УДК 550.377:621.31

# ВЛИЯНИЕ ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ГАРМОНИК В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

© 2021 г. В. Н. Селиванов<sup>1,</sup> \*, Я. А. Сахаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра

"Кольский научный центр Российской академии наук", Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия \*E-mail: v.selivanov@ksc.ru Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

Представлены экспериментальные данные по воздействию геоиндуктированного тока на силовой трансформатор. Получено аналитическое решение для гармоник тока через нелинейную индуктивность при подмагничивании ее постоянным током. Показано, что немонотонная зависимость амплитуды гармоник от величины постоянного тока определяется нелинейностью вебер-амперной характеристики катушки индуктивности.

DOI: 10.31857/S0367676521030248

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Внешние электромагнитные воздействия на проводные коммуникации в высоких широтах создаются, в первую очередь, геомагнитными бурями и разрядами молний. Эти явления представляют значительную опасность для высоковольтной сети и способны вызывать повреждение электрооборудования, а также нарушение работы систем защиты и автоматики. В настоящее время в России нет единой системы мониторинга электромагнитных воздействий природного происхождения на высоковольтные электрические сети. Единственная в стране система регистрации геоиндуктированных токов в магистральных электрических сетях создана в 2011 г. на Северо-Западе России силами Полярного геофизического института и Кольского научного центра РАН [1, 2].

В результате возмущения магнитного поля в удаленных точках на поверхности Земли наводятся разности потенциалов. Геоиндуктированный ток (ГИТ) возникает, когда две эти удаленные точки соединяются проводником. В случае электрической сети роль проводника играет многопроводная линия электропередачи, которая соединена с землей через выводы обмоток трансформаторов с глухозаземленными нейтралями. При характерной частоте от 0.001 до 0.1 Гц амплитуда ГИТ может достигать 300 ампер.

По отношению к характерным временам процессов в электрической сети ГИТ можно считать постоянным током. Исследованию влияния величины постоянного тока подмагничивания на гармонический состав тока в обмотках трансформаторов посвящен ряд публикаций [3–6], в которых указывалось на немонотонный характер зависимостей, однако причины этого явления не были однозначно определены.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Система мониторинга воздействия ГИТ позволяет проводить регистрацию квазипостоянных токов в нейтралях трансформаторов и содержания гармоник в сети [1]. Записываются следующие составляющие полного тока в нейтрали, полученные разложением в ряд Фурье с интегрированием на временном интервале 0.1 с:

 постоянная составляющая, несущая информацию непосредственно о ГИТ. Также содержит сигнал смещения нуля датчика тока, обусловленный остаточной индукцией в магнитопроводе и температурным дрейфом;

– амплитудные значения токов первой, второй и третьей гармоники, 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 искажением формы тока из-за подмагничивания магнитопровода. Кроме того, регистрируются мгновенные значения токов, протекающих в нейтралях при возникновении переходных процессов. Блок записи мгновенных значений срабатывает по условию превышения некоторого порогового значения производной от тока нейтрали в данный момент времени и регистрирует сигнал длительностью 20 мс (один период тока промышленной частоты 50 Гц). Этой длительности достаточно для гармонического анализа формы кривой тока в нейтрали.

В идеально симметричной трехфазной схеме в токе нейтрали должны отсутствовать гармоники прямой (гармоники с номерами n = 3k - 2, где k изменяется от 1 до бесконечности) и обратной последовательностей (n = 3k - 1), так как в разных фазах между этими гармониками взаимная разность фаз составляет 120 градусов, поэтому сумма таких токов равна нулю. Гармоники нулевой последовательности (n = 3k) синфазны, поэтому ток нейтрали равен утроенному значению фазных токов.

Кроме того, если вольтамперные характеристики всех элементов схемы являются симметричными, то в токе нейтрали должны отсутствовать также четные гармоники нулевой последовательности (n = 6k). Появление таких гармоник в токе нейтрали означает, что ВАХ трансформатора сместилась в результате намагничивания магнитопровода квазипостоянным током ГИТ.

Реальные трехфазные электрические сети не являются симметричными. Бывают несимметрии фазных напряжений и нагрузок (токов), а также несимметрии магнитных потоков в магнитопроводах трансформаторов. Именно поэтому в нейтрали всегда присутствует ток первой гармоники, значение которого меняется в зависимости от режима работы автотрансформатора и его нагрузки.

С 2011 г. система мониторинга зарегистрировала более 100 запусков блока записи мгновенных значений, обусловленных воздействием ГИТ, причем все события произошли на одной подстанции в Карелии.

По результатам обработки порядка 40 кривых тока в нейтрали были построены зависимости токов гармоник от ГИТ, показанные на рис. 1. Использовались только регистрации при ГИТ от 20 до 60 А. При меньших токах значительную погрешность вносят сигналы смещения первичного датчика (температурный дрейф, остаточное намагничивание магнитопровода первичного преобразователя тока). Эту погрешность практически невозможно устранить, так как она лежит в том же частотном диапазоне, что и ГИТ. Сверху предел измерения был ограничен диапазоном измерения датчика тока (62.5 A).

В ходе анализа полученных данных выявлено неоднозначное изменение содержания высших гармоник: с ростом величины ГИТ возможно как увеличение, так и уменьшение их амплитуды. Та-

кое поведение гармоник нуждается в исследовании процесса насыщения магнитопроводов при подмагничивании постоянным током. Насышение магнитопроводов приводит к нарушениям симметрии передачи энергии по фазам, появлению высших гармоник, ошибочной работе систем измерения и автоматики, перегреву стали сердечников, росту вибраций конструкционных элементов. Кроме того, геомагнитное воздействие носит кумулятивный эффект, снижая срок службы силовых трансформатора из-за ускоренного старения их изоляции. В итоге, при наиболее сильных геомагнитных возмущениях возможно возникновение серьезных аварий в электрических сетях, подобных тем, что произошли в конце прошлого века в пик геомагнитной активности в северных районах США и Канады, а также в Скандинавии [7-9].

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Исследуем процесс подмагничивания постоянным током нелинейной индуктивности на простейшей модели, эквивалентная схема которой содержит последовательно включенные катушку с нелинейной вебер-амперной характеристикой и два источника напряжения. Характеристика нелинейной индуктивности предельно упрощена: до достижения магнитным потоком значения насыщения  $\Psi_s$  ток в катушке отсутствует (индуктивность бесконечна), а когда поток превышает значение насыщения, то величина тока задается значением индуктивности насыщения L<sub>s</sub>. Принятые величины параметров насыщения близки к характеристикам силовых трансформаторов класса напряжения 330 кВ и равны  $\Psi_s = 900$  Вб и  $L_{S} = 1$  Гн соответственно. Следуя заданным параметрам катушки индуктивности, выражение для источника переменного напряжения имеет вид  $u(t) = U_m \cos(\omega t)$ , где  $U_m = 330/\sqrt{1.5}$  кВ – амплитуда и  $\omega = 314 c^{-1} - круговая частота напряжения$ промышленной сети класса 330 кВ. Постоянное подмагничивание задается постоянной эдс U<sub>0</sub>. При заданных параметрах в отсутствии постоянного подмагничивания магнитный поток в катушке не превышает уровня насыщения.

Моделирование выполняется в однофазной постановке, что не является корректным при изучении процессов в трехфазной сети с нелинейными элементами. Однако, как показали расчеты, для исследования характера зависимости гармоник нулевой последовательности (т.е. гармоник, номер которых кратен трем) от величины тока подмагничивания такое упрощение допустимо, а величины указанных гармоник в однофазной сети составляют треть от соответствующих величин в нейтрали трехфазной сети с высокой степенью точности.



Рис. 1. Зависимости амплитуд токов гармоник в нейтрали автотрансформатора от величины ГИТ.

Модель описывается дифференциальным уравнением первого порядка  $\frac{d\Psi}{dt} = u(t) + U_0$  с начальным условием  $\Psi(0) = 0$ , решение которого имеет простой вид  $\Psi(t) = \frac{U_m}{\omega} \sin(\omega t) + U_0 t$ . Для принятой кусочно-линейной аппроксимации зависимости  $i(\Psi)$  решение для тока через индуктивность будет являться составной функцией вида

$$i(t) = \begin{cases} 0, \ \text{если} \ |\Psi(t)| \le \Psi_s; \\ \frac{U_m}{\omega L_s} \sin(\omega t) + \frac{U_0}{L_s} t - \frac{\Psi_s}{L_s}, \ \text{если} \ \Psi(t) > \Psi_s; \\ \frac{U_m}{\omega L_s} \sin(\omega t) + \frac{U_0}{L_s} t + \frac{\Psi_s}{L_s}, \ \text{если} \ \Psi(t) < -\Psi_s. \end{cases}$$
(1)

На рис. 2 показана зависимость от времени тока через индуктивность в общем виде и характерная форма кривой тока на одном из участков. В промежуток времени от 0 до  $t_1 = \frac{\Psi_S - U_m/\omega}{U_0}$  ток имеет нулевое значение. Затем, до момента времени  $t_2 = \frac{\Psi_s + U_m/\omega}{U_0}$  ток имеет форму усеченной в области отрицательных значений синусоиды с линейно растущей постоянной составляющей



Рис. 2. Кривая тока через нелинейную индуктивность при подмагничивании постоянным током.

(т.е. это только "верхушки" синусоиды, как видно на фрагменте кривой тока на рис. 2). Начиная с момента  $t_2$  поток всегда превышает значение насыщения  $\Psi_S$  и форма кривой тока представляет собой синусоиду, наложенную на линейно растущую постоянную составляющую. На этом участке тока все гармоники, кроме первой, отсутствуют.

С достаточно высокой степенью точности можно считать, что на каждом временном отрезке, равном периоду сигнала промышленной частоты T = 20 мс ток через индуктивность является периодическим. В таком случае можно выполнить гармонический анализ и определить зависимость каждой гармоники от величины постоянного тока подмагничивания.

При условии, что везде на отрезке времени от  $t_1$  до  $t_2$  выполняется условие  $\Psi(t) > -\Psi_S$ , усеченная синусоида в каждый период времени *T* задается выражением вида

$$i(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t > t_L & \text{и } t < t_R; \\ -A\cos(\omega t) + B, & \text{если } t_1 \le t \le t_2, \end{cases}$$
(2)

где левая и правая границы отрезка  $t_L = \frac{1}{\omega} \left( -\arcsin\left(\frac{B}{A}\right) + \frac{\pi}{2} \right)$  и  $t_R = \frac{1}{\omega} \left( \arcsin\left(\frac{B}{A}\right) + \frac{3\pi}{2} \right)$  соответственно являются корнями уравнения (1);  $A = \frac{U_m}{\omega L_S}, B = \frac{U_0}{L_S} t - \frac{\Psi_S}{L_S}$  из того же уравнения.

Проведем следующую замену переменных:

$$\tau = \omega t, x = \frac{B}{A}, j(\tau) = \frac{i(t)}{A}.$$

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 85 № 3 2021

Тогда выражение (2) примет вид

$$j(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{если } \tau > \tau_L & \text{и } \tau < \tau_R; \\ -\cos(\tau) + x, & \text{если } \tau_1 \le \tau \le \tau_2, \end{cases}$$

где 
$$\tau_L = -\arcsin(x) + \frac{\pi}{2}$$
 и  $\tau_R = \arcsin(x) + \frac{3\pi}{2}$ 

Вычислим коэффициенты ряда Фурье для каждого периода на отрезке от  $t_1$  до  $t_2$ . Каждый коэффициент будет являться функцией переменной  $x = \frac{B}{A} = \frac{U_0 \omega t - \omega \Psi_S}{U_m}$ , которая теперь выступает в качестве аналога текущего времени. Несложно посчитать, подставив значения величин  $\Psi_S - U_m/\omega$   $\Psi_S + U_m/\omega$ 

$$t_1 = \frac{\Psi_S - U_m/\omega}{U_0}$$
 и  $t_2 = \frac{\Psi_S + U_m/\omega}{U_0}$ , что новая пере-

Постоянная составляющая определяется соот-

ношением

$$A_{0}(x) = \frac{1}{\tau_{R} - \tau_{L}} \int_{\tau_{L}}^{\tau_{R}} j(\tau) d\tau = x + \frac{\sqrt{1 - x^{2}}}{\arcsin(x) + \frac{\pi}{2}}$$

Вычисление гармоник облегчается тем, что один из коэффициентов ряда Фурье равен 0:

$$b_n(x) = \frac{2}{\tau_R - \tau_L} \int_{\tau_L}^{\tau_R} j(\tau) \sin(n\tau) d\tau = 0,$$



Рис. 3. Результаты расчета зависимости гармоник тока через нелинейную индуктивность от величины постоянной составляющей.

поэтому выражение для амплитуды гармоник имеет вид  $A_n(x) = \sqrt{a_n(x)^2}$ , где  $a_n(x) = \frac{2}{\tau_R - \tau_L} \times \int_{\tau_L}^{\tau_R} j(\tau) \cos(n\tau) d\tau$ . Общий вид выражения для гармоники с номером n является достаточно громоздким, поэтому приведем только формулы для амплитуд первой, третьей, шестой и девятой гармоник (в соответствии с рис. 1):

$$A_{1}(x) = 1 + \frac{\sqrt{x^{2}(1-x^{2})}}{\arcsin(x) + \frac{\pi}{2}}, \quad A_{3}(x) = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{(x^{3}-x)^{2}(1-x^{2})}}{\arcsin(x) + \frac{\pi}{2}},$$
$$A_{6}(x) = \frac{2}{105} \cdot \frac{\sqrt{(80x^{6}-128x^{4}+51x^{2}-3)^{2}(1-x^{2})}}{\arcsin(x) + \frac{\pi}{2}},$$
$$A_{9}(x) = \frac{2}{45} \frac{\sqrt{(128x^{9}-296x^{7}+228x^{5}-65x^{3}+5x)^{2}(1-x^{2})}}{\arcsin(x) + \frac{\pi}{2}}.$$

На рис. 3 представлены зависимости этих гармоник от величины постоянной составляющей  $A_0(x)$ . Все высшие гармоники демонстрируют одинаковый ход зависимостей, подобный показанным на рис. 3:

 – зависимости начинаются от нулевого значения, так как при отсутствии подмагничивания ток в цепи тоже отсутствует;

 на области определения аргумента x зависимости носят немонотонный характер, имея несколько максимумов, число которых на единицу меньше номера соответствующей гармоники;

— возможна ситуация, когда в определенном диапазоне изменения величины постоянного тока  $A_0(x)$  третья и шестая гармоники растут, а девятая уменьшается, что соответствует результатам на рис. 1, полученным в ходе прямого эксперимента.

Аналитическая зависимость для первой гармоники отличается от экспериментальной, т.к. гармоники прямой и обратной последовательностей в нейтрали трехфазной сети должны быть равны нулю. Ток первой гармоники в нейтрали возникает по причине дисбаланса фазных напряжений и нагрузок, поэтому его величина не зависит от величины ГИТ, в отличие от фазных токов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальных исследований влияния токов в нейтрали на насыщение магнитопровода трансформатора выявлено неоднозначное поведение высших гармоник: возможны как рост, так и снижение амплитуды тока гармоники с ростом величины ГИТ. С помощью простейшей математической модели процесса подмагничивания нелинейной индуктивности постоянным током показано, что немонотонный ход функциональной зависимости гармоник тока от величины ГИТ в нейтрали силового автотрансформатора определяется исключительно нелинейной веберамперной характеристикой его магнитной системы. Результаты имеют качественный характер, но позволяют исследовать процесс насыщения магнитопроводов силовых трансформаторов при подмагничивании постоянным током и выяснить, какое возможное вторичное влияние способны оказать ГИТ на автоматику и релейную защиту силовых трансформаторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Баранник М.Б., Данилин А.Н., Катькалов Ю.В. и др. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 118; Barannik M.B., Danilin A.N., Kat'kalov Y.V. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2012. V. 55. No. 1. P. 110.
- 2. http://eurisgic.org.
- 3. *Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Билин В.А. и др. //* Труды КНЦ РАН. 2017. № 1. С. 43.
- 4. *Walling R.A., Khan A.N.* // IEEE Trans. Power. Deliv. 1991. V. 6. No. 4. P. 1707.
- Lu S., Liu Y., De La Ree J. // IEEE Trans. Power. Deliv. 1993. V. 8. No. 2. P. 725.
- Zirka S.E., Moroz Y.I., Elovaara J. et al. // Int. J. Electr. Power. Energ. Syst. 2018. V. 103. P. 168.
- 7. Bolduc L., Langlois P., Boteler D., Pirjola R. // IEEE Trans. Power. Deliv. 1998. No. 13(4). P. 1251.
- 8. Boteler D. // Electric. IEEE Mag. 2015. V. 3. No. 4. P. 4.
- 9. Myllys M., Viljanen A., Rui Ø.A., Ohnstad T.M. // JSWSC. 2014. V. 4. Art. No. A10.

# Effects of geomagnetically induced currents on the harmonics in power transformers

## V. N. Selivanov<sup>*a*</sup>, \*, Ya. A. Sakharov<sup>*b*</sup>

<sup>a</sup>Northern Energetics Research Centre—Branch of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, 184209 Russia <sup>b</sup>Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia \*e-mail: v.selivanov@ksc.ru

Experimental data on the effect of geomagnetically induced currents on a power transformer are presented. An analytical solution for current harmonics through a nonlinear inductance under dc bias is obtained. It is shown that the nonmonotonic dependence of the harmonic amplitude on the direct current value is determined by the nonlinearity of the saturation characteristic of the inductor.