

## Оценка бросков тока намагничивания силового трансформатора

КУВШИНОВ А.А., ВАХНИНА В.В., ЧЕРНЕНКО А.Н.

*Обоснована математическая модель ветви намагничивания силового трансформатора с броневой (бронестержневой) конструкцией магнитной системы, позволяющая получить аналитические выражения для мгновенных значений тока намагничивания в условиях геомагнитных возмущений. Получены количественные оценки амплитуды и продолжительности бросков тока намагничивания в зависимости от интенсивности геомагнитных возмущений. Показана динамика переходного процесса насыщения магнитной системы силового трансформатора, изменения амплитуды и продолжительности бросков тока намагничивания после внезапного возникновения геомагнитных возмущений. Определена погрешность оценки амплитуды бросков тока намагничивания при геомагнитных возмущениях на основе сравнения с экспериментальными данными.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** силовой трансформатор, ток намагничивания, магнитная система, одностороннее насыщение, магнитный поток, геоиндуцированный ток

Магнитная система современных силовых трансформаторов выполняется с минимальными немагнитными зазорами благодаря новым технологиям шихтовки, из которых наиболее совершенной является схема шихтовки «Step Lap» [1]. Значение рабочей индукции в стержнях магнитной системы силовых трансформаторов выбирается обычно в пределах (1,6÷1,7) Тл [2–4]. Индукция насыщения практически всех современных марок электротехнических сталей близка к уровню 2,0 Тл при напряженности магнитного поля 5000 А/м и более [5, 6]. Указанные факторы радикально уменьшают ток холостого хода до значений, не превышающих (0,5÷1,0)% в зависимости от номинальной мощности, и обеспечивают протекание всех эксплуатационных режимов от холостого хода до номинальной нагрузки без насыщения магнитной системы. Однако при повышении напряжения в электрической сети сверх номинального значения только до уровней, регламентированных нормативными документами [7, 8], возможно перевозбуждение магнитной системы. Например, повышение напряжения в электрической сети на 10% выше номинального значения вызывает увеличение тока холостого хода силовых трансформаторов более чем в 2 раза, что служит индикатором начинающегося насыщения магнитной системы [2, 9].

Возможны аномальные режимы, которые сопровождаются появлением квазипостоянной составляющей магнитного потока, вызывающей насыщение магнитной системы и многократное увеличение тока намагничивания до уровня номинального тока силового трансформатора и даже до уровней, соизмеримых с токами короткого замыкания. Под квазипостоянной в дальнейшем понима-

ется составляющая магнитного потока, в том числе и апериодическая составляющая, которая остается практически неизменной на интервале одного или нескольких периодов напряжения электрической сети. Квазипостоянная составляющая магнитного потока может возникать в переходном процессе включения силового трансформатора в электрическую сеть, а также при работе силового трансформатора в установившемся режиме холостого хода или под нагрузкой в условиях геомагнитных возмущений.

В первом случае квазипостоянной является апериодическая составляющая магнитного потока, которая затухает достаточно долго в течение десятков и даже сотен периодов напряжения электрической сети, причем тем дольше, чем больше номинальная мощность силового трансформатора [1, 10]. Во втором случае квазипостоянная составляющая магнитного потока может поддерживаться геомагнитными возмущениями в течение нескольких часов и даже суток [11–17]. В обоих случаях квазипостоянная составляющая магнитного потока вызывает насыщение магнитной системы и возникновение значительных бросков тока намагничивания.

Известно, что броски тока намагничивания при включении силового трансформатора могут восприниматься как токи короткого замыкания, создавая угрозу повреждения обмотки [1, 10, 18]. Гораздо более продолжительные по времени воздействия броски тока намагничивания, вызываемые геомагнитными возмущениями, могут создавать не менее серьезную угрозу. Наиболее восприимчивы к воздействию геомагнитных возмущений однофазные трансформаторы с броневой конструкцией магнитной системы и трехфазные силовые транс-

форматоры с бронестержневой конструкцией магнитной системы (обычно номинальной мощностью более 80÷100 МВА) [19]. Таким образом, задача оценки параметров тока намагничивания с учетом фактора геомагнитных возмущений является актуальной для силовых трансформаторов с броневой и бронестержневой конструкциями магнитной системы и решается в данной работе.

**Параметры тока холостого хода силовых трансформаторов при отсутствии геомагнитных возмущений.** Согласно [20] приемочные испытания силовых трансформаторов включают измерения потерь и тока холостого хода, которые должны проводиться при номинальном напряжении, а также в нескольких точках из диапазона значений от 80 до 110% номинального значения. Общее число точек измерения должно быть не менее пяти, включая номинальную точку. При этом измеряется действующее значение тока холостого хода. Полученное значение является исходным, паспортным значением, с которым в дальнейшем могут сравниваться результаты аналогичных измерений в процессе эксплуатации для диагностики технического состояния магнитной системы с целью обнаружения возможных дефектов. По согласованию между изготовителем и заказчиком может измеряться гармонический состав тока холостого хода, который выражается в процентах основной гармоники. Нормативными документами численные значения гармоник тока холостого хода не регламентируются. В табл. 1 представлены номинальные параметры и параметры холостого хода широкой номенклатуры силовых трансформаторов.

Данные табл. 1 показывают, что действующие значения токов холостого хода силовых трансформаторов, выраженные в именованных единицах, находятся в диапазоне от 0,77 до 6,56 А, причем активной составляющей тока холостого хода можно пренебречь и полагать в дальнейшем  $I_x \approx I_\mu$ .

Даже при отсутствии геоиндуцированных токов (ГИТ) реальная кривая тока намагничивания существенно отличается от синусоидальной формы

из-за присутствия нечетных гармоник, которые придают кривой тока намагничивания заметно заостренный характер. Поэтому для определения амплитудного значения тока намагничивания необходимо использовать соотношение  $I_{\mu(m)} = k_A I_x$  (здесь  $k_A$  – коэффициент амплитуды несинусоидальной кривой тока намагничивания).

При отсутствии опытных данных для конкретного силового трансформатора можно принять, что при номинальном напряжении наиболее значимые гармоники тока намагничивания равны [2]:  $I_{m(3)} \approx 0,5 I_{m(1)}$ ;  $I_{m(5)} \approx 0,1 I_{m(1)}$ ;  $I_{m(7)} \approx 0,02 I_{m(1)}$ ;  $I_{m(9)} \approx 0,01 I_{m(1)}$ ;  $I_{m(11)} \approx 0,005 I_{m(1)}$ .

При указанном гармоническом составе тока намагничивания коэффициент амплитуды принимает значение  $k_A \approx 2,05$ .

**Основные допущения для моделирования насыщения магнитной системы силового трансформатора.** В дальнейшем рассматривается однофазный силовой трансформатор с магнитной системой броневой конструкции, которая имеет следующие особенности:

- сечение стержня магнитной системы равно суммарному сечению боковых ярм;
- концентрическое расположение обмоток;
- толщина обмоток во много раз меньше высоты обмоток (обмотки тонкие).

Перечисленные конструктивные особенности, справедливые для большинства крупных трансформаторов, позволяют построить идеализированную картину магнитного поля в магнитной системе броневой конструкции при насыщении:

- индукция магнитного поля во всех точках магнитной системы одновременно достигает значения насыщения и соответственно происходит одновременное насыщение стержня и боковых ярм, т.е. одновременное насыщение всей магнитной системы;
- направление вектора магнитной индукции в электротехнической стали сохраняется после насыщения магнитной системы;

Таблица 1

Номинальное значение			Значение тока		Активная составляющая тока х.х. $I_{x(a)}$ , А
напряжения $U_{ном}$ , кВ	мощности $S_{ном}$ , МВА	тока $I_{ном}$ , А	холостого хода $I_x$ , %/А	намагничивания $I_\mu$ , А	
110	25÷250	131,0÷1312,5	0,7÷0,5/0,92÷6,56	0,887÷6,30	0,245÷1,820
220	40÷630	105,0÷1653,0	0,9÷0,35/0,945÷5,80	0,917÷5,40	0,227÷2,180
330	63÷630	110,0÷1100,0	0,70÷0,35/0,77÷3,86	0,68÷3,66	0,364÷1,230
500	250	275	0,45/1,24	1,15	0,476
500	400	440	0,40/1,76	1,63	0,670
500	630	693	0,35/2,43	2,24	0,952

концентрические обмотки являются цилиндрическими поверхностями, не пропускающими магнитные потоки.

При указанных допущениях магнитное поле после насыщения магнитной системы локализуется в области, определяемой геометрическими размерами магнитной системы и обмоток. Основу идеализированной картины магнитного поля составляют трубки магнитного потока, параллельные оси стержня и боковых ярм.

**Броски тока намагничивания при включении силового трансформатора в электрическую сеть.** В наиболее неблагоприятном случае включения силового трансформатора в момент прохождения сетевого напряжения через нулевое значение появляется максимальная по значению апериодическая составляющая магнитного потока, которая при сложении с магнитным потоком остаточной индукции вызывает техническое насыщение магнитной системы и возникновение экстремальных по амплитуде бросков тока намагничивания. Согласно [21] область технического насыщения характеризуется индукцией насыщения  $B_S$ , значение которой зависит от процентного содержания кремния  $C_{Si}\%$  в составе электротехнической стали и определяется эмпирическим соотношением [22]:

$$B_S = 2,16 - 0,048C_{Si}\% \text{ Тл.}$$

Приведенное соотношение позволяет в качестве расчетного значения индукции насыщения при отсутствии информации о марке электротехнической стали, использованной для изготовления магнитной системы силового трансформатора, принимать  $B_S = 2,0$  Тл [10, 23, 24].

Для учета технического насыщения магнитной системы при оценке бросков тока намагничивания обычно используют следующие допущения [1, 10, 23, 24]:

основная кривая намагничивания электротехнической стали замещается такой кусочно-линейной кривой, у которой значение относительной дифференциальной магнитной проницаемости принимается бесконечно большим ( $\mu_d = \infty$ ) до насыщения и равным единице ( $\mu_d = 1$ ) после насыщения (рис.1,а);

гистерезисные явления и вихревые токи отсутствуют.

Реальная кривая намагничивания современных марок высококачественной стали заметно отличается от простейшей кусочно-линейной аппроксимации, изображенной на рис.1,а, только в области перегиба и соответственно в очень узком диапазоне значений магнитной индукции  $B = (0,95 \div 1,03)B_S$  [10].

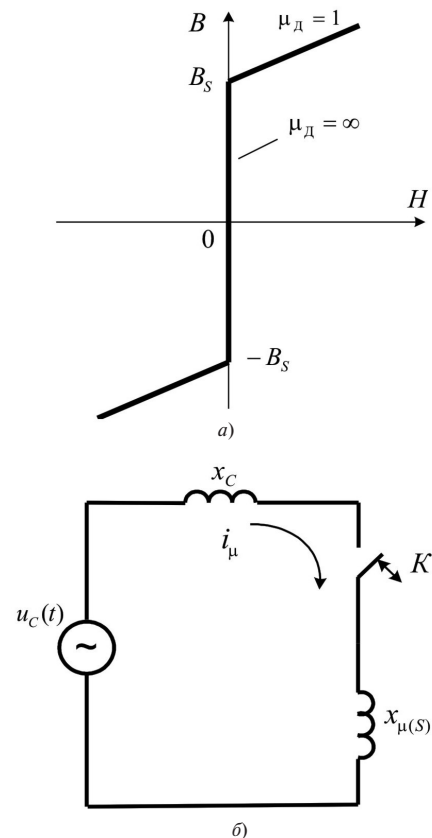


Рис. 1. Кусочно-линейная идеализация основной кривой намагничивания электротехнической стали (а) и упрощенная схема замещения (б) для расчета броска тока намагничивания

Принятые допущения позволяют воспользоваться упрощенной схемой замещения, в которой насыщение силового трансформатора моделируют коммутации ключа  $K$  (рис.1,б) в зависимости от значения индукции в стержне магнитной системы:

$$K = \begin{cases} 1 & \text{при } B \geq B_S; \\ 0 & \text{при } B < B_S. \end{cases} \quad (1)$$

Тогда при фазном напряжении электрической сети

$$u_C(t) = \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}} \sin \omega t \quad (2)$$

амплитуду первого максимального броска тока намагничивания можно оценить с помощью известного выражения [1]:

$$I_{\mu \max} = \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}} \frac{K_r}{(x_C + x_{\mu(s)})} \left[ 2 - \frac{(B_S - B_r)}{B_m (U_C / U_{C\text{ном}})} \right], \quad (3)$$

где  $U_C$  – действующее значение линейного напряжения электрической сети;  $\omega$  – угловая частота напряжения электрической сети;  $U_{C\text{ном}}$  – номинальное напряжение электрической сети;  $x_C$  – эквива-

лентное индуктивное сопротивление электрической сети;  $x_{\mu(S)}$  — индуктивное сопротивление ветви намагничивания силового трансформатора в области технического насыщения;  $B_r$  — остаточная индукция магнитного поля в стержне магнитной системы силового трансформатора;  $B_m$  — номинальная индукция магнитного поля в стержне магнитной системы;  $K_r$  — коэффициент поправки на активное сопротивление электрической сети и обмоток, потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитной системе силового трансформатора.

Как показано в [1], для силовых трансформаторов номинальной мощностью более 2,5 МВА можно принимать коэффициент поправки  $K_r = 1$  и при оценке первого броска тока намагничивания вполне допустимо использовать упрощенную схему замещения на рис. 1,б, в которой отсутствуют активные сопротивления. Необходимо добавить, что потери в магнитной системе и во включаемой обмотке силового трансформатора определяют продолжительность затухания бросков тока намагничивания, которые у силовых трансформаторов мощностью более 100 МВА могут протекать в течение десятков секунд.

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания силового трансформатора в области технического насыщения представляет собой индуктивное сопротивление включаемой в сеть обмотки без учета стали («свободной обмотки без стали»), значение которого можно определить выражения [1, 10]:

$$x_{\mu(S)} = \mu_0 \omega \pi \frac{W^2 \left( D_{\text{ВН}} + \frac{2}{3} a \right)^2}{4h}, \quad (4)$$

где  $W$  — число витков включаемой в электрическую сеть обмотки силового трансформатора;  $D_{\text{ВН}}$  — внутренний диаметр включаемой обмотки;  $h$  — условная высота обмотки принимается равной высоте окна магнитопровода;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Для вычисления индуктивного сопротивления ветви намагничивания в области технического насыщения с помощью (4) необходима информация об основных размерах силового трансформатора, которой специалисты сетевых компаний обычно не располагают. Поэтому в ряде отечественных и зарубежных источников [25, 26] рекомендуется вне зависимости от мощности силового трансформатора значение  $x_{\mu(S)}$  принимать равным удвоенному значению индуктивной составляющей сопротивления короткого замыкания, т.е.  $x_{\mu(S)} \approx 2x_T$ .

Например, силовой трансформатор ТДЦ-400000/242/20 имеет паспортное значение напря-

жения короткого замыкания  $u_{K\%} = 11,3\%$  и основные геометрические размеры:  $D_{\text{ВН}} = 1,28$  м;  $h = 2,2935$  м;  $a = 0,142$  м;  $W = 346$ . Для данного трансформатора значение индуктивного сопротивления ветви намагничивания, вычисленное по (4), равно  $x_{\mu(S)} = 30,58$  Ом, а значение индуктивной составляющей сопротивления короткого замыкания равно  $x_T = 16,54$  Ом, т.е. предложенная рекомендация в данном случае выполняется с точностью 8,2%.

Эквивалентное индуктивное сопротивление электрической сети определяется в общем случае выражением

$$x_C = \frac{U_{\text{Сном}}^2}{S_{\text{КЗ}}}, \quad (5)$$

где  $S_{\text{КЗ}}$  — мощность трехфазного короткого замыкания электрической сети.

Значение мощности трехфазного короткого замыкания электрических сетей с номинальным напряжением (110÷500) кВ можно принимать равным (15000÷50000) МВА в соответствии с рекомендациями [20]. Например, для электрической сети с номинальным напряжением 220 кВ значение эквивалентного индуктивного сопротивления согласно (5) равно  $x_C = 1,94$  Ом.

В [10] сопоставлены результаты расчета бросков тока намагничивания при кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания, изображенной на рис. 1,а (приближенная оценка), и при задании той же кривой намагничивания по данным завода-изготовителя электротехнической стали (точная оценка). Приближенная оценка в зависимости от значения остаточной индукции и эквивалентного индуктивного сопротивления электрической сети на 8÷20% превышает точную оценку бросков тока намагничивания и может рассматриваться в качестве предельной оценки.

**Холостой ход силового трансформатора в условиях геомагнитных возмущений.** Броски тока намагничивания при включении силового трансформатора в сеть затухают в течение единиц и даже десятков секунд, поскольку обусловлены свободной квазипостоянной составляющей магнитного потока, энергия которой постепенно рассеивается в обмотках и элементах магнитной системы. Броски тока намагничивания силового трансформатора при геомагнитных возмущениях будут оставаться неизменными до тех пор, пока неизменна интенсивность геомагнитных возмущений, поскольку обусловлены вынужденной квазипостоянной составляющей магнитного потока, энергия которой поддерживается протеканием геоиндуцированных токов в обмотках высокого напряжения (ВН) с заземленной нейтралью.

Значение геоиндуцированного тока (ГИТ) определяется интенсивностью геомагнитных возмущений, которое инициирует появление горизонтальной компоненты геоэлектрического поля, и значением суммарного активного сопротивления контура протекания [27]:

$$I_{\text{ГИТ}} = \frac{|E|}{R_{\Sigma}} \sum_{n=1}^N I_n \cos \alpha_n, \quad (6)$$

где  $|E|$  – модуль вектора напряженности горизонтальной компоненты геоэлектрического поля;  $R_{\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление обмоток ВН, заземляющего устройства нейтрали обмоток ВН силового трансформатора и фазных проводов питающей линии электропередачи;  $I_n$  – длина  $n$ -го прямолинейного участка питающей линии электропередачи;  $\alpha_n$  – угол ориентации  $n$ -го участка линии электропередачи относительно вектора напряженности геоэлектрического поля;  $N$  – число прямолинейных участков линии электропередачи.

Значение ГИТ не зависит от состояния магнитной системы силового трансформатора: «насыщена – не насыщена», поэтому для оценки амплитуды бросков тока намагничивания, вызванных геомаг-

нитными возмущениями, достаточно в схему замещения (рис. 1, б) ввести дополнительный элемент – источник тока  $I_{\text{ГИТ}}$  с внутренним сопротивлением  $R_{\Sigma}$ .

На рис. 2 показана схема замещения для расчета бросков тока намагничивания силового трансформатора в режиме холостого хода в условиях геомагнитных возмущений и временные диаграммы, иллюстрирующие качественный характер формирования бросков тока намагничивания под воздействием геомагнитных возмущений.

Для анализа режима холостого хода силового трансформатора в условиях геомагнитных возмущений целесообразно предварительно трансформировать кусочно-линейную идеализацию реальной кривой намагничивания, изображенную на рис. 1, а, из координат « $B-H$ » в координаты «потокосцепление  $\psi$  – ток намагничивания  $i_{\mu}$ ». Изменение координат не изменит характер аппроксимации, но позволит абстрагироваться от необходимости знания конструктивных параметров силового трансформатора и получать аналитические выражения непосредственно для тока намагничивания.

Постоянная составляющая потокосцепления обмотки ВН силового трансформатора, обусловленная ГИТ, при изображенной на рис. 1, а идеализации основной кривой намагничивания электро-технической стали остается неизменной:

$$\psi_{\text{ГИТ}} = \text{const}, \quad (7)$$

а вынужденная переменная составляющая потокосцепления, обусловленная напряжением электрической сети (2), изменяется по гармоническому закону:

$$\psi_{\Pi}(t) = \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}\omega} \cos \omega t = -\psi_m \cos \omega t. \quad (8)$$

На интервале  $0 \leq \omega t < (\pi - \varphi)$  периода напряжения электрической сети, когда магнитная система силового трансформатора не насыщена, суммарное потокосцепление обмотки ВН определяется выражением

$$\psi_{\Sigma}(t) = \psi_{\text{ГИТ}} + \psi_{\Pi}(t), \quad (9)$$

а ток намагничивания равен нулю, т.е.  $i_{\mu}(t) = 0$ .

При достаточной интенсивности геомагнитных возмущений суммарное потокосцепление  $\psi_{\Sigma}(t)$  в момент времени, соответствующий  $\omega t = (\pi - \varphi)$ , достигнет уровня насыщения  $\psi_S$  (рис. 2, б):

$$\psi_{\Sigma}(t) = \psi_S = \psi_{\text{ГИТ}} + \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}\omega} \cos \varphi, \quad (10)$$

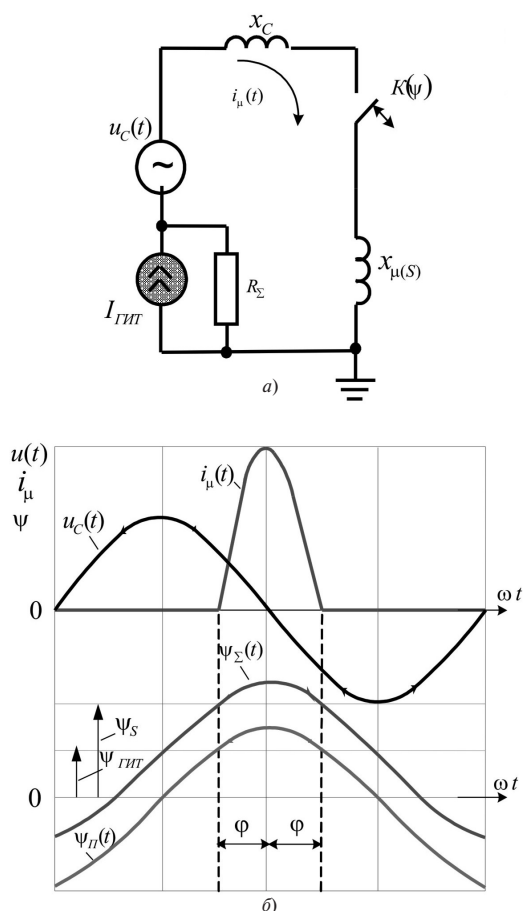


Рис. 2. Схема замещения (а) и временные диаграммы (б), иллюстрирующие процесс возникновения бросков тока намагничивания при геомагнитных возмущениях

где  $\varphi$  – фазовый угол насыщения магнитной системы силового трансформатора.

Значение фазового угла насыщения определяет продолжительность состояния технического насыщения магнитной системы силового трансформатора на интервале периода напряжения электрической сети и продолжительность протекания бросков тока намагничивания. Значение угла фазового насыщения

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\psi_S - \psi_{\text{гит}}}{\psi_m}\right) \quad (11)$$

определяется интенсивностью геомагнитных возмущений, которая учитывается квазипостоянной составляющей потокосцепления  $\psi_{\text{гит}}$ :

При отсутствии геомагнитных возмущений, когда  $\psi_{\text{гит}} = 0$ , техническое насыщение не наступает, т.е.  $\varphi = 0$ , если  $\psi_m \leq \psi_S$ . При воздействии экстремальных геомагнитных возмущений, когда  $\psi_{\text{гит}} = \psi_S$ , фазовый угол насыщения достигает предельного значения  $\varphi = \pi$  и магнитная система силового трансформатора находится в состоянии технического насыщения в течение всего периода напряжения электрической сети.

В схеме замещения рис. 2,а насыщение магнитной системы силового трансформатора моделируется ключом  $K(\psi)$ , условия коммутации которого выражаются логической функцией:

$$K(\psi) = \begin{cases} 1 & \text{при } |\psi_{\Sigma}(t)| \geq \psi_S; \\ 0 & \text{при } |\psi_{\Sigma}(t)| < \psi_S. \end{cases} \quad (12)$$

На интервале  $(\pi - \varphi) \leq \omega t \leq (\pi + \varphi)$  насыщения магнитной системы силового трансформатора, когда условие (12) трансформируется в равенство  $K(\psi) = 1$ , формируется бросок тока намагничивания, показанный на рис. 2,б, суммарное потокосцепление определяется выражением

$$\psi_{\Sigma}(t) = \psi_S + \frac{(x_C + x_{\mu(S)})}{\omega} i_{\mu}(t), \quad (13)$$

а скорость изменения суммарного потокосцепления будет определяться напряжением электрической сети:

$$\frac{d\psi_{\Sigma}}{dt} = \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}\omega} \sin \omega t. \quad (14)$$

Интегрирование выражения (14) на интервале  $\omega t \geq (\pi - \varphi)$  с учетом начального значения потокосцепления  $\psi_{\Sigma}(t) = \psi_S$  при  $\omega t = (\pi - \varphi)$  позволяет записать еще одно выражение для мгновенных значений суммарного потокосцепления на интервале

технического насыщения магнитной системы силового трансформатора:

$$\psi_{\Sigma}(t) = \psi_S - \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}\omega} (\cos \varphi + \cos \omega t). \quad (15)$$

Совместное решение уравнений (13) и (15) дает возможность определения мгновенных значений тока намагничивания после насыщения магнитной системы силового трансформатора:

$$i_{\mu}(t) = -\frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}\omega} (\cos \varphi + \cos \omega t). \quad (16)$$

Амплитудного значения бросков тока намагничивания (рис. 2,б), достигнет при  $\omega t = \pi$ :

$$i_{\mu \max} = -\frac{\sqrt{2}U_C (1 - \cos \varphi)}{\sqrt{3}(x_{\mu(S)} + x_C)}. \quad (17)$$

С учетом соотношения (11), определяющего значение фазового угла насыщения в зависимости от интенсивности геомагнитных возмущений, выражение (17) можно трансформировать к виду, удобному для сравнения с выражением (3):

$$i_{\mu \max} = -\frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}(x_{\mu(S)} + x_C)} \left[ 1 - \frac{\psi_S - \psi_{\text{гит}}}{\psi_m} \right]. \quad (18)$$

Сравнение выражений (3) и (18) позволяет отметить, что остаточная индукция  $B_r$  при включении силового трансформатора в электрическую сеть и квазипостоянная составляющая потокосцепления  $\psi_{\text{гит}}$  при работе силового трансформатора в режиме холостого хода в условиях геомагнитных возмущений оказывают принципиально одинаковое влияние на формирование амплитуды бросков тока намагничивания. Отличие заключается только в том, что выражение (3) определяет амплитуду первого наибольшего броска тока намагничивания при включении силового трансформатора в момент перехода напряжения электрической сети через нулевое значение, а выражение (18) определяет амплитуду бросков тока намагничивания, которая останется неизменной при неизменной интенсивности геомагнитных возмущений.

Интегрируя выражение (16) на интервале периода напряжения электрической сети, можно определить постоянную составляющую тока намагничивания силового трансформатора при воздействии геомагнитных возмущений:

$$I_{(=)} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\mu}(t) dt = \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}(x_{\mu(S)} + x_C)} \frac{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi}{\pi}. \quad (19)$$

Следует отметить, что выражения (16), (17) и (19) не позволяют определить значение ГИТ, при котором начинается насыщение магнитной системы силового трансформатора. Это объясняется тем, что в рамках идеализации (см. рис. 1,а) значение индуктивного сопротивления ветви намагничивания до насыщения необходимо принимать равным  $x_\mu = \infty$ . В этом случае выражение для определения конечной по значению квазипостоянной составляющей потокосцепления до насыщения магнитной системы

$$\psi_{\text{ГИТ}} = \frac{x_\mu I_{\text{ГИТ}}}{\omega}$$

вырождается в неопределенность вида  $[\infty \cdot 0]$ . Это означает, что условие  $\psi_{\text{ГИТ}} > (\psi_S - \psi_m)$  смещения режима перемагничивания в область технического насыщения обеспечивается бесконечно малым по значению ГИТ. Кроме того, указанная неопределенность не позволяет определить динамику процесса насыщения магнитной системы силового трансформатора после внезапного возникновения геомагнитных возмущений.

Таким образом, модель характеристики намагничивания рис. 1,а, получившая достаточно широкое использование для аналитической оценки амплитуды бросков тока намагничивания при включении силового трансформатора в электрическую сеть, оказывается недостаточно информативной для анализа режима холостого хода в условиях геомагнитных возмущений.

**Уточненная модель характеристики намагничивания силового трансформатора в условиях геомагнитных возмущений.** Для улучшения информативности кусочно-линейной аппроксимации характеристики намагничивания необходимо учитывать реальное значение индуктивного сопротивления  $x_\mu$  ветви намагничивания до насыщения, используя результаты опыта холостого хода [1÷4]\*:

$$x_\mu = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}I_x}, \quad (20)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение обмотки ВН силового трансформатора.

На рис. 3,а показана кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания в координатах «потокосцепление  $\psi$  – ток намагничивания  $i_\mu$ », положение точки «1» которой определяется параметрами опыта холостого хода, проводимого при номинальном напряжении на обмотке ВН. Точка «2» излома кусочно-линейной аппроксима-

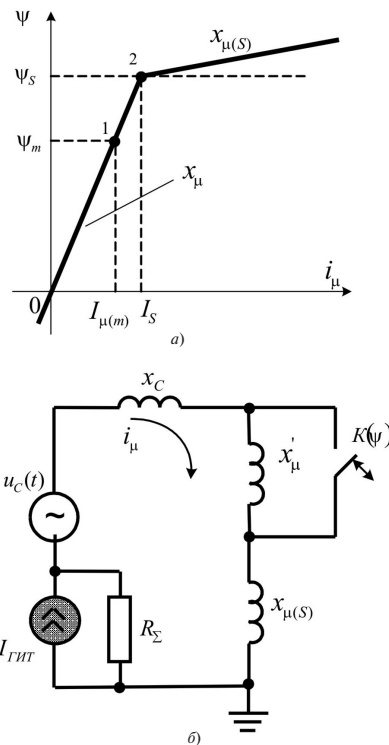


Рис. 3. Кусочно-линейная аппроксимация (а) и схема замещения (б) для расчета бросков тока намагничивания с учетом конечной величины индуктивного сопротивления ветви намагничивания до насыщения

ции образуется пересечением линии  $0-I$  с горизонтальной линией, соответствующей потокосцеплению насыщения  $\psi_S$ .

На рис. 3,б показана схема замещения для расчета бросков тока намагничивания силового трансформатора при холостом ходе в условиях геомагнитных возмущений с учетом конечного значения индуктивного сопротивления ветви намагничивания до насыщения магнитной системы. Отличие от схемы замещения, изображенной на рис. 2,а, заключается в наличии дополнительной индуктивности  $x'_\mu = (x_\mu - x_{\mu(S)})$ . Ключ  $K(\psi)$  моделирует изменение индуктивного сопротивления ветви намагничивания силового трансформатора при изменении состояния магнитной системы: при  $K(\psi)=1$  индуктивное сопротивление равно  $x_{\mu(S)}$ ; при  $K(\psi)=0$  –  $x_\mu$ .

При аппроксимации характеристики намагничивания, изображенной на рис. 3,а, условие коммутации (12) ключа  $K(\psi)$  может быть дополнено эквивалентной логической функцией:

$$K(\psi) = \begin{cases} 1 & \text{при } i_\mu \geq I_S; \\ 0 & \text{при } i_\mu < I_S. \end{cases}$$

При этом суммарное потокосцепление  $\psi_\Sigma(t)$  обмотки ВН определяется выражением (9). Посколь-

\* Получаемое по формуле (20) значение индуктивного сопротивления  $x_\mu$  носит исключительно оценочный характер. *Ред.*

ку для суммарного потокоцепления  $\psi_{\Sigma}(t)$  справедлив принцип непрерывности во времени, то для моментов времени непосредственно перед насыщением и сразу после насыщения магнитной системы справедливо равенство

$$\psi_{\Sigma}(0-) = \psi_{\Sigma}(0+) = \psi_S,$$

которое с учетом (14) можно распространить и на производные

$$\frac{d\psi_{\Sigma}(0-)}{dt} = \frac{d\psi_{\Sigma}(0+)}{dt}.$$

Из последнего соотношения с учетом кусочно-линейной аппроксимации, изображенной на рис. 3,а, следует равенство

$$\frac{x_{\mu}}{\omega} \frac{di_{\mu}(0-)}{dt} = \frac{x_{\mu(S)}}{\omega} \frac{di_{\mu}(0+)}{dt}$$

и отношение производных

$$\frac{di_{\mu}(0+)/dt}{di_{\mu}(0-)/dt} = \frac{x_{\mu}}{x_{\mu(S)}} = K_{\mu(S)}.$$

Как видно, скорость изменения тока намагничивания в момент насыщения магнитной системы скачком увеличивается в  $K_{\mu(S)}$  раз, обуславливая формирование броска тока намагничивания. Соответственно в момент выхода из состояния насыщения скорость изменения тока намагничивания скачком уменьшается в  $K_{\mu(S)}$  раз.

Необходимо отметить, что непосредственно перед насыщением и сразу после насыщения магнитной системы ток намагничивания сохраняет неизменное значение:

$$i_{\mu}(0-) = i_{\mu}(0+) = I_S.$$

В этом случае энергия магнитного поля, достигающая непосредственно перед насыщением значения

$$W(0-) = \frac{x_{\mu}}{\omega} I_S^2,$$

сразу после насыщения уменьшается до уровня

$$W(0+) = \frac{x_{\mu(S)}}{\omega} I_S^2,$$

т.е. в  $K_{\mu(S)}$  раз.

В рамках принятой идеализации характеристики намагничивания возникающая разность  $\Delta W = W(0-) - W(0+)$  объясняется затратами энергии на осуществление упругого поворота векторов намагниченности доменов электротехнической стали до направления вектора напряженности внешнего

магнитного поля. При выходе магнитной системы из состояния насыщения векторы намагниченности доменов вернутся в исходное положение, возвращая энергию  $\Delta W$  в магнитное поле.

**Динамика насыщения магнитной системы силового трансформатора после внезапного возникновения геомагнитных возмущений.** При отсутствии геомагнитных возмущений ( $I_{\text{ГИТ}} = 0$  на схеме замещения, рис. 3,б) ток намагничивания силового трансформатора в режиме холостого хода, когда к обмотке ВН приложено напряжение, определяемое выражением (2), и отсутствует насыщение магнитной системы, определяется выражением

$$i_{\mu(C)}(t) = \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}\sqrt{R_{\Sigma}^2 + x_{\mu}^2}} \sin(\omega t - \theta), \quad (21)$$

где  $\theta = \arctg(x_{\mu} / R_{\Sigma})$ .

Поскольку  $x_{\mu} \gg R_{\Sigma}$ , то  $\theta \approx \pi/2$  и ток намагничивания можно определять с помощью более простого выражения:

$$i_{\mu(C)}(t) = \frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}x_{\mu}} \cos \omega t = -I_{\mu(m)} \cos \omega t, \quad (22)$$

где  $I_{\mu(m)}$  – амплитуда эквивалентной синусоиды тока намагничивания при отсутствии насыщения магнитной системы.

После внезапного возникновения геомагнитных возмущений, которое моделируется ступенчатой функцией

$$I_{\text{ГИТ}} = I_{\text{ГИТ}} 1(t) = \begin{cases} I_{\text{ГИТ}} & \text{при } t \geq 0; \\ 0 & \text{при } t < 0, \end{cases} \quad (23)$$

ток намагничивания будет содержать две составляющие:

$$i_{\mu}(t) = i_{\mu(C)}(t) + i_{\mu(\text{ГИТ})}(t) = -I_{\mu(m)} \cos \omega t + I_{\text{ГИТ}} (1 - e^{-t/\tau_{\mu}}), \quad (24)$$

где  $\tau_{\mu} = x_{\mu} / \omega R_{\Sigma}$  – постоянная времени возрастания экспоненциальной составляющей.

В моменты времени  $t_{(n)} = n\pi / \omega$  численные значения гармонической  $i_{\mu(C)}(t)$  и экспоненциальной  $i_{\mu(\text{ГИТ})}(t)$  составляющих тока намагничивания суммируются, определяя максимальное значение в конце  $n$ -го полупериода напряжения электрической сети с момента начала геомагнитных возмущений:

$$I_{\mu \text{ max}}^{(n)} = I_{\mu(m)} + I_{\text{ГИТ}} (1 - e^{-n\pi R_{\Sigma} / x_{\mu}}), \quad (25)$$



где  $n=1,3,5,7,\dots$  – порядковый номер полупериода напряжения электрической сети с момента начала внезапных геомагнитных возмущений.

В зависимости от значения экспоненциальной составляющей  $I_{\mu(\text{ГИТ})}(t)$  тока намагничивания можно выделить несколько этапов изменения состояния магнитной системы силового трансформатора после внезапного начала геомагнитных возмущений (рис. 4):

*этап I* – исходный установившийся режим холостого хода при  $I_{\text{ГИТ}}=0$ ;

*этап II* – переходный режим холостого хода без насыщения магнитной системы, пока  $I_{\mu \max}^{(n)} \leq I_S$ ;

*этап III* – переходный режим холостого хода с увеличением фазового угла насыщения магнитной системы и бросков тока намагничивания, когда  $I_{\mu \max}^{(n)} > I_S$ ;

*этап IV* – установившийся режим холостого хода с неизменной величиной фазового угла насыщения магнитной системы и бросков тока намагничивания при  $I_{\text{ГИТ}} = \text{const}$ .

Выражение (25) позволяет определить число полупериодов напряжения электрической сети после внезапного начала геомагнитных возмущений, в течение которых режим перематгничивания магнит-

ной системы силового трансформатора сместится на границу области технического насыщения, по критерию достижения равенства  $I_{\mu \max}^N > I_S$ :

$$[N] = \frac{x_{\mu}}{\pi R_{\Sigma}} \ln \left[ 1 - \frac{(I_S - I_{\mu(m)})}{I_{\text{ГИТ}}} \right], \quad (26)$$

где  $[N]$  – целая часть ближайшего к полученному результату нечетного числа.

На интервале первых  $N$  полупериодов напряжения электрической сети (этап II на рис. 4) процесс изменения состояния магнитной системы под воздействием ГИТ носит латентный характер без заметного увеличения тока намагничивания.

Начиная с  $(N+2)$  полупериода напряжения электрической сети переходный процесс изменения состояния магнитной системы силового трансформатора начинает сопровождаться появлением бросков тока намагничивания на интервалах технического насыщения (этап III на рис. 4). На этом этапе увеличение экспоненциальной составляющей  $I_{\mu(\text{ГИТ})}(t)$  тока намагничивания сопровождается увеличением фазового угла насыщения ( $\varphi_{k+1} > \varphi_k$ ) и амплитуды бросков тока намагничивания  $I_{\mu \max}^{(k+1)} > I_{\mu \max}^{(k)}$ , т.е. каждый последующий бросок

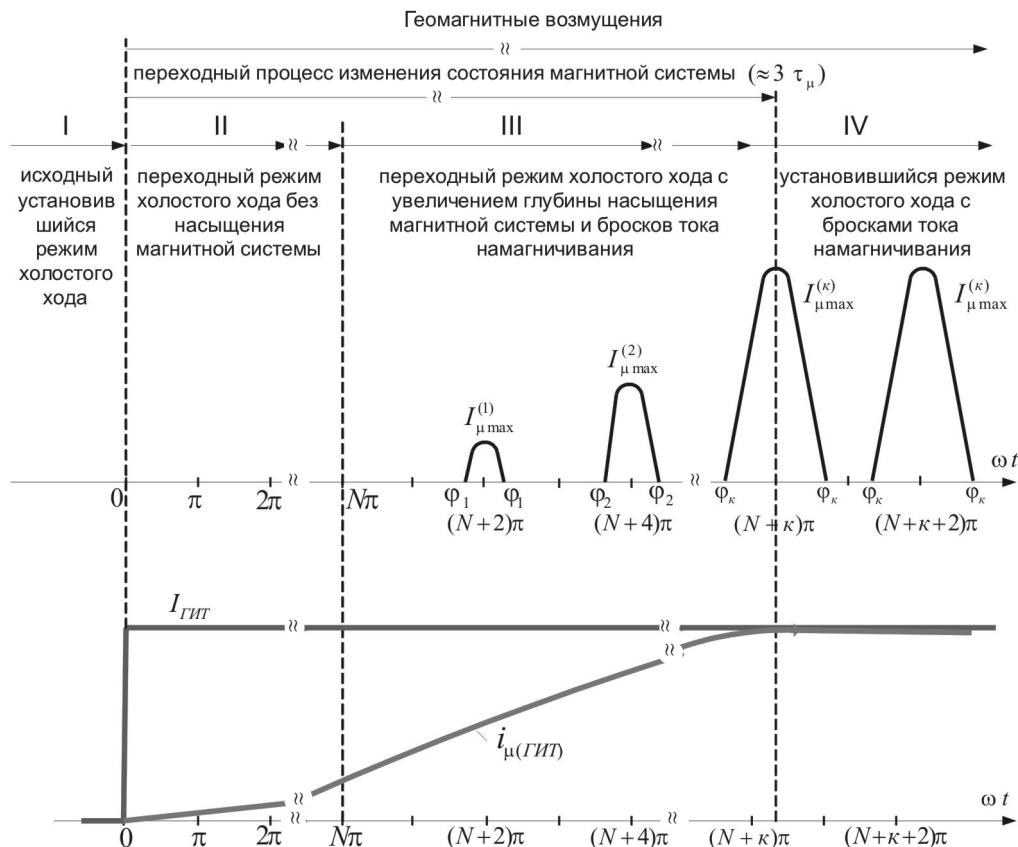


Рис. 4. Качественный характер изменения режима холостого хода силового трансформатора под воздействием геомагнитных возмущений

тока намагничивания превышает предыдущий по продолжительности и амплитуде.

Наличие экспоненциальной составляющей  $I_{\mu(\text{ГИТ})}(t)$  нарушает симметричное положение моментов начала ( $\varphi'_k$ ) и окончания ( $\varphi''_k$ )  $k$ -го броска тока намагничивания относительно момента  $\omega t = (N+k)\pi$  перехода напряжения электрической сети через нулевое значение, причем  $\varphi''_k > \varphi'_k$  из-за увеличения  $I_{\mu(\text{ГИТ})}(t)$ . Степень несимметрии оценивается разностью значений  $\varphi''_k$  и  $\varphi'_k$ , значение которой можно оценить с помощью отношения

$$\Delta\varphi_k = \varphi''_k - \varphi'_k \approx \frac{2I_{\text{ГИТ}}}{I_m} \frac{R_{\Sigma}}{x_{\mu(S)}}. \quad (28)$$

При реально существующем соотношении параметров  $I_m \gg I_{\text{ГИТ}}$  и  $x_{\mu(S)} \gg R_{\Sigma}$  несимметрию положения моментов начала и окончания  $k$ -го броска тока намагничивания можно не учитывать, поскольку  $\Delta\varphi_k \ll \varphi'_k$ , и полагать  $\varphi'_k = \varphi''_k = \varphi_k$ . В этом случае на очередном интервале технического насыщения магнитной системы  $(N+k)\pi - \varphi_k \ll (N+k)\pi + \varphi_k$  мгновенные значения  $k$ -го броска тока намагничивания будут определяться выражением

$$i_{\mu(k)}(t) = -\frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}(x_{\mu(S)} + x_C)} (\cos\varphi_k + \cos\omega t) + I_{\text{ГИТ}} \left\{ 1 - \exp\left[ \frac{\omega t + (N+k)\pi - \varphi_k}{\omega\tau_{\mu}} \right] \right\}. \quad (29)$$

Амплитудного значения  $k$ -й бросок тока намагничивания будет достигать при  $\omega t = (N+k)\pi$ :

$$I_{\mu \max}^k = -\frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}(x_{\mu(S)} + x_C)} (1 - \cos\varphi_k) + I_{\text{ГИТ}} \left\{ 1 - \exp\left[ \frac{(N+k)\pi}{\omega\tau_{\mu}} \right] \right\}. \quad (30)$$

На этапе IV установившегося режима холостого хода изменения продолжительности и амплитуды бросков тока намагничивания прекращаются. Амплитудного значения броски тока намагничивания достигают, как следует из выражения (30), при значении фазового угла насыщения, определяемого выражением (19) при  $I_{(=)} = I_{\text{ГИТ}}$ :

$$I_{\mu \max} = -\frac{\sqrt{2}U_C}{\sqrt{3}(x_{\mu(S)} + x_C)} (1 - \cos\varphi) + I_{\text{ГИТ}}. \quad (31)$$

Общая продолжительность переходного процесса изменения состояния магнитной системы, со-

стоящего из этапов II и III (рис. 4), оценивается значением

$$i_{\text{п.п}} \approx 3\tau_{\mu} = \frac{3}{2\pi} \frac{x_{\mu}}{R_{\Sigma}} T, \quad (32)$$

где  $T$  – период напряжения электрической сети.

Данная оценка должна рассматриваться в качестве предельной, поскольку на интервалах технического насыщения магнитной системы скорость увеличения экспоненциальной составляющей тока намагничивания определяется постоянной времени  $\tau_{\mu(S)} = x_{\mu(S)} / \omega R_{\Sigma}$  и соответственно индуктивным сопротивлением  $x_{\mu(S)}$  ветви намагничивания силового трансформатора. Поэтому в качестве уточненной оценки целесообразно использовать средневзвешенное значение постоянной времени

$$\tau_{\mu(\text{ЭКВ})} = \frac{1}{\pi} [\varphi\tau_{\mu(S)} + (\pi - \varphi)\tau_{\mu}],$$

которое позволяет косвенно учитывать влияние ГИТ на продолжительность переходного процесса изменения состояния магнитной системы силового трансформатора.

Например, переходный процесс насыщения магнитной системы силового трансформатора АОДЦН-333000/750/330 ( $I_{x\%} = 0,35\%$ ;  $u_{k\%} = 32\%$ ) при значении суммарного активного сопротивления элементов примыкающей электрической сети  $R_{\Sigma} = 33$  Ом будет определяться индуктивными сопротивлениями  $x_{\mu} = 161 \cdot 10^3$  Ом и соответствующими постоянными времени  $\tau_{\mu} = 15,53$  с;  $\tau_{\mu(S)} \approx 0,03$  с.

В этом случае эквивалентная постоянная времени при  $I_{\text{ГИТ}} = 50$  А будет определяться значением  $\tau_{\mu(\text{ЭКВ})} \approx 12,42$  с. При таких условиях число полупериодов напряжения электрической сети до начала насыщения магнитной системы составит  $[N] \approx 31$ , а продолжительность переходного процесса  $i_{\text{п.п}} \approx 3\tau_{\mu(\text{ЭКВ})} \approx 37,26$  с.

Таким образом, учет реального значения индуктивности намагничивания до насыщения позволяет не только оценить продолжительность переходного процесса изменения состояния магнитной системы силового трансформатора после начала геомагнитных возмущений, но и уточнить амплитуду бросков тока намагничивания с помощью выражения (31), позволяющего учитывать значение ГИТ как косвенно через фазовый угол насыщения, так и непосредственно.

**Верификация кусочно-линейной аппроксимации характеристики намагничивания силового трансформатора.** В [28] представлены результаты экспериментального исследования однофазных силовых

трансформаторов номинальной мощностью 370 и 550 МВА, которые подвергаются воздействию постоянного тока, пропускаемого через обмотки низкого напряжения, при одновременном приложении напряжения 735 кВ к обмоткам высокого напряжения. Броски тока намагничивания, которые фиксировались при проведении испытаний, по форме соответствуют броску тока намагничивания на рис. 2. В табл. 2 представлены результаты измерения параметров тока намагничивания при различных значениях постоянного тока  $I_{\text{гит}}$ .

Таблица 2

Данные табл. 3 в [28]			Расчетные параметры на основе данных табл. 3 в [28]	
$I_{\text{гит}}$ , А	$I_{\mu\text{max}} / I_{\text{гит}}$	Длительность броска тока намагничивания, эл. град.	$I_{\mu\text{max}}$ , А	$\varphi$ , эл. град.
12,5	11,8	46	147,5	23
25	9,4	58	235	29
50	7,6	71	380	35,5
75	6,7	81	502,5	40,5

Поскольку в [28] не приводятся паспортные данные испытуемых силовых трансформаторов и мощность короткого замыкания питающей энергосистемы на шинах экспериментальной установки, то расчет параметров бросков тока намагничивания проводится с использованием паспортных данных ближайшего отечественного аналога — однофазного автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330.

В частности, расчетное значение индуктивного сопротивления ветви намагничивания в состоянии технического насыщения магнитной системы в этом случае равно  $x_{\mu(S)} \approx 304,66$  Ом. Эквивалентное индуктивное сопротивление питающей энергосистемы принято равным нулю. Далее представлены расчетные значения амплитуды бросков тока намагничивания, полученные с помощью выражения (31), и результаты сравнения с экспериментальными значениями:

$I_{DC(BH)}$ , А	$I_{\mu\text{max}}$ , А расчет/эксперимент	Относительная погрешность
12,5	147,5/156,60	6,17
25,0	235,0/246,97	5,09
50,0	380,0/366,14	3,65
75,0	502,5/472,0	6,07

**Заключение.** Кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания, которая получила достаточно широкое распространение для оценки бросков тока включения силовых трансформаторов, позволяет получать адекватные оценки (с точностью до 6%) амплитуды бросков тока намагни-

чивания при воздействии геоиндуцированных токов и может использоваться при моделировании установившихся и переходных процессов в сложных электроэнергетических системах в условиях геомагнитных возмущений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Силовые трансформаторы.** Справочная книга/Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004, 616 с.
2. **Васютинский С.Б.** Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970, 432 с.
3. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учебное пособие для вузов. 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.
4. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: учебник для вузов. Том 1: Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах и их устройство. Основные вопросы теории и конструкции трансформаторов и асинхронных машин. М.: Издат. дом МЭИ, 2006, 532 с.
5. **Электротехнический справочник:** Т.1. Общие вопросы. Электротехнические материалы/Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. М.: Изд-во МЭИ, 2003, 440 с.
6. **Каталог продукции.** Прокат холоднокатаный тонколистовой из электротехнической анизотропной стали. Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК), 2018.
7. **СТО 56947007-29.180.091-2011.** Типовые технические требования к трансформаторам, автотрансформаторам (распределительным, силовым) классов напряжения 110-750 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
8. **ГОСТ 32144-2013.** Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего применения.
9. **Кучумов Л.А., Кузнецов А.А.** Методика расчета высших гармоник токов намагничивания понижающих трансформаторов. — Электричество, 1998, № 3, с. 13–20.
10. **Лейтес Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981, 392 с.
11. **Гершенгорн А.И.** Воздействие геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем. — Электрические станции, 1993, № 6, с. 54–63.
12. **Walling R.A., Khan A.H.** Characteristics of transformer exciting current during geomagnetic disturbances. — IEEE Trans on Power Delivery, 1991, vol. 6, No. 4. pp. 1707–1714.
13. **Boteller D.H.** Effect of geomagnetically induced current B.C. Hydro 500 kV – System. — IEEE Trans. Power Deliv, 1989, vol. 4, No. 1, pp. 818–823.
14. **Pirjola R.** Effect of interaction between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power transmission systems. — Earth Planet Space, 2008, No. 60, pp. 743–751.
15. **Molinski T.S.** Why utilities respect geomagnetically induced currents. — JASTP, 2002, vol. 64, No. 16, pp. 1765 – 1778.
16. **Ngueguen T., Marketos F., Devaux F., Xu T., Bardsley R., Barker S., Baldauf J., Oliveira J.** Behavior of transformers under DC/GIC excitation Phenomenon, Impact on design/design evaluation process and Modelling aspects in support of Design. — CIGRE 2012.
17. **Document C-15.** Procedures for Solar Magnetic Disturbance Which Affect Electric Power Systems: Approved by the Task Force on Coordination of Operation on April 10, 1989, 29 p.
18. **Елагин В.Н., Лурье А.И., Панибратец А.Н.** Броски тока включения трансформатора. — Электротехника, 1997, № 2.
19. **Nobuo T., Tetsuo O., Fumihiko M., Sadamu S., Yasuo F.** An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents. — IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, vol. 9, № 2, pp. 1173–1179.

20. ГОСТ Р52719-2017. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

21. ГОСТ 19693-74. Магнитные материалы. Термины и оп-ределения.

22. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехниче-ской стали. 2-е изд. М.: Энергия, 1974, 240 с.

23. Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Мороз Е.Ю., Тарчуткин А.Л. Топологические модели трансформатора. – Электричество, 2012, № 10, с. 33–42.

24. Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Трансформаторы в элек-трической сети. Моделирование переходных процессов с уче-том конфигурации магнитной системы. – Новости Электротех-ники, 2008, № 5(53), с. 2–7.

25. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учетом насыщения магнитопровода. – Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2015, № 1, с. 12–24.

26. Dommel H.W. Elektromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP) Theory Book. – Portland: Bonneville Power Administration, 1986.

27. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Кузнецов В.А., Рыбалко Т.А., Зюзин М.О. Механизм распространения геоиндуцирован-ных токов в системообразующих электрических сетях различ-ной топологии. – Электричество, 2015, № 5, с. 36–46.

28. Picher P., Bolduc L., Dutil A., Pham V.Q. Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers – IEEE Transactions on Power Delivery, January 1997, vol. 12, No. 1. pp. 257–265.

[21.01.2019]

*А в т о р ы:* Кувшинов Алексей Алексеевич – док-тор техн. наук, доцент, профессор кафедры «Элек-троснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета.

Вахнина Вера Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Электро-снабжение и электротехника» Тольяттинского госу-дарственного университета.

Черненко Алексей Николаевич – кандидат техн. наук, доцент Тольяттинского государственного уни-верситета.

*Electrichestvo*, 2020, No. 10, pp. 20–32

DOI:10.24160/0013-5380-2020-10-20-32

## Evaluation of the Power Transformer Magnetizing Inrush Currents

KUVSHINOV Aleksey A. (Tol'yatti State University (TSU), Tol'yatti, Russia) – Professor of Electric Supply and Electrical Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.)

VAKHNINA Vera V. (TSU, Tol'yatti, Russia) – Professor, Head of Electric Supply and Electrical Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.)

CHERNENKO Aleksey N. (TSU, Tol'yatti, Russia) – Associate Professor of Electric Supply and Electrical Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng.)

*The mathematical model of a shell-core power transformer's magnetization branch is substantiated. By using the model, analytical expressions for the magnetizing current instantaneous values under the conditions of geomagnetic disturbances can be obtained. Quantitative assessments of the magnetizing inrush current amplitudes and durations versus the geomagnetic disturbance intensity are obtained. The dynamics of the power transformer magnetic system saturation transient and changes in the magnetization inrush current amplitudes and durations after a sudden occurrence of geomagnetic disturbances are shown. The error of estimating the magnetizing inrush current amplitudes under geomagnetic disturbances is determined based on comparison with experimental data.*

**К е у w o r d s:** power transformer, magnetizing current, magnetic system, unilateral saturation, magnetic flux, geomagnetically induced current

### REFERENCES

1. **Silovyye transformatory.** *Spravochnaya kniga/Pod red. S.D. Lizunova, A.K. Lokhanina* (Power transformers. Reference book/Ed. S.D. Lizunov, A.K. Lokhanin). М.: Energoizdat, 2004, 616 p.

2. **Vasyutinskiy S.B.** *Voprosy teorii i rascheta transformatorov* (Questions of theory and calculation of transformers). L.: Energiya, 1970, 432 p.

3. **Tikhomirov P.M.** *Raschet transformatorov: uchebnoye pos. dlya vuzov, 5-ye izd.* (Calculation of transformers: educational settlement. for universities, 5th ed.). М.: Energoatomizdat 1986, 528 p.

4. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** *Elektricheskiye mashiny: uchebnyy dlya vuzov. Tom 1: Elektromekhanicheskoye preobrazovaniye energii v elektricheskikh mashinakh i ikh ustroystvo. Osnovnyye voprosy teorii i konstruktсии transformatorov i asinkhronnykh mashin* (Electric machines: textbook for universities. Vol. 1: Electromechanical energy

conversion in electrical machines and their construction. The main questions of the theory and design of transformers and asynchronous machines). М.: Izdat. dom MEI, 2006, 532 p.

5. **Elektrotekhnicheskii spravochnik: T.I. Obshchiye voprosy.** *Elektrotekhnicheskoye materialy/Pod obshch. red. V.G. Gerasimova i dr.* (Electrotechnical reference book: V.I. General issues. Electrical materials / Under total. ed. V.G. Gerasimova et al.). М.: Izd-vo MEI, 2003, 440 p.

6. **Katalog produktсии.** *Prokat kholodnokatanyy tonkolistovoy iz elektrotekhnicheskoy anizotropnoy stali. Novolipetskiy metallurgicheskii kombinat (NLMK)* (Product catalog. Cold-rolled thin-sheet steel from electrical anisotropic steel. Novolipetsk Metallurgical Plant (NLMK)), 2018.

7. **STO 56947007-29.180.091-2011.** *Tipovyye tekhnicheskoye trebovaniya k transformatoram, avtotransformatoram (raspredelitel'nyy, silovyy) klassov napryazheniya 110-750 kV. OAO*

kombinat (NLMK) (Product catalog. Cold-rolled thin-sheet steel from electrical anisotropic steel. Novolipetsk Metallurgical Plant (NLMK)), 2018.

7. **STO 56947007-29.180.091-2011.** *Tipovyye tekhnicheskiye trebovaniya k transformatoram, avtotransformatoram (raspredelitel'nym, silovym) klassov napryazheniya 110-750 kV. OAO «FSK YEES»* (STO 56947007-29.180.091-2011. Typical technical requirements for transformers, autotransformers (distribution, power) of voltage classes 110-750 kV. JSC FGC UES), 2011.

8. **GOST 32144-2013.** *Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego primeneniya* (GOST 32144-2013. Standards for the quality of electrical energy in power supply systems for general use).

9. **Kuchumov L.A., Kuznetsov A.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 3, pp. 13–20.

10. **Leytes L.V.** *Elektromagnitnyye raschety transformatorov i reaktorov* (Electromagnetic calculations of transformers and reactors). M.: Energiya, 1981, 392 p.

11. **Gershengorn A.I.** *Elektricheskkiye stantsii – in Russ. (Electricity)*, 1993, No. 6, pp. 54–63.

12. **Walling R.A., Khan A.H.** Characteristics of transformer exciting current during geomagnetic disturbances. – IEEE Trans on Power Delivery, 1991, vol. 6, No. 4. pp. 1707–1714.

13. **Boteller D.H.** Effect of geomagnetically inducted current B.C. Hydro 500 kV – System. – IEEE Trans. Power Deliv, 1989, vol. 4, No. 1, pp. 818–823.

14. **Pirjola R.** Effect of interaction between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power transmission systems. – Earth Planet Space, 2008, No. 60, pp. 743–751.

15. **Molinski T.S.** Why utilities respect geomagnetically induced currents. – JASTP, 2002, vol. 64, No. 16, pp. 1765–1778.

16. **Ngueguet T., Marketos F., Devaux F., Xu T., Bardsley R., Barker S., Baldauf J., Oliveira J.** Behavior of transformers under DC/GIC excitation Phenomenon, Impact on design/design evaluation process and Modelling aspects in support of Design. – CIGRE 2012.

17. **Document C-15.** Procedures for Solar Magnetic Disturbance Which Affect Electric Power Systems: Approved by the Task Force on Coordination of Operation on April 10, 1989, 29 p.

18. **Yelagin V.N., Lur'ye A.I., Panibratets A.N.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1997, No. 2.

19. **Nobuo T., Tetsuo O., Fumihiko M., Sadamu S., Yasuo F.** An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents. – IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, vol. 9, No. 2, pp.

20. **GOST R52719-2017.** *Transformatory silovyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* (Power transformers. General technical conditions).

21. **GOST 19693-74.** *Magnitnyye materialy. Terminy i opredeleniya* (GOST 19693-74. Magnetic materials. Terms and Definitions).

22. **Druzhinin V.V.** *Magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskoy stali. – 2-ye izd* (Power transformers. General technical conditions). M.: Energiya, 1974, 240 p.

23. **Zirka S.Ye., Moroz YU.I., Moroz Ye.YU., Tarchutkin A.L.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 10, pp. 33–42.

24. **Yevdokunin G.A., Dmitriyev M.V.** *Novosti Elektrotekhniki – in Russ. (News of Electrical Engineering)*, 2008, No. 5 (53), pp. 2–7.

25. **Novash I.V., Rumyantsev Yu.V.** *Izv. vuzov i energeticheskikh ob'yedineniy SNG. Energetika – in Russ. (News of Higher Educational Establishments and Energetic Associations of SNG. Energy)*, 2015, No. 1, pp. 12–24.

26. **Dommel H.W.** *Elektromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP) Theory Book.* – Portland: Bonneville Power Administration, 1986.

27. **Kuvshinov A.A., Vakhnina V.V., Kuznetsov V.A., Rybalko T.A., Zyuzin M.O.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 5, pp. 36–46.

28. **Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers** – IEEE Transactions on Power Delivery, January 1997, vol. 12, No. 1. pp. 257–265.

[21.01.2019]