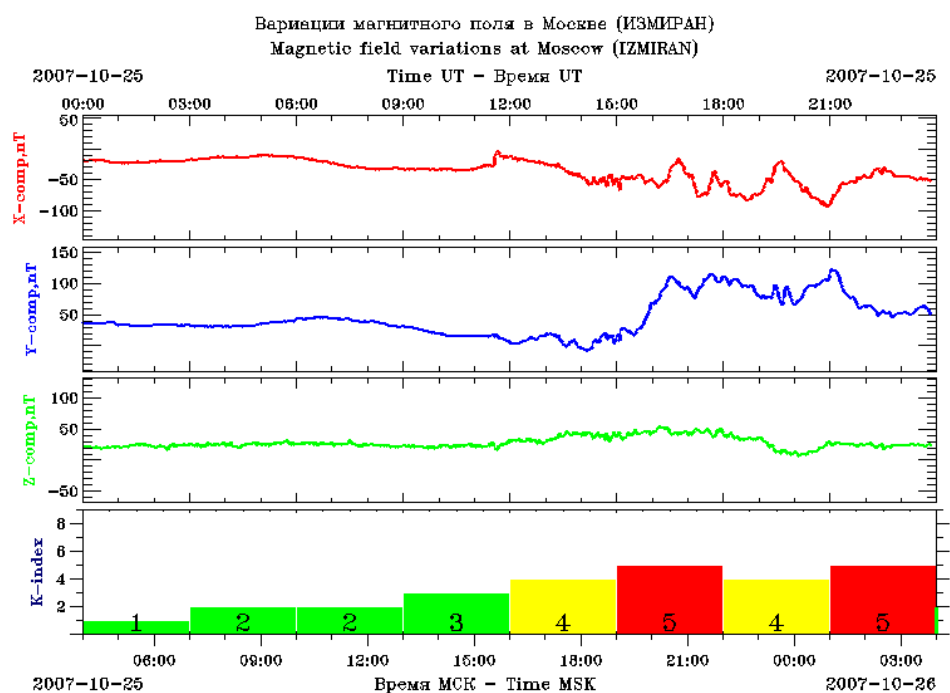


Рис. 3. Геомагнитная буря

варьировался от 1 до 3, следовательно, геомагнитное поле было слабозмущенным, а 25.10.2007 г. значение K -индекса возросло до 5, то есть в этот день была магнитная буря.

На рис. 4 представлена схема измерения суммы тока нулевой последовательности в нейтрали трансформатора Т1, обусловленного несимметрией в фазах трехфазной системы и наведенных геомагнитных токов от линий, присоединенных к системам шин ОРУ ТЭЦ.

Измеритель показателей качества электрической энергии «Ресурс UF2M» предназначен для измерения характеристик напряжения, включая основные показатели качества электрической энергии, а также характеристик тока, мощности и энергии переменного трехфазного и однофазного тока. Измеритель использовался с разъемными трансформаторами тока (токовыми клещами) типа КТ52-5-10-1000. Измеритель выполняет статистическую обработку результатов измерения согласно ГОСТ 13109-97.

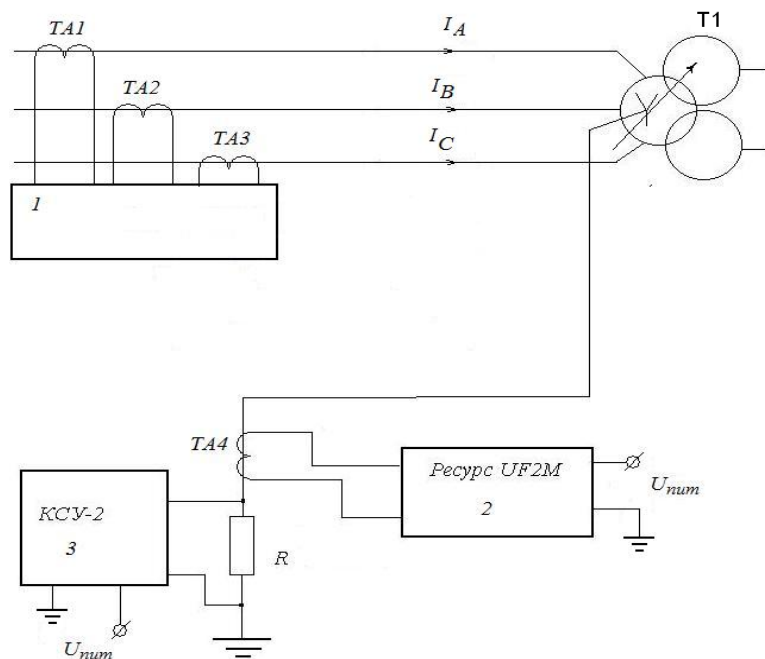


Рис. 4. Схема измерения тока в нейтрали трансформатора Т1: 1) система измерения и фиксации токов фаз; 2) измеритель тока в нейтрали трансформатора Т1; 3) самопишущий прибор

Значения тока в течение одной минуты усредняются. В эксперименте фиксировались токи трех фаз (I_A, I_B, I_C) через трансформаторы тока ТА1–ТА3. Ток в нейтрали трансформатора I_n измерялся и сохранялся в памяти измерителя показателей качества электрической энергии «Ресурс UF2М», а также контролировался по падению напряжения на резисторе R самопишущим потенциометром КСУ-2.

Значения тока, обусловленного изменениями геомагнитной обстановки Земли, рассчитывали по формуле:

$$I_{\text{geo}} = I_n - I_0,$$

где I_n – ток в нейтрали трансформатора; I_0 – ток нулевой последовательности, рассчитанный на основе токов фаз при решении системы уравнений:

$$\begin{cases} I_A = I_1 + I_2 + I_0 \\ I_B = a^2 I_1 + a I_2 + I_0, \\ I_C = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \end{cases}$$

где $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

Полученные, измеренные и рассчитанные данные токов в нейтрали трансформатора были обработаны с помощью аналитической платформы «Deductor». Для обработки данных была применена парциальная обработка для каждого поля независимо, которая включает три алгоритма, каждому из которых соответствует свой шаг: восстановление пропущенных данных, редактирование аномальных данных и спектральная обработка. На рис. 5 представлены графики изменения токов в нейтрали трансформатора, полученные путём обработки результатов измеренных прибором «Ресурс UF2М».

Для сопоставления измеренных и рассчитанных данных с данными о состоянии геомагнитного поля были использованы данные измерения магнитного поля Земли, Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН в цифровом виде, составляющих трёх компонент (X, Y, Z). Также использованы данные об изменении геомагнитного поля в графическом исполнении в виде магнитограмм, из которых выделены значения K -индекса в период проведения эксперимента.

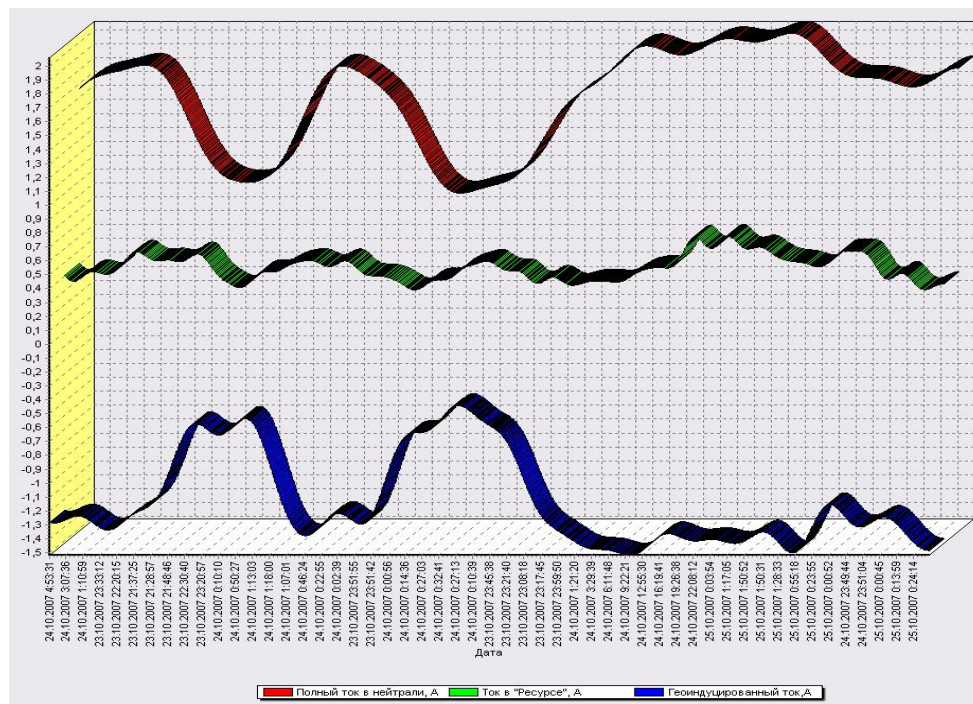
Данные изменения геомагнитного поля были сгруппированы и занесены в табл. 1 с разбивкой по времени за весь период эксперимента. Для получения более полной информации о состоянии геомагнитного поля был применен метод табличного дифференцирования, в результате чего были рассчитаны скорости изменения всех составляющих магнитного поля Земли, фрагмент вычисления представлен в табл. 1.

Скорости изменения каждой составляющей геомагнитного поля рассчитывались по формуле:

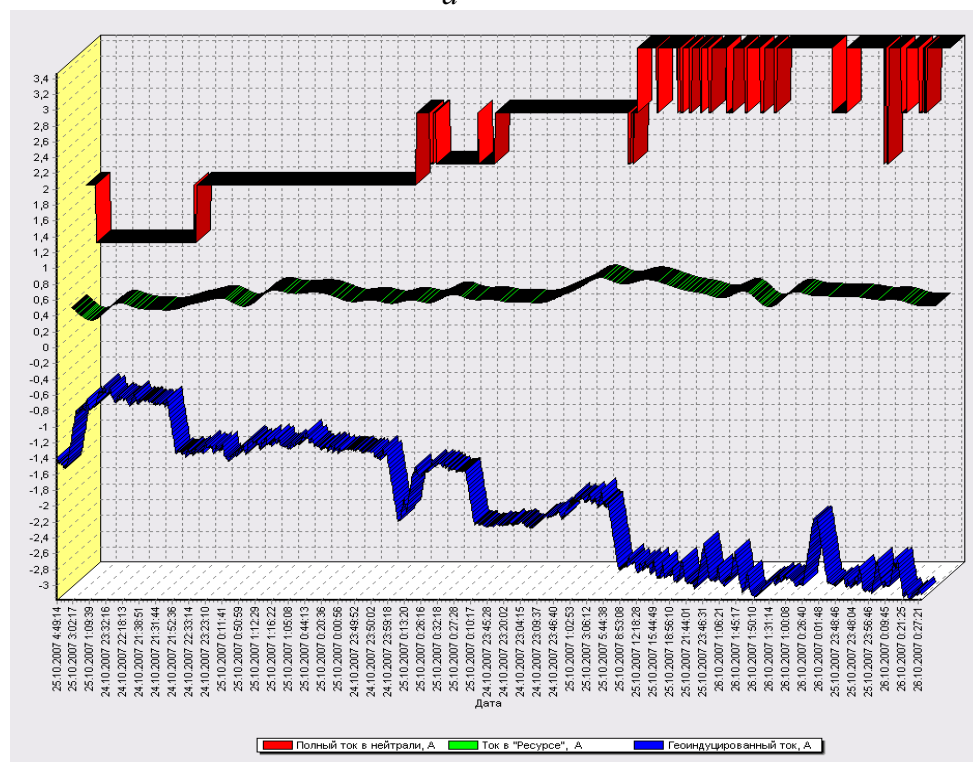
$$dHt = \frac{-3Ht_1 + 4(Ht_2 - Ht_3)}{2 \cdot 60},$$

где Ht_1, Ht_2, Ht_3 – составляющие геомагнитного поля.

Окончательная обработка результатов эксперимента также проводилась с помощью аналитической платформы «Deductor». Рассматривалась зависимость K -индекса и скоростей изменения составляющих геомагнитного поля относительно геоиндуцированного тока в нейтрали трансформатора с помощью корреляционного анализа, при выполнении которого выяснялась статистическая взаимосвязь нескольких величин, данные которого предоставлены в табл. 2.



а



б

Рис. 5. Результаты измерения тока в нейтрали трансформатора во время: а) спокойного состояния геомагнитного поля; б) геомагнитной бури

Корреляционный анализ применяется для количественной оценки взаимосвязи двух наборов данных, представленных в безразмерном виде. Коэффициент корреляции выборки представляет отношение ковариации двух наборов данных к про-

изведению их стандартных отклонений и рассчитывается как







$$P_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\delta_X \delta_Y},$$

где δ_X, δ_Y – стандартные отклонения:

Таблица 1. Табличное дифференцирование составляющих геомагнитного поля

Дата	H, нТ	Z, нТ	X, нТ	Y, нТ	Ht, нТ	dH, нТ/с	dZ, нТ/с	dX, нТ/с	dY, нТ/с	dHt, нТ/с
24.10.2007	4,93	0,76	2,23	4,40	4,99	-0,108	-0,013	-0,063	-0,087	-0,109
	4,64	1,41	2,29	4,04	4,85					
	4,21	1,24	2,52	3,37	4,39					
25.10.2007	84,35	14,00	-28,02	79,56	85,50	-2,043	-0,405	0,715	-1,914	-2,083
	82,82	14,78	-27,21	78,22	84,13					
	80,85	16,44	-27,64	75,98	82,51					

Таблица 2. Данные корреляционного анализа скоростей изменения составляющих геомагнитного поля относительно геоиндуцированного тока в нейтрали трансформатора

Входные поля	Корреляция с выходными полями
Поле	Геоиндуцированный ток, А
K-индекс	 -0,909
dX, нТ/с	 -0,652
dY, нТ/с	 0,565
dZ, нТ/с	 0,458
dH, нТ/с	 0,728
dHt, нТ/с	 0,742

$$\delta_x^2 = \frac{1}{n} \sum (X_j - \mu_x)^2, \quad \delta_y^2 = \frac{1}{n} \sum (Y_j - \mu_y)^2.$$

Корреляционный анализ дает возможность установить, ассоциированы ли наборы данных по величине, то есть, большие значения из одного набора данных связаны с большими значениями другого набора (положительная корреляция), или, наоборот, малые значения одного набора связаны с большими значениями другого (отрицательная корреляция), или данные двух диапазонов никак не связаны (нулевая корреляция).

В процессе эксперимента, а именно 25.10.2007 г. на Абаканской ТЭЦ произошло аварийное отключение из-за неполадки в оборудовании. Данный факт засвидетельствован в оперативной информации о нарушениях в работе энергообъектов. Причиной неполадки в оборудовании из официальных источников стало превышение номинальных значений тока в поврежденном оборудовании.

Выводы

1. При обработке данных о нарушениях работы электрооборудования электроэнергетической системы ОАО «Хакасэнерго» с учетом данных о состоянии геомагнитного поля было выявлено, что в зависимости от возмущения геомагнитной обстановки проявляются различные величины геоиндуцированные токи в нейтрали трансформатора. Так, например, 24.10.2007 г.,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранник М.Б., Данилин А.Н., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Разработка систем мониторинга геоиндуцированных токов в магистральных линиях 330 кВ «Колэнерго» // Электромагнитная совместимость и перенапряжения в высоковольтных сетях / под ред. В.Н. Селиванова. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. – С. 7–18.

когда геомагнитное поле было слабозмущенным, а 25.10.2007 г. была геомагнитная буря, значение токов в нейтрали трансформатора оказались на порядок больше.

2. Статистическая обработка результатов измерений показала, что изменения происходят намного быстрее в дни с более возмущенной геомагнитной обстановкой. С помощью корреляционного анализа выявлена зависимость повышения геоиндуцированного тока от повышения значений K-индекса ($K_{\text{корр.}}=0,9$) и повышения значений скорости изменения полной составляющей геомагнитного поля ($K_{\text{корр.}}=0,74$).
3. Несомненная связь изменений геомагнитного поля и геоиндуцированных токов в нейтрали трансформатора ТРДН-32000/110, работающего в режиме холостого хода, было выявлено в ходе экспериментальных исследований, выполненных в ОРУ-110 кВ Абаканской ТЭЦ в октябре 2007 г. Измерения показали наличие геоиндуцированного тока: прослеживается несомненная зависимость изменения тока во времени и вариаций составляющих геомагнитного поля.
4. Несмотря на широту месторасположения, необходимо создание службы мониторинга токов в нейтрали силовых трансформаторов. Накопление большого экспериментального материала позволит применить прогнозирование аварийных ситуаций, что особенно актуально для линий большой протяженности.

2. Гершенгорн А.И. Воздействия геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем // Электрические станции. – 1993. – № 6. – С. 54–63.
3. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – Л.: Тригон, 1978. – С. 15–20.

Поступила 08.04.2010 г.