

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЯХ**

© 2014

В.В. Вахнина, кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»

А.А. Кувшинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника»

В.А. Шаповалов, кандидат технических наук, доцент,
заместитель ректора-директор института энергетики и электротехника

А.Н. Черненко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»

Д.А. Кретов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»

В.А. Кузнецов, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и электротехника»

Т.А. Рыбалко, ассистент кафедры «Электроснабжение и электротехника»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: электроэнергетическая система; ЭЭС; модель; моделирование; геомагнитные бури; ГМБ; геоиндуцированный ток; ГИТ.

Аннотация: Разработана модель и алгоритм расчета функционирования электроэнергетической системы любой конфигурации и сложности при геомагнитных бурях различной интенсивности и длительности. Расчеты реализованы в математической системе MATLAB в пакете Simulink. При создании модели электроэнергетической системы использованы как стандартные блоки Simulink и SimPowerSystems, так и блоки, разработанные авторами. Особенности разработанной расчетной модели электроэнергетической системы являются: привязка объектов к географическим координатам местности; моделирование силовых трансформаторов на основе применения Т-образной схемы замещения с нелинейной взаимной индуктивностью ветви намагничивания, которая является функцией от величины геоиндуцированного тока; введение источника гармонических составляющих намагничивающих токов силовых трансформаторов; расчет действующих значений активной, реактивной, полной мощностей во всех элементах с учетом вклада гармонических составляющих тока и напряжения. Приведены результаты моделирования воздействия геомагнитной бури различной интенсивности с направлением вектора напряженности геоэлектрического поля запад-восток для электроэнергетической системы Самарского региона.

ВВЕДЕНИЕ

Функционирование современных электроэнергетических систем (ЭЭС) связано с существенными трудностями из-за сложности структуры генерирующих мощностей и основной электрической сети, многообразия режимов их работы, необходимости учета требований надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей, сильных внешних технологических и экономических связей, неопределенности будущих условий развития ЭЭС, риска возможных экстремальных условий в развитии системы и других важных факторов. Все это приводит к тому, что современные ЭЭС становятся более уязвимыми к внешним возмущениям, в том числе и геомагнитным бурям (ГМБ) [1–5].

Во время геомагнитной бури вариации геомагнитного поля индуцируют на поверхности Земли медленно меняющееся электрическое поле. Горизонтальная компонента геоэлектрического поля характеризуется напряженностью 1–20 В/км и временем изменения от 10 с до 30 минут, вектор напряженности этого поля преимущественно ориентирован по меридиану. Между заземленными точками нейтралей силовых трансформаторов подстанций ЭЭС возникает ЭДС [6]. На протяженных линиях электропередач (ЛЭП) 400–500 км ЭДС может достигать нескольких киловольт, и по электрическим сетям циркулирует квазипостоянный ток, который принято называть геоиндуцированным током (ГИТ) [7]. Основное воздействие ГИТ на ЭЭС заключается в насыщении магнитной системы силовых трансформаторов [4, 8–11]. Проходя через заземленную нейтраль силового трансформатора, ГИТ производят дополнительное одностороннее подмагничивание сердечника силово-

го трансформатора. В ЭЭС увеличивается потребление реактивной мощности и снижается пропускная способность электрической сети, происходит падение напряжения, возможны ложные срабатывания релейной защиты и автоматики, что может привести к развитию аварии и нарушению электро-снабжения потребителей [4, 5, 12, 13]. Возможно нарушение электроснабжения больших регионов на длительное время, что может привести к катастрофическим последствиям для потребителей, экологическим авариям при разрушении химически опасных, бытовых и промышленных объектов [5, 14].

Динамика процессов при геомагнитных бурях в ЭЭС, которая содержит множество взаимодействующих между собой элементов, практически не исследована. Проведение натурных экспериментов в масштабах ЭЭС практически невозможно. Поэтому требуется разработка альтернативных методов и средств. Одним из таких альтернативных методов является моделирование, которое позволяет исследовать функционирование ЭЭС при воздействии геоиндуцированных токов с величинами, характерными при геомагнитных бурях для регионов средних и высоких широт.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЯХ

Расчеты реализованы в математической системе MATLAB в пакете Simulink [15–17]. Разработанный алгоритм расчета ЭЭС при геомагнитных бурях приведен на рис. 1 и позволяет выполнять моделирование ЭЭС любой конфигурации и сложности, содержащей как линейные, так и нелинейные элементы.

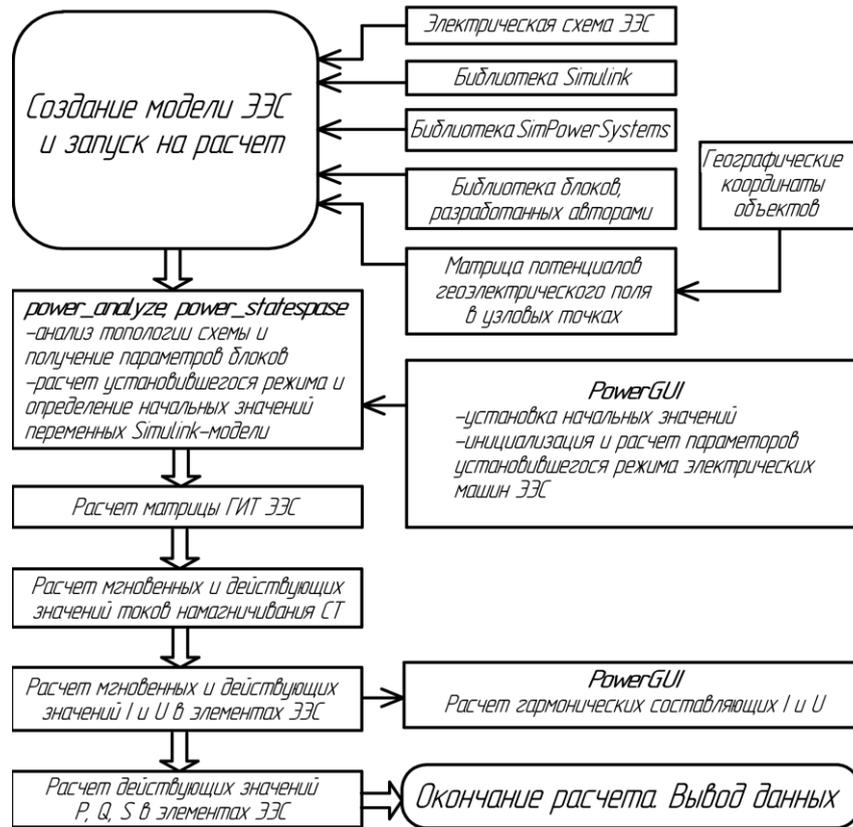


Рис. 1. Алгоритм расчета функционирования электроэнергетической системы при геомагнитных бурях

При создании модели ЭЭС используются как стандартные блоки Simulink и SimPowerSystems, так и блоки, разработанные авторами [18–23]. Перед началом каждого расчета режима функционирования ЭЭС при ГМБ происходит инициализация модели. При инициализации производится анализ топологии модели ЭЭС, вычисляется модель пространства состояний структурной схемы ЭЭС, выполняется расчет установившегося режима и строится эквивалентная модель, которая затем рассчитывается в Simulink.

В эквивалентной Simulink-модели используется блок State-Space или блок S-function для моделирования линейной части системы. Для моделирования нелинейных SimPowerSystems-блоков используются Simulink-модели из библиотеки powerlib_models и модели, разработанные авторами. Нелинейные Simulink-модели соединяются с линейной частью схемы с помощью входных (напряжения) и выходных (токи) переменных. Нелинейные модели включаются в цепи обратных связей линейной части Simulink-модели. Для нелинейных элементов, используется принципиальная модель на базе управляемого источника напряжения или управляемого источника тока.

Расчет модели ЭЭС начинается с расчета установившегося режима при отсутствии ГИТ (при синусоидальных токах и постоянных скоростях). Для этого необходимо предварительно инициализировать модель ЭЭС: выполнить расчет балансов активных и реактивных мощностей в модели.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Следует отметить следующие особенности расчетной модели ЭЭС, учитывающие протекание ГИТ по ее элементам при геомагнитных бурях.

1. Важным этапом при разработке модели является привязка объектов ЭЭС к географическим координатам местности, что позволяет определить матрицу потенциалов геоэлектрического поля в узловых точках U_{ij} для расчета геоиндуцированных токов в нейтралях и обмотках силовых трансформаторов и линиях электропередач [24].

Для записи матрицы потенциалов геоэлектрического поля в узловых точках U_{ij} определяются разности потенциалов на поверхности Земли между каждой парой географических координат N_i и N_j заземлителей двух подстанций, связанных j прямолинейными участками воздушных ЛЭП, с помощью интегрального соотношения

$$U_{ij} = \int_{l_j} \vec{E}_{ij} \cdot d\vec{l}_j = \int_{l_j} E_{ij} \cdot \cos \alpha_j \cdot dl_j, \quad (1)$$

где \vec{E}_{ij} – вектор горизонтальной компоненты напряженности геоэлектрического поля; $d\vec{l}_j$ – вектор, равный по величине элементу пути dl_j и направленный

по касательной к выбранному пути интегрирования l_j ;

α_j – угол между векторами \vec{E}_{ij} и \vec{dl}_j .

Величина разности потенциалов не зависит от выбора конкретного пути интегрирования, который в частности может совпадать с трассой ЛЭП. Поскольку в расчетах принято, что трасса ЛЭП состоит из прямолинейных участков, то с учетом $E=const$ целесообразно в выражении (1) заменить интегрирование на суммирование и записать:

$$U_{ij} = E_{ij} \sum_{j=1}^J l_j \cdot \cos \alpha_j = E_{ij} \cdot L_{\Sigma}$$

где l_j – длина j -го участка ЛЭП; α_j – угол ориентации j -го участка ЛЭП относительно вектора напряженности геоэлектрического поля; L_{Σ} – электрическое расстояние между подстанциями, равное сумме проекций прямолинейных участков ЛЭП на направление вектора напряженности геоэлектрического поля.

2. Матрица ГИТ для электрической сети состоит из значений ГИТ для каждого ij -го замкнутого контура их протекания (теллурические токи – заземлитель – нейтраль – заземленная обмотка силового трансформатора T_i – провода ЛЭП – заземленная обмотка силового трансформатора T_j – нейтраль – заземлитель – теллурические токи) и запишется в виде:

$$I_{\text{ГИТ}ij} = \frac{U_{ij}}{R_{\Sigma ij}}$$

где $R_{\Sigma ij}$ – матрица суммарных сопротивлений для контура протекания ГИТ. В общем случае определяется конфигурацией электрической сети. В состав каждого элемента матрицы $R_{\Sigma ij}$ входят активные сопротивления заземленных обмоток силовых трансформаторов T_i и T_j , фазных проводов ЛЭП, сопротивления растекания заземлителей. В отдельных случаях, например, для определения «высокочастотных» компонент ГИТ ($f \approx 0,1-1$ Гц) необходимо учитывать и активное сопротивление земли [25].

3. Для расчета токов намагничивания силовые трансформаторы ЭЭС моделируются на основе применения Т-образной схемы замещения с нелинейной взаимной индуктивностью ветви намагничивания. Для расчета токов намагничивания силовых трансформаторов должны быть заданы:

– конструктивные параметры силовых трансформаторов (сечение стержня магнитной системы S , средняя длина магнитной линии l_{cp} , число витков заземленных обмоток);

– параметры петли магнитного гистерезиса стали магнитной системы силового трансформатора: коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и индукция насыщения B_s для моделирования кривой намагничивания;

– параметры схемы замещения ЭЭС;

– матрица потенциалов геоэлектрического поля в узловых точках ЭЭС.

Кривая намагничивания магнитной системы силового трансформатора в модели задается как кусочно-линейная зависимость между потокоцеплением Ψ и мгновенным значением тока намагничивания i_0 . Зависимость $\Psi(i_0)$ определяется из модели кривой $B = f(H)$ с помощью упрощенной гистерезисной модели магнитной системы силового трансформатора [26]. В расчетной модели СТ для построения кривой $\Psi(i_0)$ используется 150–200 значений.

Мгновенные значения тока намагничивания силового трансформатора T_i , входящего в ij -й замкнутый контур протекания ГИТ, определяются из решения дифференциального уравнения

$$M_i \frac{di_{0i}(I_{\text{ГИТ}ij})}{dt} + i_{0i}(I_{\text{ГИТ}ij})R_{\Sigma ij} = u_i(t) + U_{ij}$$

где $u_i(t)$ – напряжение на зажимах заземленной обмотки силового трансформатора T_i , обусловленное генератором переменного тока с основной частотой; i_{0i} – ток намагничивания силового трансформатора T_i ; M_i – взаимная индуктивность ветви намагничивания T_i . При протекании геоиндуцированных токов по заземленным обмоткам силовых трансформаторов взаимная индуктивность ветви намагничивания является функцией от величины ГИТ $M=M(I_{\text{ГИТ}})$ и определяется положением рабочей точки на ветви намагничивания.

4. При протекании ГИТ по заземленным обмоткам СТ амплитудные значения токов намагничивания многократно возрастают и имеют ярко выраженную однополупериодную несимметрию. Ток намагничивания силовых трансформаторов при геомагнитных бурях становится источником высших гармонических в ЭЭС. Поэтому для расчета мгновенных значений тока и напряжений в расчетной модели ЭЭС контур намагничивания силовых трансформаторов учитывается введением источника

$\sum_{n=0}^{\infty} I_{0(n)}$ гармонических составляющих $I_{0(n)}$ намагничивающих токов (рис. 2). В схеме замещения двухобмоточного СТ на рис. 2 приняты следующие обозначения: U_{BH} , U_{HH} – действующие значения линейных напряжений обмоток высокого и низкого напряжения; $Z_{BH(n)}$, $Z_{HH(n)}$ – полные сопротивления обмоток высокого и низкого напряжения для n -й гармоники.

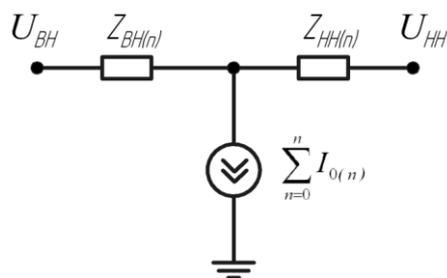


Рис. 2. Т-образная схема замещения двухобмоточного силового трансформатора при протекании ГИТ

5. Процессы насыщения магнитной системы силовых трансформаторов сопровождаются многократным возрастанием несинусоидальных токов намагничивания, которые распространяются в электрической сети, что приводит к значительному искажению кривых токов и напряжений в ЭЭС. Поэтому активная мощность несинусоидального тока в элементе расчетной модели ЭЭС определяется как средняя мощность за период

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt.$$

После интегрирования получаем

$$P = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_{(n)m} I_{(n)m} \cos \varphi_n}{2} = \sum_{n=0}^{\infty} U_{(n)} I_{(n)} \cos \varphi_{(n)},$$

где U_0, I_0 – постоянные составляющие напряжения и тока; $U_{(n)m}, I_{(n)m}$ – амплитудные значения n -х гармоник напряжения и тока; $U_{(n)}, I_{(n)}$ – действующие значения n -х гармоник напряжения и тока; $\varphi_{(n)} = \varphi_{u(n)} - \varphi_{i(n)}$.

Полная мощность S определяется как произведение действующих значений токов и напряжений:

$$S = UI = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_{(n)}^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{(n)}^2}.$$

Реактивная мощность в элементе расчетной модели ЭЭС определяется как сумма реактивных мощностей отдельных гармоник:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{(n)} = \sum_{n=1}^{\infty} U_{(n)} I_{(n)} \sin \varphi_{(n)}$$

Таким образом, в алгоритме расчета режимов ЭЭС при геомагнитных бурях реализовано:

- привязка объектов ЭЭС к географическим координатам местности;
- расчет значений геоиндуцированных токов в нейтральных и заземленных обмотках силовых трансформаторов, в фазах ЛЭП;
- расчет мгновенных и действующих значений токов намагничивания силовых трансформаторов ЭЭС;
- разложение источников тока высших гармонических для моделирования ветвей намагничивания силовых трансформаторов на постоянную и синусоидальные составляющие, т.е. в ряды Эйлера-Фурье;
- расчет мгновенных и действующих значений токов и напряжений для каждой гармоники в элементах ЭЭС;
- расчет действующих значений активной, реактивной, полной мощностей с учетом вклада гармонических составляющих тока и напряжения в элементах ЭЭС.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ САМАРСКОГО РЕГИОНА ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЯХ

Для оценки влияния ГИТ на электроэнергетическую систему разработана модель ЭЭС Самарского региона.

Характерные черты ЭЭС Самарского региона присущи для любой мощной ЭЭС: наличие крупных источников питания – тепловые электростанции «ТЭЦ Вазы» и «Тольяттинская ТЭЦ» и гидроэлектростанция «Жигулевская ГЭС» с суммарной генерирующей мощностью 4449 МВт; наличие межсистемных и внутрисистемных линий связи напряжением 110, 220 и 500 кВ общей протяженностью более 1000 км; наличие крупных узловых трансформаторных подстанций (ТП) с классами напряжений 500/220/110, 220/110/10 кВ. В модели ЭЭС учтены подстанции для электроснабжения промышленной и городской нагрузки с классами напряжений 220/10, 110/10, 110/6,3 кВ. Общая установленная мощность силовых трансформаторов и автотрансформаторов на электростанциях и трансформаторных подстанциях в модели ЭЭС составляет 10883 МВА. Структурная схема модели ЭЭС Самарского региона приведена на рис. 3.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы ЭЭС выполнены с заземленными нейтральными, в ЭЭС присутствует большое количество длинных ЛЭП всех классов напряжений, ориентированных в основном в направлении запад–восток. Поэтому при интенсивной геомагнитной буре и при совпадении направления распространения геоэлектрического поля с направлением расположения объектов ЭЭС на географической карте местности возможны значительные по величине геоиндуцированные токи в нейтральных и заземленных обмотках СТ и фазных проводах ЛЭП.

В расчетной модели:

- форма импульса напряженности геоэлектрического поля при геомагнитной буре соответствует форме импульса в работе [27], максимальные значения напряженностей приняты равными 6, 10, 15, 20 В/км;
- направление вектора напряженности геоэлектрического поля выбрано запад–восток;
- воздействие импульса напряженности геоэлектрического поля на ЭЭС начинается с начала расчета модели. До 370 с и после 1740 с величина индуцированной геоэлектрическим полем ЭДС между заземлителями подстанций ЭЭС не превышает 14 В. Поэтому расчет режимов работы ЭЭС при геомагнитных бурях выполнен с 370 с по 1740 с.

На рис. 4–6 приведены результаты компьютерного моделирования при различных интенсивностях геоэлектрического поля – геоиндуцированные токи, осциллограммы токов намагничивания и полный ток в заземленной обмотке высокого напряжения (ВН) силового трансформатора 110/6,3/6,3 подстанции «Елховка». Форма кривой геоиндуцированного тока в обмотке ВН силового трансформатора подстанции повторяет форму кривой импульса геоэлектрического поля, максимальная величина ГИТ определяется максимальным значением напряженности геоэлектрического поля E и составляет от 15,4 А для $E=6$ В/км до 82,6 А для $E=20$ В/км (рис. 4). Амплитудные значения тока намагничивания многократно превышают значение тока холостого хода силового трансформатора: при $E=6$ В/км амплитудные значения тока намагничивания достигают значений 151 А, при $E=20$ В/км – 645 А. Кривая тока намагничивания сильно искажена, наблюдается эффект однополупериодной несимметрии (рис. 5). Кривые полного тока обмотки ВН силового трансформатора

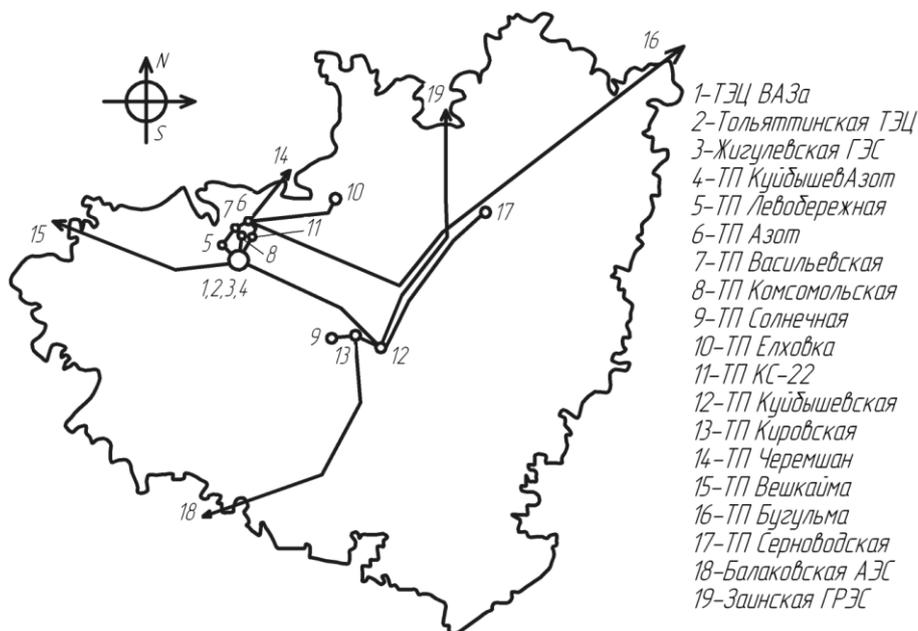


Рис. 3. Структурная схема модели ЭЭС Самарского региона

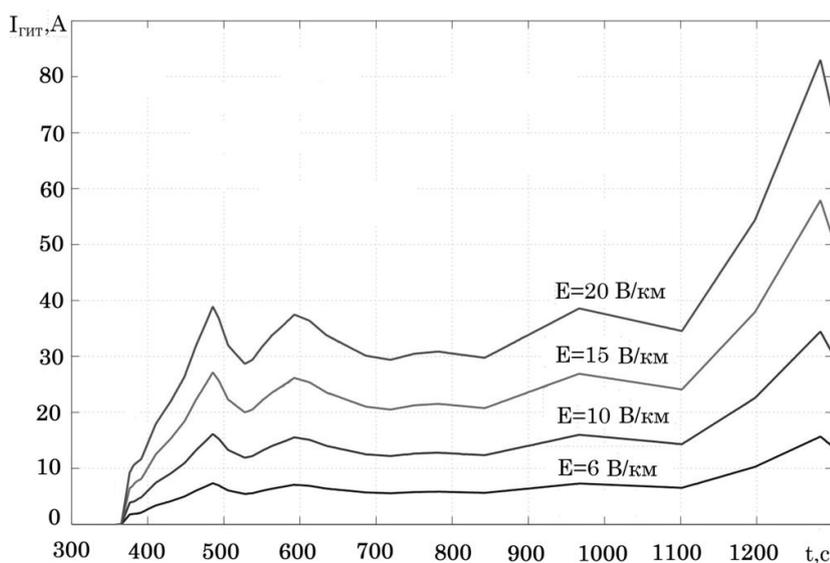


Рис. 4. Геоиндуцированные токи в фазе обмотки ВН силового трансформатора 110/6,3/6,3

также сильно искажены, присутствуют значительные по величине 2-я, 4-я и постоянная гармоники тока (рис. 6).

Линейчатые спектры гармонических составляющих тока обмотки ВН силового трансформатора 110/6,3/6,3 подстанции «Елховка» при различных интенсивностях геоэлектрического поля приведены на рис. 7.

Следует отметить, что характер гармоник тока в обмотке ВН силового трансформатора независимо от интенсивности геоэлектрического поля является стабильным. Постоянная составляющая тока составляет 7,5–21,5 % от основной ($E=6-20$ В/км). Полный коэффициент гармоник тока в обмотке ВН силового трансформатора составляет $K_{I(n)}=18,64-37,3$ % ($E=6-20$ В/км). Полный коэффициент гармоник тока $K_{I(n)}$ с учетом

гармоник тока до 40-го порядка в точке передачи электрической энергии вычислен по формуле:

$$K_{I(n)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100,$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение тока основной (первой) гармоники.

Полученные результаты компьютерного моделирования находятся в хорошем качественном согласии со статистическими данными по воздействию ГИТ на электроэнергетические системы [4, 28–30].

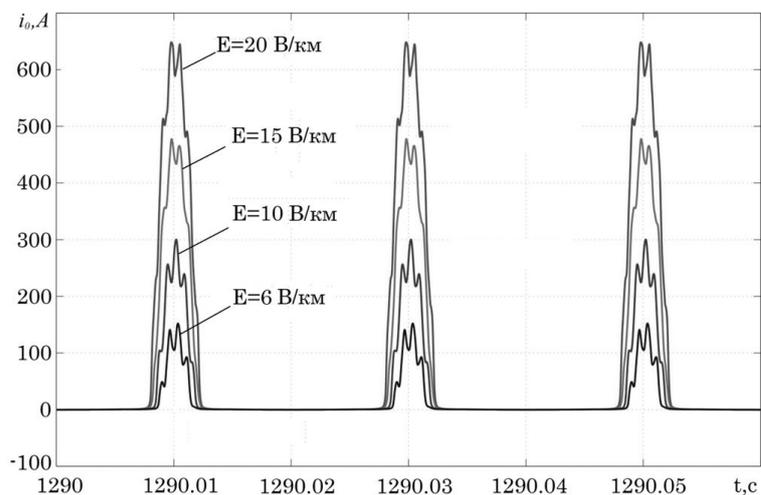


Рис. 5. Осциллограммы тока намагничивания силового трансформатора 110/6,3/6,3

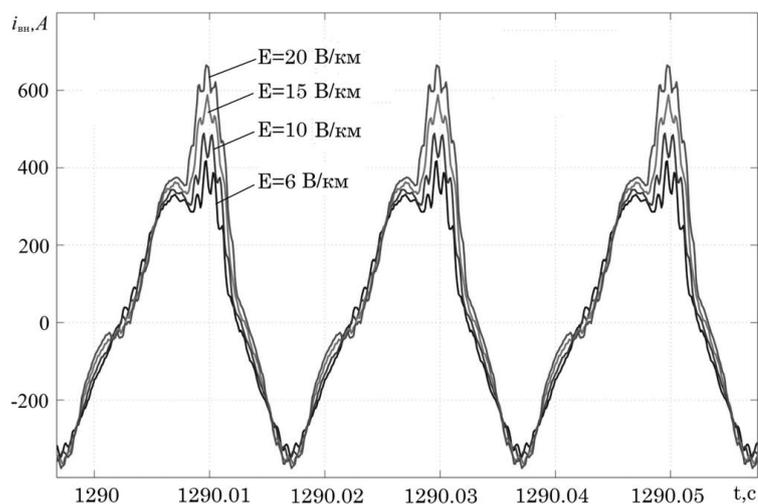


Рис. 6. Осциллограммы полного тока в обмотке ВН силового трансформатора 110/6,3/6,3

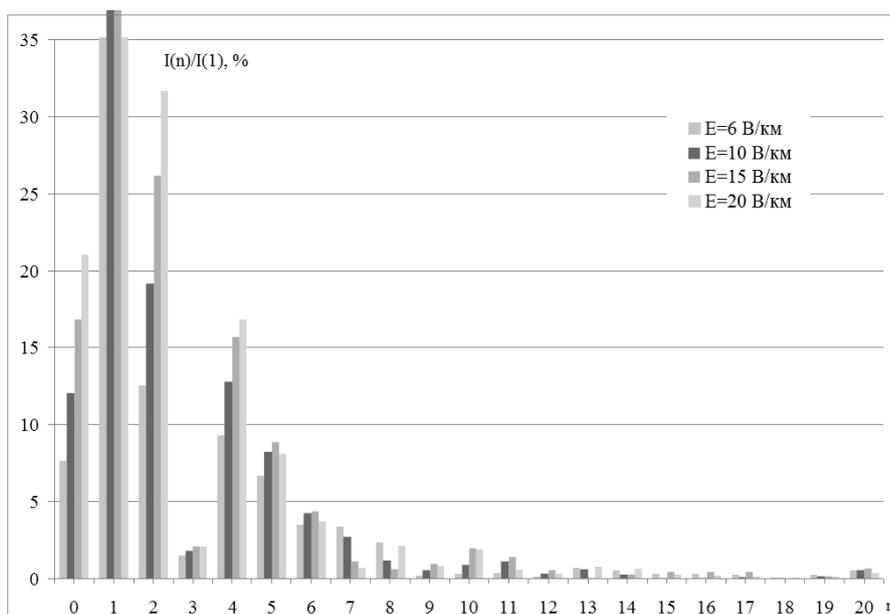


Рис. 7. Линейчатые спектры гармонических составляющих тока обмотки ВН силового трансформатора 110/6,3/6,3

ВЫВОДЫ

Разработанные методы расчета позволяют определять геоиндуцированные токи в элементах ЭЭС с учетом их географического расположения на карте местности. Компьютерная реализация разработанных методов в пакете расширения Simulink системы MATLAB с применением блоков, разработанных авторами, позволяет моделировать процессы насыщения силовых трансформаторов при геомагнитных бурях и определять мгновенные и действующие значения токов намагничивания силовых трансформаторов; действующие значения геоиндуцированных токов в нейтральных и заземленных обмотках СТ и фазных проводах ЛЭП, мгновенные значения полных токов и напряжений во всех элементах ЭЭС, а также выполнять их гармонический анализ для оценки влияния геоиндуцированных токов на режимы работы ЭЭС, что позволит определить допустимые значения ГИТ для снижения их негативного воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. Critical National Infrastructures, 2008. URL: http://www.empcommission.org/docs/A2473-EMP_Commission-7MB.pdf (дата обращения: 29.01.2014)
- Boteler, D.H. Assessment of geomagnetic hazard to power systems in Canada / D.H. Boteler // *Natural Hazards* 23. – 2001. – Volume 23, Issue 2–3 – p. 101–120.
- Watermann, J. The magnetic environment – GIC and other ground effect / J. Watermann // *Space weather*. – 2007. – Volume 344. – p. 269 – 275.
- Kappenman, J. Geomagnetic Storms and Their Impact on the U.S. Power Grid., 2010. URL: http://web.ornl.gov/sci/ees/etsd/pes/pubs/ferc_Meta-R-319.pdf (дата обращения: 29.01.2014)
- Kappenman, J. A Perfect Storm of Planetary Proportions / J. Kappenman // *IEEE Spectrum*. – 2012. – Volume 49, Issue 2. – p. 26 – 31.
- Pulkkinen, A. Geomagnetic Induction During Highly Disturbed Space Weather Conditions: Studies of Ground Effects. Academic Dissertation. University of Helsinki, Faculty of Science, Department of Physical Sciences., 2003 // <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/fysik/vk/pulkkinen/geomagne.pdf> (дата обращения: 29.01.2014)
- Pirjola, R. Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems. *Surveys in geophysics*. – 2002. – Volume 23, Issue 1, pp. 71–90. URL: <http://www.ingentaconnect.com/content/klu/geop/2002/00000023/00000001/00394486> (дата обращения: 29.01.2014)
- Girgis, R. Effects of GIC on power transformers and power systems / R. Girgis, K. Vedante, K. Gramm // *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*. – 2012. – p. 1–8.
- Barnes, P.R. Electromagnetic pulse research on electric power systems: Program Summary and recommendations. 1993 / P.R. Barnes, B.W. McConnell, J.W. Van Dyke // <http://www.survivalring.org/classics/ElectromagneticPulseResearchOnElectricPowerSystems-ProgramSummaryAndRecommendations-ORNL6708.pdf> (дата обращения: 29.01.2014)
- Walling, R.A. Characteristics of transformer exciting – current during geomagnetic disturbances / R.A. Walling, A.N. Kahn // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1991. – Volume 6, Issue 4. – p. 1707–1714.
- Pirjola, R. Geomagnetically induced currents in the Finnish 400 kV power transmission system / R. Pirjola // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1989. – Volume 53, Issue 3–4. – p. 214–220.
- Абдурахманов, А.Я. Влияние геомагнитных индуцированных токов на работу силовых и измерительных трансформаторов / А.Я. Абдурахманов, Р.С. Ишан-Ходжаев, З.М. Мухаметшина // *Вопросы регулирования напряжения в электропередачах сверхвысокого напряжения*. – М., 1988. – С. 63–70.
- Гершенгорн, А.И. Воздействия геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем / А.И. Гершенгорн // *Электрические станции*. – 1993. – № 6. – С. 54–63.
- Kappenman, J.G. Space weather and vulnerability of electric power grids / J.G. Kappenman // *Effect of space weather on technology infrastructure*, 2004. – p. 257–286.
- Lonngren, K.E. Fundamentals of Electromagnetics with MATLAB / K.E. Lonngren, S.V. Savov. – Scitech. – 2005. – p. 574.
- Дьяконов, В.П. MATLAB и Simulink в электроэнергетике: справочник / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2009. – 816 с.
- SimPowerSystems™ User's Guide (Second Generation). – 2013 // URL: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/physmod/powersys/powersys.pdf (дата обращения: 29.01.2014)
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611506. Модель системы электроснабжения города / В.В. Вахнина, В.Д. Селемир, В.И. Карелин, В.А. Шаповалов, В.В. Горохов. – Заявка № 2008610550; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.03.2008.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611832. Модель линии электропередач / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, М.С. Макеев, В.А. Кузнецов. – Заявка № 2012661752; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.02.2013.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611833. Модель ветви намагничивания силового трансформатора / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, М.С. Макеев, Д.А. Кретов. – Заявка № 2012661751; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.02.2013.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615269. Модель силового трансформатора с учетом нелинейности ветви намагничивания / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, Д.А. Кретов, В.А. Кузнецов – Заявка № 2013613712; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30.04.2013.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660528. Модель

- двигательной нагрузки системы электроснабжения / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, М.С. Макеев. – Заявка № 2012616731; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.11.2012.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611831. Модель высоковольтного выключателя / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, М.С. Макеев, В.А. Шаповалов. – Заявка № 2012661759; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.02.2013.
24. Вахнина, В.В. Расчет геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач систем электроснабжения при геомагнитных бурях / В.В. Вахнина, Д.А. Кретов, В.А. Кузнецов // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. – 2012. – Т.14. – № 6. – С. 244–246.
25. Вахнина, В.В. Снижение рисков развития аварий в системах электроснабжения при геомагнитных бурях / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.А. Кузнецов // Гелиофизические исследования. – 2013. – Выпуск 5. – С. 115–123. – URL: <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=191.pdf> (дата обращения: 29.01.2014).
26. Chan, J.H. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation / J.H. Chan, A. Vladimirescu, X.-C. Gao, P. Liebmann, J. Valainis // IEER Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1991. – Volume:10, Issue: 4. – № 4. – p. 476–482.
27. Barnes, P.R. Mitigation of magnetohydrodynamic electromagnetic pulse (MHD-EMP) effects from commercial electric power systems. 1992 / P.R. Barnes, F.M. Tesche, E.F. Vance // URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a249577.pdf> (дата обращения: 29.01.2014).
28. Elovaara, J. Finnish experience with grid effect of gic's / J. Elovaara // Space Weather. Astrophysics and Space Science Library. – 2007. – Volume 344 – p. 311 – 326.
29. Pulkkinen, A. Large geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system / A. Pulkkinen, A. Viljanen, R. Pirjola // Finnish Meteorological Institute, Helsinki. – 2000. – p. 99.
30. McKay, A.J. Geoelectric Fields and Geomagnetically Induced Currents in the United Kingdom // University of Edinburgh. – 2003. – p. 260.

DEVELOPMENT OF THE CALCULATION MODEL OF FUNCTIONING OF POWER ELECTRIC GRID DURING THE GEOMAGNETIC STORM

© 2014

V.V. Vahnina, candidate of technical sciences, professor,

head of the chair «Department of electricity supply and Electrotechnology»

A.A. Kuvshinov, doctor of the technical sciences, professor «Department of electricity supply and Electrotechnology»

V.A. Shapovalov, candidate of technical sciences, docent,

deputy rector, director of the Institute of Energy and Electrical Engineering

A.N. Chernenko, candidate of technical sciences, docent of the «Department of electricity supply and Electrotechnology»

D.A. Kretov, candidate of technical sciences, docent of the «Department of electricity supply and Electrotechnology»

V.A. Kuznetsov, senior lecturer of the «Department of electricity supply and Electrotechnology»

T.A. Rybalko, assistant of the «Department of electricity supply and Electrotechnology»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: electric power grid; EPG; model; modeling; geomagnetic storm; GMS; geomagnetically induced current; GIC.

Annotation: The model and algorithm for calculation of functioning of an electric power grid of any configuration and complexity during geomagnetic storms of various intensity and duration was developed. The calculations were performed in MATLAB mathematical system and in Simulink package. Both standard blocks of Simulink and SimPowerSystems and blocks designed by the authors were used to develop the electric power grid model. Special features of the developed calculated model of the electric power grid are binding of objects to geographical coordinates of a territory; modeling the power transformers are designed on the basis of T-shaped equivalent circuit with a nonlinear mutual inductance magnetization branch which is a function of the value of geomagnetically induced current; by introduction of the source of harmonic components of magnetizing currents; calculation of RMS values of active, reactive and total power in all elements is done with regard to the impact of harmonic components of current and voltage. The results of modeling of the impact of a geomagnetic storm of various intensity with the west-east direction of the geoelectric field voltage vector for Samara region electric power grid.