

О ДЛИТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С РАЗОМКНУТОЙ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКОЙ

Л. В. Багинский

(Представлено профессором, доктором технических наук
И. Д. Кутявиным)

В связи с вопросом применения упрощенной схемы продольной дифференциальной защиты с равновесием вторичных э. д. с. (без цепи циркуляции токов) на генераторах возникает необходимость длительной работы трансформаторов тока в режиме холостого хода. Имеется множество указаний на недопустимость такого режима работы для трансформаторов тока. Однако

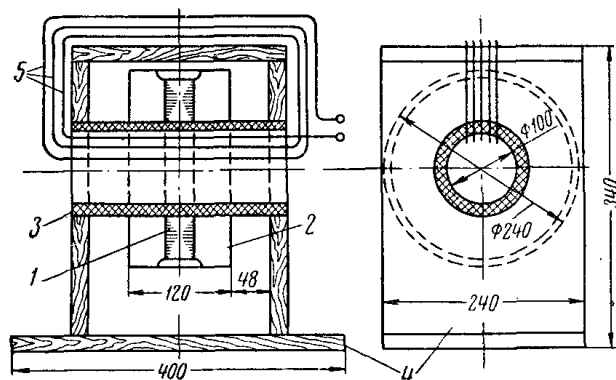


Рис. 1.

все эти указания относятся к трансформаторам с большим объемом стали сердечников. Поскольку трансформаторы тока названной выше защиты не нуждаются в большом объеме стали, имеется возможность найти такие условия, при которых режим длительной работы трансформаторов тока с разомкнутой вторичной обмоткой является допустимым.

Как известно, рассматриваемый режим связан с возникновением во вторичной обмотке значительных напряжений пикового характера, опасных для изоляции вторичных цепей, а также для обслуживающего персонала и с сильным разогревом сердечника, что может вывести из строя изоляцию вторичных обмоток. Кроме того, высказывались предположения, что повышение температуры сердечника может привести к потере магнитных свойств сталию [1]. Исследования Л. Ш. Казарновского [2] опровергли это предположение. Заметим также, что потери в современной трансформаторной стали в 2—3 раза меньше, чем названные в [1], а уменьшение сечения кольцеобразного сердечника при неизменном внутреннем диаметре ведет к увеличению отношения поверхности к объему, улучшая условия охлаждения трансформатора.

Для оценки степени нагрева сердечников при различных токах было проведено несколько опытов как со спиральными, так и с листовыми сердечниками. Здесь приведено описание опыта, проведенного при наиболее неблагоприятных условиях. Испытанию подвергался сердечник со сравнительно большим объемом стали $q = 17,5 \text{ см}^2$, взятый из трансформатора тока типа ТПОФ без каких бы то ни было переделок. Сечение сердечника было намеренно принято завышенным против потребностей защиты. Сердечник 1 (рис. 1) был заключен в уплотненный кожух из листового железа 2 и насажен на картонную втулку 3. Втулка укреплена на деревянном станке 4, который предназначен для уменьшения влияния теплового поля первичной обмотки 5, содержащей 325 витков.

Температура окружающей среды была $+25^{\circ}\text{C}$. Измерения производились при помощи двух дифференциальных термопар, горячие спай которых были заложены между лентами сердечника и на внутренней поверхности тора. Установившийся температурный режим наступал через (6—7) ч с момента подачи намагничивающего тока. Результаты опыта представлены на рис. 2 в виде зависимостей температур сердечника t_c и внутренней поверхности тора t_n от удельной намагничивающей силы.

В данном опыте не удалось создать условия работы испытуемого трансформатора тока, достаточно приближающиеся к условиям нормальной эксплуатации. Ввиду большой индуктивности и нелинейности испытуемого трансформатора намагничивающая сила была несинусоидальной. Так, во время отсчета при $a\omega_n = 51 \text{ ампер-витков/см}$ содержание первой гармоники в намагничивающем токе было 77,5%, а третьей — 20,8%. Кроме того, не удалось избавиться от влияния теплового поля первичной обмотки. Если в эксплуатационных условиях температура первичной обмотки не превосходит 70°C , то в опыте она достигала 280°C . Однако оба эти фактора действуют в сторону завышения температуры против действительной и создают некоторый запас надежности.

Как видно из рис. 2, при $a\omega = 60 \text{ ампер-витков/см}$ температура поверхности сердечника не превысила 125°C . Следовательно, при изготовлении вторичной обмотки из провода марки ПСД с кратковременно допустимой температурой 180°C трансформаторы тока с разомкнутой вторичной обмоткой могут длительно работать на любых из выпускаемых в настоящее время генераторах. В самом деле, номинальный ток современных генераторов не превосходит $I_n < 6000 \text{ а}$, а длина средней магнитной линии по сердечнику для современных трансформаторов тока генераторного напряжения достигает $l_{cp} \approx 100 \text{ см}$.

Опыт показал, что кратковременное значительное повышение намагничивающего тока (продолжительностью порядка нескольких секунд) не влияет на температуру сердечника. При обтекании вторичной обмотки током (случай короткого замыкания в зоне защиты) она нагревается, начиная от температуры предшествующего режима. Превышение допустимой температуры над действительной температурой сердечника в 55°C обеспечивает тепловую устойчивость вторичной обмотки в этом режиме. Из этих же соображений при $I_n \leq 3000 \text{ а}$ допустимо применение более дешевого провода марки ПДА. Поскольку нагрев листовых сердечников значительно меньше нагрева спиральных, при применении первых допустимо изготовление вторичной обмотки проводом марки ПДА для любых номинальных токов.

Таким образом, с точки зрения температурного режима трансформатора тока, предназначенного для длительной работы с разомкнутой вторичной обмоткой, никаких изменений в конструкции существующих трансформаторов не требуется.

Применение более дорогого провода для изготовления вторичной обмотки¹ значительно перекрывается меньшей длиной витка, а также меньшим числом витков вторичной обмотки (см. ниже).

¹ Провод ПСД при диаметрах более 2 мм дороже провода ПБД приблизительно на 15%, а ПДА — приблизительно одинаковой стоимости с ПБД.

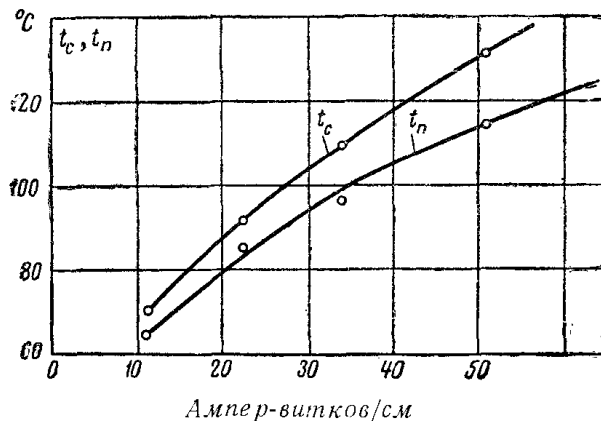


Рис. 2.

Амплитуда вторичной э. д. с. трансформаторов тока обычного исполнения при разомкнутой вторичной обмотке в момент протекания тока короткого замыкания может достичь десятков киловольт [1]. Теоретическая возможность уменьшения амплитуды вторичной э. д. с. $E_{2м}$ до любой желаемой величины заключается в снижении полного потока, пронизывающего вторичную обмотку, соответствующим изменением величин q и ω_2 , т. е.

$$E_{2м} = q\omega_2 e_{2м}, \quad (1)$$

где $e_{2м}$ — удельная амплитуда вторичной э. д. с. на один виток вторичной обмотки и 1 см^2 сечения сердечника.

Однако нельзя беспредельно уменьшать q и ω_2 , так как, с одной стороны, должна быть обеспечена достаточно высокая отдача трансформаторов во вторичную цепь при внутренних коротких замыканиях и, с другой — трудно выполнить сердечники весьма малого сечения ввиду значительных размеров первичной обмотки и ее изоляции, что вынуждает иметь большие значения $l_{ср}$. Таким образом, при заданной допустимой величине $E_{2м}$ возможность работы трансформаторов тока при разомкнутой вторичной обмотке определяется величиной $e_{2м}$.

В качестве кратковременно допустимого значения $E_{2м}$ можно принять 1000 в амплитудных. В самом деле, имеется длительный опыт эксплуатации продольной дифференциальной защиты генераторов с трансформаторами класса Д при добавочных сопротивлениях в цепи реле 10—20 ом, что неизбежно должно было вызывать резкое повышение напряжения (более 1000 в амплитудных) в цепях защиты при коротком замыкании в защищаемой зоне, когда действующее значение тока в реле часто превышает 50 а. Вместе с тем, в технической литературе нет никаких данных о том, что это привело бы к повреждению изоляции цепей защиты или к несчастному случаю. Кроме того, для вторичных цепей защиты (согласно ПТЭ) синусоидальное напряжение величиной 1000 в эффективных является испытательным.

Величина $e_{2м}$ зависит от намагничивающего тока. Однако в технической литературе в настоящее время имеется весьма мало сведений о характере зависимости $e_{2м} = f(a\omega_m)$, где $a\omega_m$ — амплитуда удельной намагничивающей силы сердечника при синусоидальном намагничивающем токе.

А. А. Воскресенский [3] полагает, что эту зависимость легко выразить аналитически:

$$E_{2м} = 5,32 \frac{1}{a} cf \left(\ln \frac{I_1^*}{m_1} - 1,63 \right), \quad (2)$$

где $c = 2\pi q\omega_2 10^{-8}$, а f — частота намагничивающего тока.

Выражение (2) получено суммированием амплитуд высших гармонических э. д. с., определенных на основании гармонического анализа функции вида:

$$B = \frac{1}{a} \ln \frac{H}{m}, \quad (3)$$

заменяющей основную кривую намагничивания.

Отсюда следует, что основная кривая намагничивания и зависимость $e_{2м} = f(a\omega_m)$ в определенном масштабе должны повторять друг друга, так как обе эти зависимости являются логарифмическими. Такой характер зависимости $e_{2м} = f(a\omega_m)$, когда $e_{2м}$ нарастает значительно медленнее, чем $a\omega_m$, весьма выгоден с точки зрения возможности достижения допустимых значений $E_{2м}$. На рис. 3 представлены для одного и того же образца результаты определения зависимости $e_{2м}$

опытным путем (кривая 1) и посредством расчета по выражению (2) (кривая 2). Причина огромного занижения результатов расчета заключается в неточной аппроксимации основной кривой намагничивания в области малых значений H . В самом деле, при $H=0$ согласно уравнению (3) $B=\frac{1}{\alpha}$, в то время как должно быть $B=0$. Вместе с тем,

именно в области малых значений H имеет место максимальная величина $\frac{d\psi}{dt}$, а значит и максимальное значение $E_{2м}$. Вследствие этого использование такого способа замены кривой намагничивания при определении амплитуды вторичной э. д. с. является принципиально ошибочным.

Л. А. Бессонов [4] находит амплитуду вторичной э. д. с. пиктрансформатора, работающего при синусоидальном токе, путем замены кривой намагничивания функцией

$$B = \frac{1}{\beta} \operatorname{Arsh} \frac{H}{\alpha}. \quad (4)$$

Тогда вторичная э. д. с. равна:

$$e_2 = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\omega_2 q \omega 10^{-8}}{\beta} \cdot \frac{H_m}{\alpha} \frac{\cos \omega t}{\sqrt{1 + \frac{H_m^2}{\alpha^2} \sin^2 \omega t}}.$$

Автор полагает, что $e_2 = E_{2м}$ при $t=0$, т. е.

$$E_{2м} = \frac{\omega_2 q \omega H_m 10^{-8}}{\beta \alpha}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что зависимость $e_{2м} = f(a\omega_m)$ должна быть линейной.

На рис. 3 эта зависимость изображена прямой 3. В современных трансформаторах тока значение амплитуды удельной намагничивающей силы может достигать $a\omega_m \cong 700$ ампер-витков/см при коротких замыканиях в первичной цепи. Из рис. 3 следует, что при этом значении $e_{2м}$ могут достигать (80—100) в/витков·см². Следовательно, произведение переменных параметров должно быть:

$$q\omega_2 \leq (10-12) \text{ витков} \cdot \text{см}^2,$$

что совершенно недопустимо. Поэтому трансформаторы тока для работы с разомкнутой вторичной обмоткой во многих случаях было бы невозможно выполнить без применения специальных материалов или изменения конструкции.

Однако найденная опытным путем в эксплуатационных условиях таблица значений функции $E_{2м} = f(I_{1м})$ [1], а также результаты опыта, представленные кривой 1 на рис. 3, свидетельствуют о нелинейности рассматриваемой функции. Отсюда следует, что либо неправильно проведен опыт, либо при выводе выражения (5) допущена какая-то существенная погрешность.

Особое недоверие вызывает возможность существования строго синусоидальной намагничивающей силы в данном опыте. Отклонение формы намагничивающей силы от синусоидальной может вызвать существенное изменение величины $e_{2м}$, так как e_2 имеет резко пиковый характер (11-я гармоника содержится лишь в немного меньшем коли-

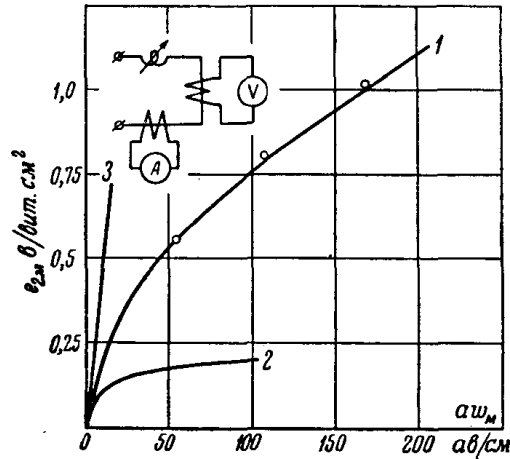


Рис. 3.

честве, чем первая). Несинусоидальность намагничивающей силы может быть обусловлена несинусоидальностью первичного тока вследствие нелинейности сопротивления трансформатора тока, а также наличия вторичного несинусоидального тока, потребляемого вольтметром.

В опыте учитывалась возможность влияния этих факторов. Поэтому в качестве измерительного прибора был принят электронный вольтметр. Регулировка тока производилась при помощи мощного дросселя с регулируемым воздушным зазором, а сечение сердечника трансформатора тока было $q = 0,875 \text{ см}^2$ при $w_1 = 182$ витка. При этом, однако, сопротивление трансформатора, обусловленное максимальным значением динамической магнитной проницаемости, $\omega M_{\partial m}$ достигало 10% от общего индуктивного сопротивления цепи при значительных $a\omega_m$. Тем не менее, при малых $a\omega_m$ отклонение рассматриваемой зависимости от линейной также наблюдается, хотя и в меньшей мере. Кроме того, упомянутые выше данные из [1] относятся к трансформатору с $w_1 = 1$, вследствие чего влияние трансформатора на первичную цепь было, несомненно, ничтожным. Поэтому отклонение рассматриваемой зависимости от линейной нельзя объяснить только искажением формы первичного тока.

Для выяснения истинного характера зависимости $e_{2m} = f(a\omega_m)$ необходимо показать, что уравнение (5) не учитывает какой-то фактор, который и определяет отклонение ее от линейной. При выводе уравнения (5) не учтено явление гистерезиса. Для оценки влияния этого фактора на результат найдем E_{2m} без помощи аппроксимации кривой намагничивания:

$$e_2 = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\phi}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt} = -\omega M_{\partial} I_{1m} \cos \omega t, \quad (6)$$

так как $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$. Амплитудное значение вторичной э. д. с. будет наблюдаться приблизительно при $t = 0$, когда динамическая магнитная проницаемость принимает свое максимальное значение, т. е. $M_{\partial} = M_{\partial m}$. Тогда

$$E_{2m} = \omega M_{\partial m} I_{1m}. \quad (7)$$

Для доказательства последнего исследуем выражение (6) на максимум, что обнаруживает следующее условие существования максимального значения вторичной э. д. с.:

$$t_m = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{\omega M_{\partial}}{\sqrt{\left(\frac{dM_{\partial}}{dt}\right)^2 + (\omega M_{\partial})^2}}. \quad (8)$$

Выражение (8) показывает, что, строго говоря, $t_m \neq 0$, так как это было бы возможно только при совпадении во времени моментов $i_1 = 0$ (поскольку $t = 0$) и $M_{\partial} = M_{\partial m}$ (так как $\frac{dM_{\partial}}{dt} = 0$). Последнее условие невыполнимо в силу наличия гистерезиса.

На рис. 4 приведено графическое построение сомножителей выражения (7). Из этого построения следует, что $t_m \leq t_s$, где t_s — время, определяемое гистерезисным углом φ_s . Ввиду малости φ_s при высоких индукциях можно полагать $\cos \omega t_m \cong 1$.

Таким образом, поскольку величина $\mu_{\partial m}$ есть константа для данного сорта стали, идентичность выражений (7) и (5) вполне очевидна. Следовательно, учет явления гистерезиса не может обусловить отклонение зависимости $e_{2m} = f(a\omega_m)$ от линейной. Поэтому остается лишь предположить, что при синусоидальном первичном токе намагничивающая сила не является синусоидальной.

На рис. 5 цифрами 1 и 2 помечены кривые намагничивания, снятые при синусоидальном намагничивающем токе, двух одинаковых по раз-

мерам листовых сердечников трансформаторов тока. Первый из них набран из стали с толщиной листа 0,5 мм, а второй—0,35 мм. Цифрами 1' и 2' обозначены зависимости $e_{2м} = f(aw_m)$, определенные для этих трансформаторов. Несмотря на то, что качество стали сердечника первого образца значительно выше, чем у второго, кривая 2' значительно

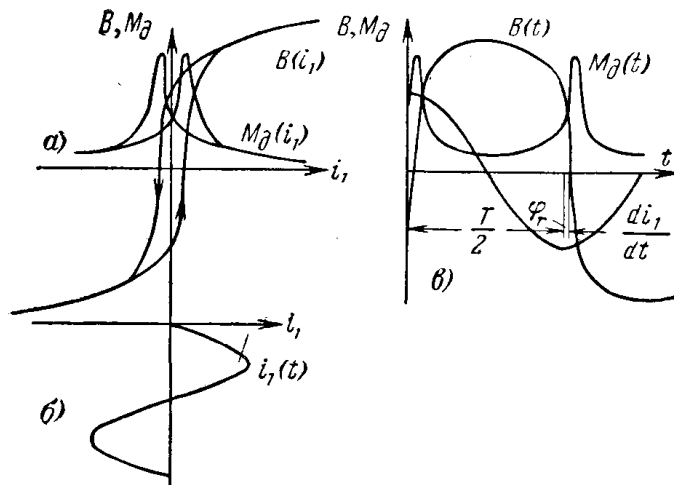


Рис. 4.

меньше отличается от прямой, чем кривая 1'. Вследствие этого значения $e_{2м}$ первого образца превышают соответствующие значения второго образца только при малых aw_m . Поскольку первый образец отличается от второго увеличенными вихревыми токами в сердечнике, можно предположить, что решающее влияние на характер зависимости $e_{2м} = f(aw_m)$ оказывают именно вихревые токи.

Это предположение подтверждается следующим опытом. На рис. 6, а и в приведены фотографии петель гистерезиса того же сердечника, который был использован в двух предыдущих опытах (толщина листа 0,35 мм) при удельной намагничивающей силе $aw_m = 11,8$ ампер-витков/см и $aw_m = 27$ ампер-витков/см соответственно. Можно было бы ожидать, что максимальные значения $\frac{dB}{dH}$ в обоих случаях будут одинаковыми,

поскольку максимальная величина динамической магнитной проницаемости есть константа данной стали. Однако эти значения оказались пропорциональными 7,5 и 5,5 соответственно¹. Такой результат не мог получиться за счет влияния несинусоидальной намагничивающей силы вторичной обмотки или за счет несинусоидальности первичного тока. В самом деле, амплитудное значение намагничивающей силы вторичной обмотки не превышало 0,04 ампер-витков/см, а несинусоидальность первичного

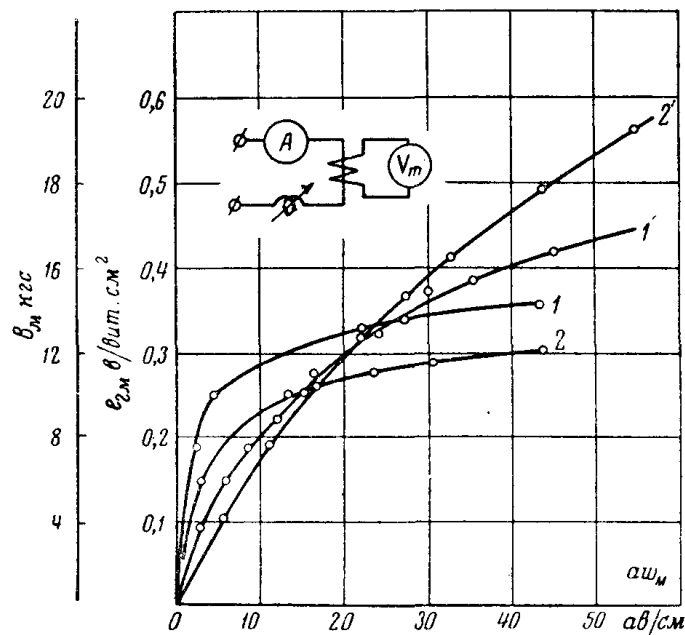


Рис. 5.

тока не может влиять на форму петли гистерезиса вообще, так как петли гистерезиса сфотографированы с экрана электронного осцил-

¹ Имеется в виду определение значения $\frac{dB}{dH}$ путем замера тангенса угла наклона касательной к петле гистерезиса.

лоскопа, включенного по обычной схеме с R и C . Любое изменение формы сигнала на отклоняющей системе намагничивающей силы вызовет согласованное через посредство петли гистерезиса изменение формы сигнала на отклоняющей системе потока, так что форма петли гистерезиса останется неизменной. Но шунт первичного тока не обтекается вихревыми токами. Поэтому, не влияя на форму и величину первичной намагничивающей силы, вихревые токи как-то воздействуют на результирующую намагничивающую силу, равную разности намагничивающей силы первичной обмотки и намагничивающей силы вихревых токов, вызывая искажение сигнала потока. Эти рассуждения подтверждаются результатами следующего опыта. На сердечник, использованный в предыдущем опыте, была нанесена дополнительная обмотка, замкнутая на активное сопротивление. Наличие тока в этой обмотке равносильно (с точки зрения влияния на форму петли гистерезиса) увеличению вихревых токов. Осциллограммы петли гистерезиса, снятые при таких условиях и $a\omega_m = 11,8$ ампер-витка/см и $a\omega_m = 27$ ампер-витков/см, представлены на рис. 6, б и г соответственно. Из осциллограмм видно, что максимальное значение $\frac{dB}{dH}$ при наличии такого тока в добавочной обмотке, при котором удельная намагничивающая сила дополнительной обмотки $a\omega_3 = 0,15$ ампер-витка/см эффективных, снизилось до 5,5 и 4 соответственно, а значения e_{2m} оказались равными 0,152 в/витков·см² и 0,26 в/витков·см², в то время как согласно кривой 2 рис. 5 при $a\omega_3 = 0$ эти значения были 0,191 в/витков·см² и 0,37 в/витков·см².

Обращает на себя внимание еще одна деталь, которая указывает на тесную связь вихревых токов с характером зависимости $e_{2m} = f(a\omega_m)$ через посредство формы петли гистерезиса. Изменение величины e_{2m}

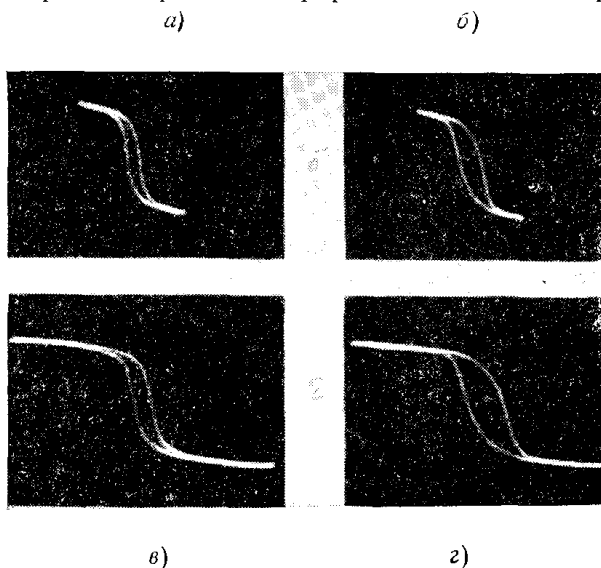


Рис. 6.

приблизительно соответствует изменению максимального значения $\frac{dB}{dH}$. В самом де-

ле, при возрастании первичного тока в 2,3 раза (случай $a\omega_3 = 0$) максимальное значение $\frac{dB}{dH}$ уменьшается в 1,36 раза. Поэтому следовало бы ожидать возрастание e_{2m} в $2,3 : 1,36 \cong 1,7$ раза, в то время как в действительности e_{2m} возрастает в 1,93 раза. Аналогично при включении добавочной обмотки и $a\omega_m = 11,8$ ампер-витка/см e_{2m} должна уменьшиться в $7,5 : 5,5 = 1,36$ раза, а умень-

шилась в $0,191 : 0,152 = 1,25$ раза. При $a\omega_m = 27$ ампер-витков/см должно быть—в $5,5 : 4 \cong 1,37$ раза, а имеется—в $0,37 : 0,26 = 1,42$ раза.

Несмотря на все сказанное, остается неясным, каким образом весьма незначительная намагничивающая сила вихревых токов может в такой большой мере снизить значение e_{2m} . Дело в том, что вихревые токи будут иметь форму и фазу э. д. с. e_2 , поскольку сопротивления контуров вихревых токов являются активными, а сами токи вызываются э. д. с., наведенными тем же потоком, что и e_2 . Это означает, что при весьма небольших действующих значениях амплитуда намагничивающей силы вихревых токов будет достаточно велика, чтобы исказить

форму результирующей намагничивающей силы трансформатора тока. Вместе с тем, моменты наступления максимумов намагничивающей силы вихревых токов и э. д. с. e_2 совпадают, т. е. наибольшее искажение результирующей намагничивающей силы произойдет как раз в момент наступления максимума э. д. с. e_2 . Такое объяснение полностью подтверждается опытом, результатом которого явились осциллограммы, приведенные на рис. 7. Опыт проводился с тем же образцом, что и предыдущий.

Кривые 1 отражают изменение во времени намагничивающей силы трансформатора тока с учетом влияния вихревых токов, имитируемых цепью добавочной обмотки с числом витков $w_3=91$. Для этого шунт шлейфа, записывающего эти кривые, включен на разность токов $i_1 - i_3$, причем $w_1=w_3$. Кривые 2 записаны высокочувствительным шлейфом, включенным на отдельную обмотку с числом витков $w_2=20$, и показывают форму э. д. с. e_2 . Осциллограмма б рис. 7 записана при $I_1=5$ а и намагничивающей силы, имитирующей вихревые токи, $Iw_3=20$ ампер-витков, а осциллограмма а снята при тех же условиях, но при $Iw_3=0$. На кривой 1 осциллограммы б ясно видно, что при $e_2=E_{2м}$, форма намагничивающей силы резко искажается, причем в другие моменты времени это искажение отсутствует. При $I_3=0$ намагничивающая сила чисто синусоидальна (см. осциллограмму а рис. 7). Следовательно, искажение формы кривой намагничивающей силы вызвано протеканием вихревого тока I_3 . В результате этого величина $E_{2м}$ при $I_3=0$ в 1,45 раз больше, чем при $Iw_3=20$ ампер-витков.

Описанные выше опыты показывают, что нелинейная зависимость между амплитудой вторичной э. д. с. и первичным синусоидальным током, приведенная в [1], а также полученная в опытах автора, является вполне закономерной.

Благодаря наличию вихревых токов в сердечнике трансформаторов тока зависимость $e_{2м} = f(aw_m)$ не может быть линейной.

Поскольку рассмотренные выше методы расчета $E_{2м}$ не дают удовлетворительных результатов, для расчета параметров трансформаторов тока следует пользоваться зависимостью $e_{2м} = f(aw_m)$, определенной опытным путем при синусоидальном первичном токе. При этом следует иметь в виду, что такие зависимости будут отличаться друг от друга не только для сердечников, изготовленных из сталей разных марок, но и для сердечников, изготовленных из стали разной толщины или для сердечников различных типов (листовые, спиральные).

Следует отметить также, что даже при листовых сердечниках из стали 0,35 мм значения $e_{2м}$ не превосходят (2—2,5) в/витков·см² при aw_m до 400 ампер-витков/см. Поэтому при наибольших возможных для генераторов токах внешних коротких замыканий максимально допустимая величина произведения qw_2 будет не менее (250—300) витков·см². Такая величина произведения искомых параметров не составит препятствий при изготовлении трансформаторов тока для дифференциальной защиты генераторов.

При конструировании трансформаторов тока для работы с разомкнутой вторичной обмоткой достижение допустимых значений $E_{2м}$ желательно производить, в первую очередь, за счет уменьшения q , так как при этом уменьшается не только $E_{2м}$, но и межвитковые напряжения и снижается температура сердечника, что приводит к повышению надежности работы трансформатора тока.

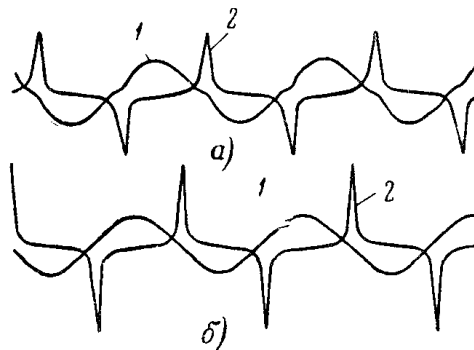


Рис. 7.

Итак, трансформаторы тока, предназначенные для длительной работы с разомкнутой вторичной обмоткой, могут быть изготовлены для установки на любых генераторах. При этом сечение спиральных сердечников не должно превосходить $17,5 \text{ см}^2$, а вторичная обмотка при $I_n \geq 4000 \text{ а}$ должна изготавливаться проводом марки ПСД. При меньших значениях I_n , а также при листовых сердечниках допустимо применение провода марки ПДА. Некоторое удорожание обмоточного провода значительно перекрывается уменьшением величин q и w_2 , благодаря чему такие трансформаторы тока будут значительно дешевле трансформаторов тока класса Д. Расход стали и меди сокращается приблизительно в 5—10 раз.

Литература

1. Городецкий С. С., Измерения на высоком напряжении, Энергоиздат, 1934.
 2. Казарновский Л. Ш., Влияние нагрева на электромагнитные свойства листовых электротехнических сталей, «Вестник электропромышленности», 1955, № 3.
 3. Воскресенский А. А., Уравнения гармонических сложной кривой тока в цепи с железом, «Электричество», 1948, № 1.
 4. Бессонов Л. А., Электрические цепи со сталью, Госэнергоиздат, 1948.
-