

## РАСЧЕТ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЯХ

Вахнина В. В., Кузнецов В. А., Кретов Д. А., Козуб А. А.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет», Тольятти, Россия (445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14), e-mail: V.A.Kuznetsov@yandex.ru.*

В статье представлена разработанная методика расчета геоиндуцированных токов при геомагнитных бурях в высоковольтных линиях электропередач систем электроснабжения. Протекание геоиндуцированных токов в линиях электропередач может привести к насыщению магнитной системы силовых трансформаторов, срабатыванию систем релейной защиты и автоматики и отключению линий электропередач. Для расчета величин геоиндуцированного тока был использован прямолинейный участок линии электропередачи между двумя трансформаторными подстанциями. Проведена оценка полученных величин геоиндуцированных токов в линиях электропередач класса напряжений 110–330 кВ при разных уровнях напряженности геоэлектрического поля, с помощью которой установлено, что значения геоиндуцированных токов в системах электроснабжения могут быть сопоставимы с рабочими токами линий электропередач. Разработанная методика может быть применена на практике для оценки величин геоиндуцированных токов в линиях электропередач и влияния их на работу систем электроснабжения.

Ключевые слова: геоиндуцированные токи; геомагнитные бури; высоковольтная линия электропередач.

## CALCULATION OF GEO INDUCED CURRENTS IN HIGH-VOLTAGE POWER LINES OF ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS AT GEOMAGNETIC STORMS

Vakhnina V. V., Kuznetsov V. A., Kretov D. A., Kozub A. A.

*Togliatti State University*

The article presents a method of calculating geindutsirovannyh currents at high geomagnetic storms in the power lines power supply systems. The flow geindutsirovannyh currents in power lines can lead to saturation of the magnetic system of power transformers, tripping of relay protection and automatic shutdown and power lines. To calculate geindutsirovannogo current was used straight section transmission line between two transformer substations. The estimation of the values obtained geindutsirovannyh currents in power lines voltage class 110-330 kV at different levels of intensity of the geoelectric field, through which established that the value geindutsirovannyh currents in power systems can be compared with operating currents of power lines. The method developed can be applied in practice to estimate the values geindutsirovannyh currents in power lines and their effect on the operation of power supply systems.

Key words: geo induced currents, geomagnetic storms, high-voltage power lines.

Геомагнитные бури (ГМБ) возбуждают вариации геомагнитного поля Земли, что индуцирует поверхностные потенциалы Земли – геоэлектрические поля с амплитудой  $E = 6-10$  В/км, а в отдельных случаях до 15 В/км, частотой  $f=0,1 - 0,001$  Гц, которые в протяженных заземленных системах создают геоиндуцированные токи (ГИТ). Поскольку ГИТ не трансформируются силовыми трансформаторами (СТ), их называют квазипостоянными токами.

При выполнении системы электроснабжения (СЭС) с эффективно или глухозаземленными нейтралями силовых трансформаторов, и если при этом точек заземления не менее двух, то в этих случаях в длинных линиях электропередач (ЛЭП)

протекают ГИТ до нескольких десятков и даже сотен ампер на фазу, влияя на работу систем электроснабжения [2].

Примером воздействия ГИТ на систему электроснабжения является системная авария во время геомагнитной бури 13 марта 1989 года. Во время этой ГМБ в электроэнергетической системе восточного побережья США вышли из строя автотрансформатор 500/138 кВ мощностью 350 МВА и группы однофазных повышающих трансформаторов 18/500 кВ. В автотрансформаторе наблюдались: перегрев, вызвавший изменение окраски бака в нескольких местах, увеличение содержания гармоник в токе обмотки низкого напряжения с 2 до 9 % и усиление шума, создаваемого автотрансформатором, на 10–15 дБ [3,4].

Следует отметить, что современные СЭС более восприимчивы к геомагнитным бурям, чем их локальные предшественники из-за больших географических площадей, которые они занимают, а также из-за их взаимосвязанности и насыщенности электронным оборудованием. В связи с этим актуальным является разработка методики расчета ГИТ для оценки уязвимости современных систем электроснабжения при геомагнитных бурях.

Оценим амплитуды ГИТ в высоковольтных линиях электропередач систем электроснабжения при геомагнитных бурях. На рис.1 представлен прямолинейный участок линии электропередач ЛЭП длиной  $l$  между двумя трансформаторными подстанциями. Трансформаторы Т1 и Т2 подстанций имеют заземления в точках А и В. Возникающая между этими точками ЭДС  $E=E_x \cdot l$ , обусловленная напряженностью геоэлектрического поля, генерирует геоиндуцированные токи.

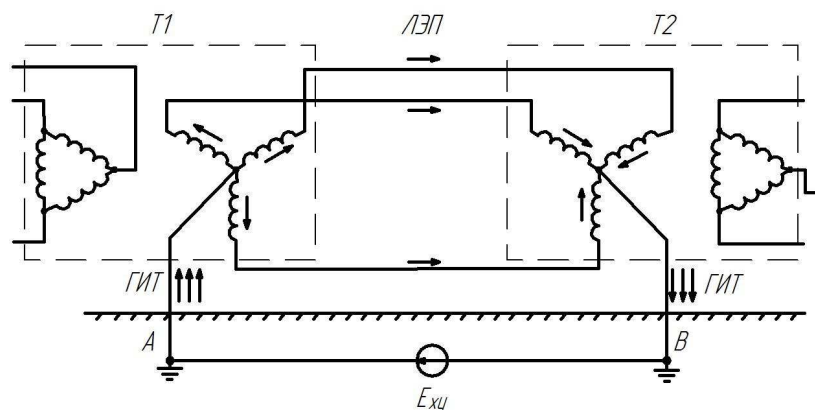


Рис. 1. Протекание ГИТ по обмоткам высокого напряжения трансформаторов и высоковольтной линии электропередач СЭС

Геоэлектрическое поле рассчитывается исходя из наблюдаемых вариаций изменений геомагнитного поля и геофизических данных о глубинной электропроводности данного региона (модели проводимости). Для расчета используется стандартная методика перехода от временных рядов к Фурье – образам (частотно-фазовым характеристикам) [5]:

$$E_x(\omega) = \frac{z(\omega) \cdot B_y(\omega)}{\mu_0}, E_y(\omega) = -\frac{z(\omega) \cdot B_x(\omega)}{\mu_0} \quad (1)$$

где  $B_x(\omega); B_y(\omega)$  – напряженность геомагнитного поля при направлении силовых линий поля вдоль осей  $x$  или  $y$ ;  $z(\omega)$  – импеданс цепи протекания ГИТ;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\omega$  – угловая частота.

Электромагнитные и геометрические параметры проводников высоковольтных линий электропередач могут сильно различаться, что оказывает влияние на частотные характеристики результирующих электрических полей и ГИТ. Поэтому расчет ГИТ по геоэлектрическому полю зависит от конкретной конфигурации СЭС.

Для периодов более 1 – 10 с (т. е. частоты ниже 1 – 0,1 Гц) амплитуда и фаза электрического поля в проводниках совпадает с характеристиками невозмущенного электрического поля, что позволяет применять законы линейных электрических цепей с активным сопротивлением, где источником является рассчитанное геоэлектрическое поле в данный момент времени, и использовать модели с дискретным заземлением [3].

Эквивалентная схема замещения представлена на рис. 2, а. Здесь  $R_{T1A}, R_{T1B}, R_{T1C}$  – сопротивления постоянному току (активные сопротивления) обмоток высокого напряжения трехфазного повышающего трансформатора Т1;  $R_{ЛA}, R_{ЛB}, R_{ЛC}$  – сопротивления постоянному току (активные сопротивления) фаз воздушной ЛЭП;  $R_{T2A}, R_{T2B}, R_{T2C}$  – сопротивления постоянному току (активные сопротивления) обмоток высокого напряжения трехфазного понижающего трансформатора Т2;  $R_{3У}$  – сопротивления заземляющих устройств;  $R_3$  – активное сопротивление грунта.

Активные сопротивления фаз воздушной ЛЭП определяются как:

$$\begin{aligned} R_{ЛA} &= R_{0A} \cdot l; \\ R_{ЛB} &= R_{0B} \cdot l; \\ R_{ЛC} &= R_{0C} \cdot l, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R_{0A}, R_{0B}, R_{0C}$  – активные погонные сопротивления фаз ЛЭП.

Активное сопротивление грунта:

$$R_3 = R_{30} \cdot l, \quad (3)$$

где  $R_{30}$  – активное погонное (удельное) сопротивление грунта.

Полную схему замещения (рис.2,а) необходимо использовать для расчета постоянных составляющих токов фазных обмоток трансформаторов Т1, Т2 и фаз ЛЭП в условиях заметной несимметрии (более 10–15 %) активных сопротивлений обмоток ВН и фазных проводов линии электропередачи. Однако специальные конструктивные мероприятия, такие как транспозиция проводов, обеспечивают фазную симметрию активных сопротивлений. В этих условиях полная схема замещения существенно упрощается к виду, изображенному на рис. 2,б, где:

$$\begin{aligned}
 R_A &= R_{T1A} + R_{ЛA} + R_{T2A}; \\
 R_B &= R_{T1B} + R_{ЛB} + R_{T2B}; \\
 R_C &= R_{T1C} + R_{ЛC} + R_{T2C}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

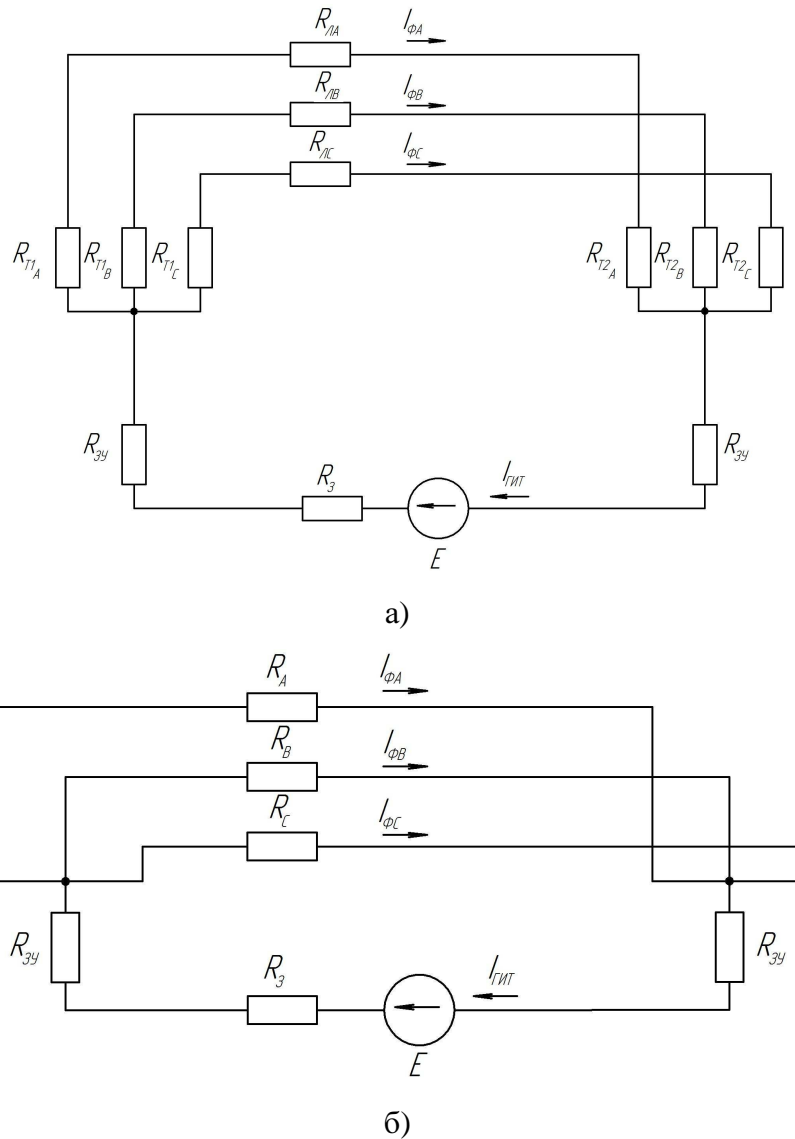


Рис. 2. Схема замещения участка СЭС при протекании ГИТ (а – полная схема замещения; б – упрощенная схема замещения)

Суммарное сопротивление для контура протекания геоиндуцированных токов:

$$R_{\Sigma} = \frac{R_A + R_B + R_C}{3} + 2R_{3y} + R_3.
 \tag{5}$$

Используя эквивалентную схему, значение ГИТ в нейтрали силового трансформатора можно определить как:

$$I_{\text{ГИТ}} = \frac{E_x \cdot I}{R_{\Sigma}}.
 \tag{6}$$

Если ЛЭП состоит из нескольких участков, то

$$I_{\text{ГИТ}} = \frac{\int \vec{E}_{(x,y)}(l) dl}{R_{\Sigma}}, \quad (7)$$

где  $\vec{E}_{(x,y)}(l)$  – напряженность геоэлектрического поля, наведенная в грунте на участке  $dl$ ,  
 $R_{\Sigma}$  – суммарное сопротивление контура протекания геоиндуцированных токов.

Учитывая, что ЛЭП состоит из прямолинейных участков, формулу (7) можно записать в виде:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cos \alpha_i l_i}{R_{\Sigma}}, \quad (8)$$

где  $E_i$  – значение напряженности геоэлектрического поля на  $i$ -ом прямолинейном участке ЛЭП;  $\alpha_i$  – угол ориентации  $i$ -ого участка ЛЭП относительно направления силовой линии геоэлектрического поля;  $l_i$  – длина  $i$ -ого прямолинейного участка ЛЭП;  $n$  – количество прямолинейных участков ЛЭП.

Таким образом, величина геоиндуцированных токов, наведенных в высоковольтных линиях электропередач при геомагнитных бурях, определяется следующими основными параметрами:

1. Скоростью изменения геомагнитного поля при геомагнитной буре и размерами области распространения геомагнитного поля;
2. Сопротивлением грунта, сопротивлением заземления;
3. Длиной и связанностью линий электропередач;
4. Географическим расположением точек, в которых СЭС контактирует с земной поверхностью.

В табл. 1 приведены расчетные значения геоиндуцированных токов в фазах ЛЭП для различных классов напряжений при геомагнитной буре с напряженностью геоэлектрического поля:  $E=1$  В/км;  $3$  В/км;  $15$  В/км. В расчетах принято  $R_{3Y} = 0,5$  Ом,  $R_{30} = 0,048$  Ом/км [1].

Таблица 1. Характеристики высоковольтных ЛЭП и геоиндуцированные токи при напряженностях геоэлектрического поля  $E=3$  В/км;  $E=6$  В/км;  $E=10$  В/км;  $E=15$  В/км (передаваемая мощность 125000 кВА)

Классы ЛЭП, кВ	Марка провода	Длина ЛЭП, км	Рабочий ток в фазе (А)	ГИТ в фазе $I_{\phi}$ (А) при			
				$E=3$ В/км	$E=6$ В/км	$E=10$ В/км	$E=15$ В/км
110	АС-185	25-80	627,6	15,5- 17,4	30,9- 34,7	51,7- 57,9	77,5- 86,8
220	АС-400	100-400	313,8	30,6- 37,2	61,3- 74,3	102,2- 123,9	153,2- 185,8

330	АС-240	130-700	209,2	33,7- 46,5	67,5- 92,9	112,4- 154,9	168,6- 232,3
-----	--------	---------	-------	---------------	---------------	-----------------	-----------------

Как видно из табл. 1, с увеличением класса напряжения линии электропередачи, напряженности геоэлектрического поля геомагнитных бурь значения геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач растут. Данное обстоятельство связано с увеличением длин и уменьшением погонного сопротивления высоковольтных ЛЭП. Расчетные значения ГИТ при сильных геомагнитных бурях в линиях электропередач могут быть сопоставимы с их рабочими токами в фазе и, очевидно, привести к насыщению магнитной системы силовых трансформаторов, срабатыванию систем релейной защиты и автоматики и отключению линий электропередач.

### **Выводы**

Разработанный метод позволяет рассчитывать величины геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач в зависимости от конфигурации и параметров схемы замещения системы электроснабжения, а также углов ориентации участков ЛЭП относительно направления силовых линий геоэлектрического поля. Оценка величин ГИТ в линиях электропередач разного класса напряжений позволит исследовать устойчивость систем электроснабжения при геомагнитных бурях различной интенсивности.

### **Список литературы**

1. Карякин Р. Н. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергосервис, 2006. – 520 с.
2. Beamish D., Clark T. D. G., Clarke E., Thomson A. W. Geomagnetically induced currents in the UK: geomagnetic variations and surface electric field // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2002. – № 64. – pp. 1779–1792.
3. Kappenman, J. G. Geomagnetic storms and Their Impact on Power Systems // IEEE Power Engineering Review. – May 1996. – pp. 5-8.
4. Pirjola R. Effect of series capacitors, neutral point reactor, autotransformers and overhead shield wires on geomagnetically induced currents (GIC) in electric power transmission systems // Annales geophysicae. – 1985. – pp.479 – 484.
5. 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. – № 23. – pp. 71 – 90.

### **Рецензенты:**

Кувшинов Алексей Алексеевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти.

Шакурский Виктор Константинович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение

и электротехника», ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти.