

УДК 621.316.7

DOI:10.17213/0136-3360-2020-4-70-76

## РАСЧЁТ МИНИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПРИ АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ С ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ

А.Д. Рыбалкин, В.И. Нагай, А.Н. Иванченко, Д.А. Рыбалкин

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова.  
Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

*При расчёте времени насыщения трансформаторов тока (ТТ) принято принимать фазу тока короткого замыкания (ТКЗ) такой, при которой значение аperiodической составляющей максимально. Считалось, что при соблюдении этого условия время насыщения минимально, то есть имеет место так называемый «тяжёлый режим работы для релейной защиты и автоматики (РЗА)». Однако теоретического обоснования этого положения представлено не было. Проведённый анализ показал, что такой выбор фазы короткого замыкания не обеспечивает минимальное значение времени насыщения ТТ в случае, если насыщение происходит в первом периоде протекания ТКЗ. Авторами представлены результаты, уточняющие количественные оценки времени насыщения с позиции наиболее тяжёлого режима работы для релейной защиты и автоматики. Как показали исследования, минимальное время насыщения ТТ, а следовательно, и наиболее тяжёлый режим работы РЗА могут иметь место и при других фазах тока короткого замыкания. Последнее обстоятельство важно при проектировании РЗА и выборе нагрузки на ТТ.*

**Ключевые слова:** измерительный трансформатор тока, намагничивающий ток, время насыщения, погрешность, фаза короткого замыкания.

**Для цитирования:** Рыбалкин А.Д., Нагай В.И., Иванченко А.Н., Рыбалкин Д.А. Расчёт минимального времени насыщения трансформатора тока с прямоугольной характеристикой намагничивания при активно-индуктивной нагрузке с программной реализацией // Изв. вузов. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 4. С. 70-76. DOI:10.17213/0136-3360-2020-4-70-76.

**Т**РАНСФОРМАТОРЫ тока (ТТ) – один из основных источников информации для устройств релейной защиты (УРЗ) электроэнергетических систем. Современная релейная защита (РЗ) должна обладать высоким быстродействием (временем срабатывания) – около одного периода промышленной частоты. Обеспечение селективности и чувствительности при этом представляет сложную проблему, решение которой невозможно без детального анализа переходных процессов в сети и вторичных цепях. Так как датчиками информации о токах в электроэнергетических системах являются ТТ, то требование об обеспечении достаточной точности (погрешности не более допустимой) является в настоящее время актуальным, причём, как в установившемся, так и в переходном режимах.

Периодическая составляющая первичного тока ТТ при коротком замыкании (КЗ) может в десятки раз превышать величину вынужденной составляющей тока нагрузки. При этом в условиях отсутствия свободных составляющих полная погрешность не должна превышать 5 или 10 %. Соблюдение этого условия достигается за счёт выбора нагрузки на ТТ.

В условиях эксплуатации отмечены случаи насыщения сердечников ТТ при правильно выбранной нагрузке, причиной которых явилось наличие в токе КЗ свободных аperiodических составляющих [1]. В [2] отмечено, что ТТ даже с закороченной вторичной обмоткой насыщаются при наличии в первичном токе КЗ аperiodических составляющих. Следовательно, требуется уметь определять время насыщения сердечника

ТТ, причём, в таком режиме, при котором это время минимально.

В известных российских<sup>1</sup> [2, 3] и зарубежных источниках [4 – 6] при расчёте времени насыщения трансформатора тока (ТТ) принята такая фаза тока короткого замыкания, при которой содержание аperiodической составляющей в токе КЗ максимально.

То есть для тока короткого замыкания

$$i_1(t) = I_{1\max} (\cos \varphi e^{\frac{-t}{T_1}} - \cos(\omega t + \varphi)), \quad (1)$$

где  $I_{1\max}$  – амплитуда вынужденной составляющей тока КЗ;  $\varphi$  – фаза короткого замыкания;  $T_1$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей первичной цепи;  $\omega$  – круговая частота вынужденной составляющей, принято считать  $\varphi = 0$ .

Считается, что при такой фазе время насыщения минимально. Однако это требует теоретического подтверждения, что и является целью настоящей работы.

В [7] введено понятие «тяжёлый переходной режим КЗ для релейной защиты». Здесь понимается такой переходной режим КЗ, при котором насыщение ТТ так искажает характеристики вторичного тока ТТ, что РЗ не срабатывает (или срабатывает с задержкой) при КЗ в зоне и срабатывает при КЗ вне зоны. Для количественной характеристики этого режима рекомендовано применять следующие параметры:

- относительное содержание аperiodической составляющей в токе КЗ;
- величина постоянной времени затухания первичной сети;
- кратность тока короткого замыкания (КЗ);
- величина и характер нагрузки;
- величина и знак остаточной индукции.

В [7] рекомендовано считать режим тяжёлым при обязательном содержании аperiodической составляющей не менее 0,5 от максимально возможного значения. При невыполнении этого условия режим относить к числу тяжёлых не рекомендуется. Такое содержание аperiodической составляющей возможно при фазе тока КЗ от 0 до  $\varphi = \pi/3$ . Следовательно, при других фазах КЗ режим можно не относить к тяжёлым.

Можно отметить, что чем меньше время насыщения ТТ, тем тяжелее условия для правильной работы РЗ. Авторами поставлена задача

исследования времени насыщения в диапазоне фаз токов 30 – 180 град, так как в этом случае при определённых обстоятельствах могут возникнуть тяжёлые условия для работы ТТ и его насыщения.

Под временем насыщения  $t_s$  понимается момент времени, при наступлении которого индукция в сердечнике достигает величины насыщения  $B_s$ . При достижении момента насыщения характер изменения вторичного тока зависит от характера нагрузки. При применении для расчёта характеристик вторичного тока средств вычислительной техники целесообразно выбирать метод расчёта в соответствии с рекомендациями [8]. Важным также является выбор вида аппроксимации кривой намагничивания [9]. В настоящее время наиболее широко применяется аппроксимация кривой намагничивания при расчёте времени насыщения с достаточной для практики погрешностью в форме прямоугольной характеристики намагничивания (ПХН) [10, 11].

В этом случае при активной нагрузке вторичный ток от величины в момент времени  $t_s^-$ , непосредственно перед насыщением, то есть от величины  $i_1(t_s^-)w_1/w_2$ , изменяется до нуля в момент времени непосредственно после насыщения. То есть в математической модели вторичного тока при активной нагрузке имеет место разрыв первого рода. При индуктивной нагрузке вторичный ток, достигнув указанной величины в момент времени непосредственно перед насыщением, не изменяется до момента выхода из насыщения [12]. В случае активно-индуктивной нагрузки вторичный ток после достижения величины индукции насыщения затухает по экспоненциальному закону.

Для расчёта индукции в сердечнике ТТ в любой момент времени  $t$  применим формулу

$$B(t) - B_r = \frac{1}{w_2 S} \left[ r_2 \int_0^t i_2(t) dt + L_2 i_2(t) \right], \quad (2)$$

где  $B(t)$  – индукция в момент времени  $t$ ;  $B_r$  – остаточная индукция;  $w_2$  – число витков вторичной обмотки;  $S$  – сечение стали;  $r_2$  – сумма активных сопротивлений нагрузки и вторичной обмотки;  $L_2$  – сумма индуктивностей нагрузки и вторичной обмотки.

Тогда составляющая индукции, обусловленная наличием активного сопротивления в составе нагрузки, вычисляется по формуле [11]

$$B_{\text{акт}}(t) = \frac{r_2}{w_2 S} \int_0^t i_2(t) dt + B_r.$$

<sup>1</sup> Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока. ПНСТ 283-2018 ОКС 17.220.20, ОКПД 2 27.11.4. Срок действия с 2019-01-01 по 2022-01-01.

Составляющая индукции, обусловленная наличием индуктивного сопротивления в составе нагрузки, вычисляется по формуле

$$B_{\text{инд}}(t) = \frac{L_2}{w_2 S} i_2(t) = \frac{X_2}{\omega w_2 S} i_2(t).$$

Так как  $R = Z \cos \varphi_{\text{нг}}$ , а  $X = Z \sin \varphi_{\text{нг}}$ , то с целью снижения размерности задачи введем коэффициент

$$\gamma = \frac{\sqrt{2} I_{\text{норм}} K}{K_{\text{ТТ}}} \frac{Z}{S w_2 \omega}, \quad (3)$$

где  $K$  – кратность тока КЗ;  $I_1$  – действующее значение вынужденной составляющей тока КЗ;  $K_{\text{ТТ}}$  – коэффициент трансформации ТТ;  $Z$  – модуль сопротивления нагрузки;  $\varphi_{\text{нг}}$  – аргумент сопротивления нагрузки ТТ.

Численно этот коэффициент совпадает с максимальным значением индукции в сердечнике ТТ при отсутствии в токе КЗ свободных составляющих и чисто активном характере вторичной цепи.

Заменив в формуле (2)  $B(t)$  на  $B_s$ , получим

$$B_s - B_r = \frac{1}{w_2 S} \left[ r_2 \int_0^t i_2(t) dt + L_2 i_2(t) \right], \quad (4)$$

где для расчёта времени насыщения достаточно задать следующие величины:  $B_s, B_r, w_2, S, r_2, L_2$ , а также вторичный ток  $i_2(t)$ . Вид уравнения (2) существенно зависит от вида вторичного тока  $i_2(t)$ , следовательно, и выбор метода решения этого уравнения.

Для тока КЗ примем формулу (1). Подставляя (1) в (4), можно отметить, что полученное уравнение является трансцендентным, следовательно, оно может быть решено только численным методом.

С целью упрощения дальнейшего анализа рассмотрим составляющие индукции и их влияние на результат раздельно. Для составляющей индукции, обусловленной наличием активной составляющей нагрузки, имеем:

$$\frac{(B_{\text{акт}}(t) - B_r)}{\gamma} = \cos \varphi_{\text{нг}} \left[ \omega T_1 (1 - e^{-\frac{t_s}{T_1}}) \right] \cos \varphi + \sin \varphi - \sin(\omega t_s + \varphi), \quad (5)$$

где  $B_* = (B_s - B_r) / \gamma$ .

Для определения фазы тока КЗ (обозначим  $\xi$ ), при которой имеет место минимальное значение

времени насыщения, необходимо правую часть (5) продифференцировать по  $t_s$  и приравнять нулю. Получим:

$$\text{ctg} \xi = \frac{\omega T_1 (1 - e^{-\frac{t_s}{T_1}}) - \sin \omega t_s}{1 - \cos \omega t_s}. \quad (6)$$

При  $T_1 \rightarrow \infty$  формула (6) приобретает вид

$$\text{ctg} \xi = \frac{-\sin(\omega t_s)}{1 - \cos \omega t_s}.$$

При  $t_s \rightarrow 0$  имеет место неопределённость  $0/0$ , раскрывая которую, получим:  $\xi = \pi / 2$ .

Результаты расчёта  $\xi$  по формуле (6) для различных постоянных времени приведены на рис. 1.

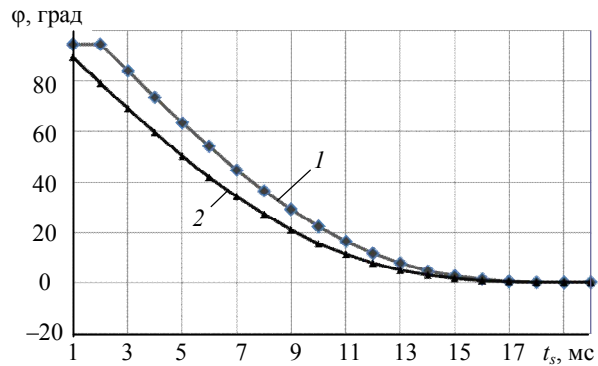


Рис. 1. Зависимость фазы тока короткого замыкания, при которой время насыщения минимально от времени насыщения при  $\cos \varphi_{\text{нг}} = 1$ : 1 –  $T_1 = 0,02$  с; 2 –  $T_1 = 999$  с

Из рисунка видно, что рассматриваемая фаза изменяется от 90 град при  $t_s = 0$  до нуля при  $t_s = 20$  мс.

Полученные значения фазы были подставлены в формулу (5) и вычислены значения  $t_s$  в зависимости от  $B_*$  при различных значениях  $T_1$  (рис. 2).

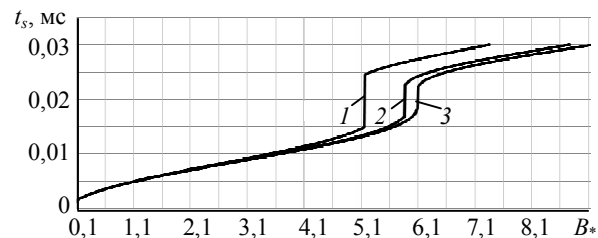


Рис. 2. Зависимость времени насыщения ТТ для разных постоянных времени затухания аperiodической составляющей в зависимости от величины  $B_*$  при активной нагрузке: 1 –  $T_1 = 0,02$  с; 2 –  $T_1 = 0,15$  с; 3 –  $T_1 = 0,3$  с

Отметим, что в кривых, приведённых на рис. 2, присутствуют разрывы первого рода, что ранее не отмечалось. Причиной этого разрыва является то обстоятельство, что на участках, где

индукция уменьшается, не может иметь место насыщение сердечника ТТ. Оно наблюдается только в случае возрастания индукции.

Сравним результаты, полученные при фазе  $\xi$ , определённой по рис. 1, с результатами, полученными при фазе  $\varphi$ , равной 0.

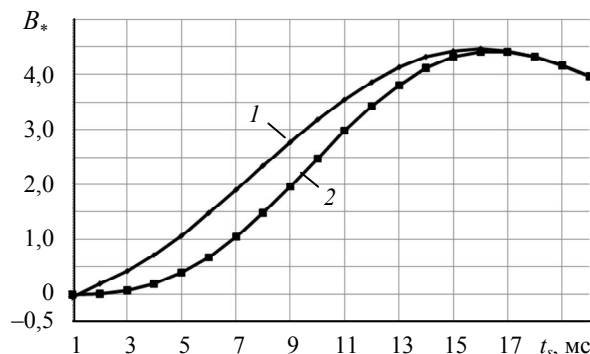


Рис. 3. Сравнение результатов расчёта: 1 – расчёт при фазе  $\xi$ , определённой по рис. 1; 2 – расчёт при фазе  $\varphi$ , равной 0

Из рис. 3 видно, что при  $B_* = 0,417$  время насыщения при расчёте по формуле (6) равно 3 мс (кривая 1), а по методике из [10] 5,2 мс (кривая 2), а при  $B_* = 1$  соответственно 4,9 мс (кривая 1) и 7 мс (кривая 2). То есть погрешность  $\Delta_s$  равна 73 и 42,8 % (рис. 4).

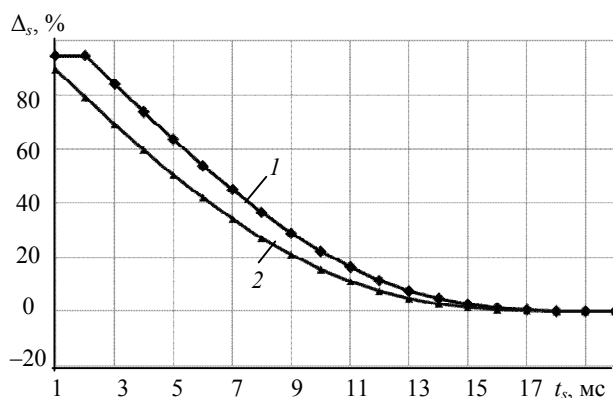


Рис. 4. Зависимость величины относительной погрешности: 1 –  $T_1 = 0,02$  с; 2 –  $T_1 = 999$  с

На рис. 4 приведена зависимость величины погрешности расчёта времени насыщения ТТ. Из этого рисунка видно, что величина постоянной времени затухания первичного тока слабо влияет на величину погрешности, и её влияние ослабевает по мере увеличения времени насыщения.

Аналогично для составляющей индукции, обусловленной наличием индуктивного сопротивления в составе нагрузки, имеем:

$$B_{\text{инд}}(t) = \gamma \sin \varphi_{\text{нр}} \left( e^{\frac{-t}{T_1}} \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \right). \quad (7)$$

Для определения фазы тока КЗ, при которой имеет место минимальное значение времени насыщения, необходимо правую часть (7) продифференцировать по  $t_s$  и приравнять нулю.

Раскрывая косинус суммы двух углов, получим:

$$\Delta_* = \left[ \cos \varphi \left( e^{\frac{-t_s}{T_1}} - \cos \omega t_s \right) + \sin \varphi \sin(\omega t_s) \right] \rightarrow \max, \quad (8)$$

где  $\Delta_*$  – относительное значение индукции, при котором достигается минимальное значение времени насыщения.

Для определения значения  $\varphi$ , при котором (8) максимально, возьмём производную по  $\varphi$  и приравняем это условие нулю:

$$\text{ctg} \xi = \frac{e^{\frac{-t_s}{T_1}} - \cos(\omega t_s)}{\sin(\omega t_s)}. \quad (9)$$

При  $T_1 \rightarrow \infty$  формула (8) приобретает вид

$$\text{ctg} \xi = \frac{1 - \cos(\omega t_s)}{\sin(\omega t_s)}.$$

При  $t_s \rightarrow 0$  имеет место неопределённость 0/0, раскрывая которую, получим:  $\xi = \pi / 2$ .

Аналогично формулам (6) и (9) имеем:

$$\text{ctg} \xi = \left[ \sin \varphi_{\text{нр}} \sin(\omega t_s) - \cos \varphi_{\text{нр}} (1 - \cos(\omega t_s)) \right] \times \left[ \cos \varphi_{\text{нр}} \left( (1 - e^{\frac{-t_s}{T_1}}) - \sin \omega t_s \right) + \sin \varphi_{\text{нр}} \left( e^{\frac{-t_s}{T_1}} - \cos(\omega t_s) \right) \right]^{-1}$$

Уравнение для расчёта времени насыщения сердечника ТТ при активно-индуктивной нагрузке запишем в виде

$$\frac{(B_s(t) - B_r)}{\gamma} = \cos \varphi_{\text{нр}} \left[ \omega T_1 (1 - e^{\frac{-t_s}{T_1}}) \cos \varphi + \sin \varphi - \sin(\omega t_s + \varphi) \right] + \sin \varphi_{\text{нр}} \left( e^{\frac{-t}{T_1}} \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \right). \quad (10)$$

Зависимости времени насыщения ТТ согласно (10) для различных значений постоянных времени приведены на рис. 5.

Сравнив результаты по рис. 2 и рис. 5, можно отметить, что если не учитывать индуктивную составляющую нагрузки, это приводит к занижению времени насыщения. Так, для  $B_* = 4,1$  при  $T_1 = 0,02$  с имеем соответственно 0,0114 с и 0,0274 с. Для  $B_* = 4,9$  при  $T_1 = 0,3$  с имеем соответственно 0,0139 с и 0,0237 с. В первом случае занижение на 0,016 с или на 140 %, а во втором – на 0,098 с или на 70 %. В свою очередь такой подход приводит к необходимости увеличивать сечение кабеля токовых цепей релейной защиты.

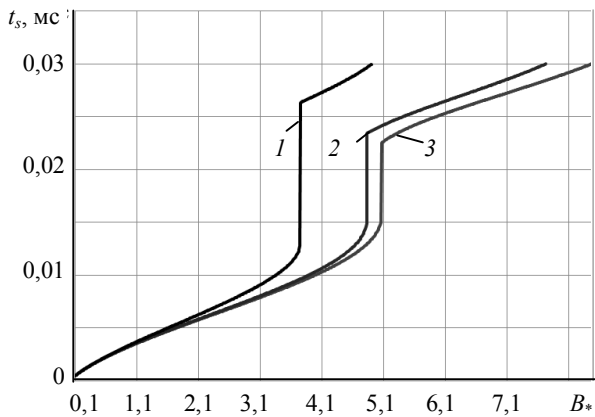


Рис. 5. Зависимость времени насыщения ТТ для разных постоянных времени затухания апериодической составляющей в зависимости от величины  $B_*$  при активно-индуктивной нагрузке и  $\cos \varphi_{\text{нр}} = 0,8$ : 1 –  $T_1 = 0,02$  с; 2 –  $T_1 = 0,1$  с; 3 –  $T_1 = 0,3$  с

### Пример

Для ТТ типа ТФНД-110М-600/5 [10] (индуктивное сопротивление вторичной обмотки равно 36,8 Ом) при  $I_{\text{ном}} = 600$  А,  $K_{\text{ном}} = 10$ ,  $Z_{\text{нагр}} = 3,3$  Ом,  $w_1 = 2$ ,  $w_2 = 239$ ,  $l = 90$  см,  $S = 19,1$  см<sup>2</sup>,  $I_{\text{КЗ}} = 6000$  А,  $T_1 = 0,1$  с имеем: по формуле (2)  $\gamma = 1,623$ ,  $B_* = (B_s - B_r) / \gamma$  при  $B_r = 0$ , значение равно  $B_* = 1,1$ , а при  $B_r = 1,0$  соответственно  $B_* = 0,4929$ . По рис. 2 имеем соответственно 0,00496 с и 0,00323 с. Сравнивая с результатами, полученными при использовании графиков «Универсальные характеристики ТТ с ПХН» [12, см. рис. 2], получаем 0,0072 с для первого случая и 0,0048 с для второго. То есть расхождение результатов составляет 45,1 % для первого случая и 48,6 % для второго. Следует также подчеркнуть, что оба результата из [12, см. рис. 2] больше, чем по кривым, приведённым в данной статье. Объясняется такое расхождение тем, что «Универсальные характеристики ТТ с ПХН» построены при фазах, не обеспечивающих минимальное значение времени насыщения.

### Программная реализация расчёта времени насыщения сердечника трансформатора тока

Для удобства вычислений запишем уравнение (10) в стандартном виде:

$$f(\varphi_1 t_s) = \cos \varphi_{\text{нр}} \left( \omega T_1 (1 - e^{-\frac{t_s}{T_1}}) \cos \varphi + \sin \varphi - \sin(\omega t_s + \varphi) \right) + \sin \varphi_{\text{нр}} \left( e^{-\frac{t_s}{T_1}} \cos \varphi - \cos(\omega t_s + \varphi) \right) - B_* = 0, \quad (11)$$

где  $B_* = (B_s - B_r) / \gamma$ .

Это трансцендентное уравнение с двумя неизвестными имеет бесконечное множество решений. Произвольный элемент этого множества можно получить, если задать конкретное зна-

чение для одной из неизвестных (например,  $\varphi$ ) и получить значение второй неизвестной (то есть  $t_s$ ) из (11), решая его подходящим численным методом как уравнение с одной неизвестной.

В нашем случае известен критерий выбора из множества наиболее подходящих решений – это минимум времени насыщения  $t_s$ . Алгоритм поиска этого решения достаточно очевиден: нужно организовать перебор значений  $\varphi$  с некоторым «разумным» шагом в допустимой области (например, перебирая  $\varphi$  от 0 до 90 градусов с шагом 0,5), вычисляя для каждого из них  $t_s$  (т.е. решая уравнение (11)) и запоминая минимальное из  $t_s$  и соответствующее ему  $\varphi$ .

Заметим, что в силу колебательного характера функции  $f(\varphi, t_s)$  целесообразно численный метод поиска корня (например, метод бисекции) «обернуть» в цикл, реализующий идею «скользящего окна».<sup>1</sup>

Подготовка исходных данных сводится к заполнению двух экранных форм. Необходимость в двух формах обусловлена наличием двух возможных вариантов расчёта:

– с предварительным вычислением индукции  $B_*$  (см. формулу (5)); при этом заполняются поля формы 1, нажимается кнопка «Выполнить расчёт» и вычисленное значение  $B_*$  появляется на форме 2. Далее на этой форме заполняются поля «Постоянная времени» и «Косинус угла нагрузки» и выполняется основной расчёт по нажатию кнопки «Выполнить расчёт»; результаты расчёта появляются в полях «Время насыщения» и «Угол»;

– с «ручным» заданием индукции  $B_*$  непосредственно на форме 2 (без использования формы 1), заполнением полей «Постоянная времени» и «Косинус угла нагрузки» и расчётом времени насыщения  $t_s$  и угла  $\varphi$  (по нажатию кнопки «Выполнить расчёт»).

### ВЫВОДЫ

1. Показано, что необходимо расширить диапазон углов токов короткого замыкания для расчета наихудшего режима ТТ с позиции его насыщения. Применение предложенной методики дает возможность уточнить время насыщения ТТ.

2. Не учёт индуктивной составляющей нагрузки трансформатора тока ведёт к занижению времени насыщения, что в свою очередь приводит к необходимости выбирать сечение кабеля заведомо большего диаметра.

3. Использование разработанной программы расчета времени насыщения ТТ снижает за-

<sup>1</sup>Для выполнения описанных выше расчётов авторами была разработана программа, размещённая в свободном доступе на интернет-сайте <http://ekra-adr.ru/wp/>

траты времени на проектирование и проверку функционирования релейной защиты в соответствии с современными требованиями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчёты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М.: Энергия, 1980. 207с.

2. Подгорный Э.В., Богдан А.В. Токовые интегральные характеристики трансформаторов тока в переходных режимах // Электричество. 1972. № 1. С. 18 – 24.

3. Кужеков С.Л., Золоев Б.П. Универсальные характеристики трансформаторов тока с прямоугольной характеристикой намагничивания при активно-индуктивной нагрузке в переходном режиме // Изв. вузов. Электромеханика. 1974. № 8. С. 24 – 27.

4. Zhihan Xu. Evaluation of CT Saturation Impact for Various 87L Applications (Published 2015) [Электронный ресурс] / ZhihanXu (GE Digital Energy), Matt Proctor (GE Digital Energy), Pia Voloh (GE Digital Energy), Mike Lara (SNC-Lavalin). Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-CT-Saturation-Impact-for-Variou-87-L-Xu-Proctor/eec8e6f858acf0e4946f0743a79068ab9713e7ac> (дата обращения: 15/01/2020).

5. Wijayarala, W.D.A.S. Current Transformer Performance during Transient Conditions and the Development of a Current Transformer Selection Criterion for Protection Applications [Электронный ресурс] / W.D.A.S. Wijayarala, J. Karunanayake, R.R.T.W.M.R.A.I. Madawala. Engineer – Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka 49(3):49 (August 2016) Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/307444696> Current Transformer Performance during Tran-

sient Conditions and the Development of a Current Transformer Selection Criterion for Protection Applications (дата обращения: 15/01/2020).

6. Hargrave, A. Beyond the Knee Point: A Practical Guide to CT Saturation [Электронный ресурс] / ArianaHargrave, Michael J. Thompson, and Brad Heilman. Режим доступа: [https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6811\\_BeyondKneePoint\\_AH\\_20190418\\_Web.pdf?v=20190418-200921](https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6811_BeyondKneePoint_AH_20190418_Web.pdf?v=20190418-200921) (дата обращения: 15/01/2020).

7. Вероятность возникновения больших погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах и оценка действия релейных защит / А.Д. Дроздов, В.А. Гармаш, М.А. Беркович, В.В. Ильиничин // Электричество. 1978. № 6. С. 24 – 29.

8. Богдан А.В., Золоев Б.П., Подгорный Э.В. Сравнение численных методов расчёта переходных процессов трансформаторов тока на ЦВМ // Изв. вузов. Электромеханика. № 2. 1974. С. 163 – 172.

9. Подгорный Э.В., Хлебников С.Д. О выборе расчётной характеристики намагничивания трансформаторов тока в переходных режимах // Электричество. 1966. № 9. С. 87 – 90.

10. Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярёв, В.С. Воробьёв, В.В. Москаленко // Электрические станции. № 1. 2017.

11. Рыбалкин А.Д., Малахов А.А. Расчет времени насыщения сердечника трансформатора тока для микропроцессорных устройств релейной защиты при трансформации тока короткого замыкания // Изв. вузов. Электромеханика. 2014. № 3. С. 155 – 157.

12. Дроздов А.Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. М-Л: Энергия, 1965.

**Рыбалкин Алексей Дмитриевич** – канд. техн. наук, доцент Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

**Нагай Владимир Иванович** – д-р техн. наук, профессор Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

**Иванченко Александр Николаевич** – канд. техн. наук, профессор Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

**Рыбалкин Дмитрий Алексеевич** – магистрант Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

*Поступила в редакцию*

*18 марта 2020 г.*

*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika  
(Russian Electromechanics)  
2020, vol. 63, no. 4, pp. 70-76*

## CALCULATION OF THE MINIMUM SATURATION TIME OF A CURRENT TRANSFORMER WITH A RECTANGULAR MAGNETIZATION CHARACTERISTIC AT AN ACTIVE-INDUCTIVE LOAD WITH SOFTWARE IMPLEMENTATION

**A.D. Rybalkin**, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). 132, Prosvescheniya Str., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation.

**V.I. Nagay**, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). 132, Prosvescheniya Str., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation.

**A.N. Ivanchenko**, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). 132, Prosvescheniya Str., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation.

**D.A. Rybalkin**, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). 132, Prosvescheniya Str., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation.

When calculating the saturation time of current transformers (CT), it is customary to take the phase of the short circuit current (TKZ) such that the value of the aperiodic component is maximum. It was believed that, subject to this condition, the saturation time is minimal, that is, the so-called "heavy duty for relay protection and automation (RPA)" takes place. However, no theoretical justification for this provision was provided. The analysis by the authors showed that such a choice of the short circuit phase does not provide the minimum value of the saturation time of the current transformer in the event that the saturation occurs in the first period of the TKZ. The authors found it possible to present their modest results, specifying quantitative estimates of the saturation time from the position of the most difficult operating mode for relay protection and automation. As shown by the research conducted by the authors, the minimum CT saturation time, and therefore the most severe relay protection mode, can occur with other phases of the short circuit current. The latter circumstance is important in the design of relay protection and automation and the choice of load on the CT.

**Key words:** measuring current transformer, magnetizing current, saturation time, error, short circuit phase.

**For citation:** Rybalkin A.D., Nagay V.I., Ivanchenko A.N., Rybalkin D.A. [Calculation of the Minimum Saturation Time of a Current Transformer with a Rectangular Magnetization Characteristic at an Active-Inductive Load with Software Implementation]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2020, vol. 63, no. 4, pp. 70-76. (In Russ.) DOI:10.17213/0136-3360-2020-4-70-76.

#### REFERENCES

1. Korolev E. P., Liberzon E. M. *Raschety dopustimyykh nagruzok v tokovykh tsepyakh releinoi zashchity* [Calculation of permissible loads in current circuits of relay protection]. Moscow: Energiya, 1980, 207p.
2. Podgorni E.V., Bogdan A.V. Tokovye integral'nye kharakteristiki transformatorov toka v perekhodnykh rezhimakh [Current integral characteristics of current transformers in transient conditions]. *Elektrichestvo*, 1972, no. 1, pp. 18-24. (In Russ.)
3. Kuzhekov S.L. i Zoloev B.P. Universal'nye kharakteristiki transformatorov toka s pryamougol'noi kharakteristikoi namagnichivaniya pri aktivno-induktivnoi nagruzke v perekhodnom rezhime [Universal characteristics of current transformers with a rectangular magnetization characteristic under active-inductive load in transient mode]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 1974, no. 8, pp. 24-27. (In Russ.)
4. ZhihanXu. Evaluation of CT Saturation Impact for Various 87L Applications (Published 2015) / ZhihanXu (GE Digital Energy), Matt Proctor (GE Digital Energy), Ilia Voloh (GE Digital Energy), Mike Lara (SNC-Lavalin). Available at: [https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-CT-Saturation-Impact-for-Various-87-L-Xu-Proctor/eec8e6f858\\_acf0e4946f0743a79068ab9713e7ac](https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-CT-Saturation-Impact-for-Various-87-L-Xu-Proctor/eec8e6f858_acf0e4946f0743a79068ab9713e7ac) (accessed 15.01.2020)
5. Wijayapala, W.D.A.S. Current Transformer Performance during Transient Conditions and the Development of a Current Transformer Selection Criterion for Protection Applications / W.D.A.S. Wijayapala, J. Karunanayake, R.R.T.W.M.R.A.I. Madawala. Engineer – Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka 49(3):49 (August 2016). Available at: <https://www.researchgate.net/publication/307444696> Current Transformer Performance during Transient Conditions and the Development of a Current Transformer Selection Criterion for Protection Applications (accessed 15.01.2020)
6. Hargrave, A. Beyond the Knee Point: A Practical Guide to CT Saturation/ ArianaHargrave, Michael J. Thompson, and Brad Heilman. Available at: [https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6811\\_BeyondKneePoint\\_AH\\_20190418\\_Web.pdf?v=20190418-200921](https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6811_BeyondKneePoint_AH_20190418_Web.pdf?v=20190418-200921) (accessed 15.01.2020)
7. Drozdov A.D., Garmash V.A., Berkovich M.A., Il'ichnin V.V. Veroyatnost' vozniknoveniya bol'shikh pogreshnostei transformatorov toka v perekhodnykh rezhimakh i otsenka deistviya releinykh zashchit [The likelihood of large errors in current transformers in transient conditions and the evaluation of relay protection]. *Elektrichestvo*, 1978, no. 6, pp. 24-29. (In Russ.)
8. Bogdan A.V., Zoloev B.P., Podgorni E.V. Sravnenie chislennykh metodov rascheta perekhodnykh protsessov transformatorov toka na TsVM [Comparison of numerical methods for calculating transients of current transformers on a digital computer]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 1974, no. 2, 1974, pp. 163-172. (In Russ.)
9. Podgorni Z.V., Khlebnikov S.D. O vybere raschetnoi kharakteristiki namagnichivaniya transformatorov toka v perekhodnykh rezhimakh [On the selection of the design characteristics of the magnetization of current transformers in transient conditions]. *Elektrichestvo*, 1966, no. 9, pp. 87-90. (In Russ.)
10. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Vorob'ev V.S. Moskalenko V.V. Opredelenie vremeni do nasyshcheniya transformatorov toka v perekhodnykh rezhimakh korotkikh замыканий [Determination of time before saturation of current transformers in transient conditions of short circuits]. *Elektricheskie stantsii*, 2017, no. 1. (In Russ.)
11. Rybalkin A.D., Malakhov A.A. Raschet vremeni nasyshcheniya serdechnika transformatora toka dlya mikroprotse-sornykh ustroystv releinoi zashchity pri transformatsii toka korotkogo замыканий [Calculation of the saturation time of the core of the current transformer for microprocessor relay protection devices during the transformation of short circuit current]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2014, no. 3, pp. 155-157. (In Russ.)
12. Drozdov A.D. *Elektricheskie tsepi s ferromagnitnymi serdechnikami v releinoi zashchite* [Electrical circuits with ferromagnetic cores in relay protection]. Moscow – Leningrad: Energiya, 1965.

*Information about the authors:*

**Aleksey D. Rybalkin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

**Vladimir I. Nagay**, Doctor of Technical Sciences, Professor.

**Alexander N. Ivanchenko**, Candidate of Technical Sciences, Professor.

**Dmitriy A. Rybalkin**, Undergraduate student.

*Received March 18, 2020*