

Тинина Людмила Павловна,
доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: tinina-lp@inbox.ru

Коновалов Юрий Васильевич,
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: yrvaskon@mail.ru

Истратов Роман Сергеевич,
обучающийся, Ангарский государственный технический университет
Величко Максим Александрович,
обучающийся, Ангарский государственный технический университет

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА УТОЧНЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАБОТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

Tinina L.P., Konovalov Yu.V., Istratov R.S., Velichko M.A.

**METHOD FOR CALCULATING THE REFINED CHARACTERISTICS
OF CURRENT TRANSFORMERS TO INCREASE THE EFFICIENCY
OF RELAY PROTECTION DEVICES**

Аннотация. Создана методика выбора технических характеристик трансформаторов тока и подключенных устройств релейной защиты, обеспечивающих надежность системы электроснабжения в соответствии с современными требованиями.

Ключевые слова: трансформаторы тока, переходный режим, время насыщения, апериодическая составляющая, таблично-графический метод, визуализация.

Abstract. A method has been developed for selecting the technical characteristics of current transformers and connected relay protection devices that ensure the reliability of the power supply system in accordance with modern requirements.

Keywords: current transformers, transient mode, saturation time, current, aperiodic component, tabular-graphical method, visualization.

С выходом нового предварительного национального стандарта ПНСТ 283 - 2018 «Трансформаторы измерительные. Часть 2 Технические условия на трансформаторы тока» [1] и ГОСТ Р58669 - 2019 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях» [2], появилась необходимость проведения расчетов уточненных характеристик трансформаторов тока (ТТ). Данные требования связаны с накоплением магнитного потока в магнитопроводе ТТ, ввиду отсутствия или малости тока обратной полярности. Это явление вызывает избыточную (неправильную) работу устройств РЗ, что может привести к крупным авариям с отключением большого числа потребителей электроэнергии.

Новые нормативные документы предусматривают выполнение предварительных расчетов времени до насыщения трансформаторов тока для быстродействующих устройств релейной защиты (РЗ) при строительстве и комплекс-

ном перевооружении объектов энергетики на этапе проектной документации [3]. Алгоритм, обеспечивающий правильное функционирование устройств РЗ при котором обеспечивается отключение короткого замыкания (КЗ) за время меньшее, чем рассчитанное время до насыщения ТТ, приведен в таблице 1.

Таблица 1

Алгоритм расчета

Величина	Расчетная формула с пояснениями
Сопrotивление фазы про- вода в токовых цепях	$R_{\text{пр}} = \frac{\rho \cdot l}{S}$ <p>где ρ – удельная проводимость меди, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}}{\text{м}}$; l – длина токовых цепей, м; S – сечение кабеля, мм^2.</p>
Сопrotивление фазы уст- ройства РЗ включенного в токовые цепи	$Z_{\text{рф}} = \frac{S_{\text{уст}}}{I_{2\text{НОМ}}^2}$ <p>где $S_{\text{уст}}$ – потребляемая мощность устройства РЗ на фазу, ВА; $I_{2\text{НОМ}}$ – номинальный вторичный ток, А.</p>
Номинальная нагрузка ТТ	$Z_{\text{н.НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}^2}$
Сопrotивление вторичной нагрузки с учётом микро- процессорных устройств и схемы соединения вто- ричных обмоток ТТ в «звезду» при трехфазном КЗ	$R_{\text{н.факт}} = \sum R_{\text{пр}}$ $X_{\text{н.факт}} = Z_{\text{рф}}$
Сопrotивление вторичной нагрузки с учётом микро- процессорных устройств и схемы соединения вто- ричных обмоток ТТ в «звезду» при однофазном КЗ	$R_{\text{н.факт}} = 2 \sum R_{\text{пр}}$ $X_{\text{н.факт}} = Z_{\text{рф}} + Z_{\text{р0}}$
Полное сопротивление ветви вторичного тока	$Z_{2\Sigma\text{НОМ}} = \sqrt{(R_2 + Z_{\text{н.НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{н.НОМ}})^2 + (X_2 + Z_{\text{н.НОМ}} \cdot \sin \varphi_{\text{н.НОМ}})^2}$ <p>где R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки ТТ; X_2 – реактивное сопротивление вторичной обмотки ТТ; $Z_{\text{н.НОМ}}$ – номинальная нагрузка ТТ; $\varphi_{\text{н.НОМ}}$ – номинальное значение угла сопротивления нагрузки ТТ.</p>

Таблица 1 (окончание)

Величина	Расчетная формула с пояснениями
Полное сопротивление ветви вторичного тока при КЗ	$z_{2\Sigma} = \sqrt{(R_2 + R_{н.факт})^2 + (X_2 + X_{н.факт})^2}$ <p>где $R_{н.факт}$ – фактическое активное сопротивление нагрузки ТТ; $X_{н.факт}$ – фактическое реактивное сопротивление нагрузки ТТ.</p>
Параметр режима А при КЗ	$A = \frac{I_{1\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}}{I_{\text{КЗ}} \cdot z_{2\Sigma}}$ <p>где $I_{1\text{ном}}$ – номинальный первичный ток ТТ; $K_{\text{ном}}$ – номинальная предельная кратность ТТ; $I_{\text{КЗ}}$ – максимальный ток короткого замыкания; $z_{2\Sigma\text{ном}}$ – номинальное полное сопротивление вторичной нагрузки ТТ</p>
Время насыщения ТТ при отсутствии остаточной намагниченности сердечника при КЗ	$t_{\text{нас}} = T_{\text{р.экв}} \cdot \ln \frac{\omega \cdot T_{\text{р.экв}}}{\omega \cdot T_{\text{р.экв}} - A + 1}$
Время насыщения ТТ при наличии остаточной намагниченности в сердечнике при КЗ	$t_{\text{нас}} = T_{\text{р.экв}} \cdot \ln \frac{\omega \cdot T_{\text{р.экв}}}{\omega \cdot T_{\text{р.экв}} - A \cdot (1 - K_r) + 1}$
Условие насыщения магнитопровода	$\omega \cdot T_{\text{р.экв}} + 1 > A \cdot (1 - K_r)$

Исходные данные для расчета приведены в табл. 2, вариант реализации алгоритма продемонстрирован расчетами в табл. 3.

Таблица 2

Пример расчета

Паспортные данные ТТ			Параметры провода токовых цепей			
Наименование ТТ	ТА1		Участок №1	ТТ- РЗ (медь)		$R_{\text{пр}}$
Номинальный первичный ток, А	$I_{1\text{ном}}$	600	Длина токовых цепей, м	L	96	0,28
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2\text{ном}}$	5	Сечение кабеля, мм ²	S	6	
Номинальная мощность ТТ, ВА	$S_{\text{ном}}$	30	Участок 2			
Номинальная нагрузка ТТ, Ом	$Z_{2\text{нагр.}}$	1,2	Длина токовых цепей, м	L	3	0,021
Номинальная предельная кратность	$K_{\text{ном}}$	30	Сечение кабеля, мм ²	S	2,5	

Таблица 2 (окончание)

Паспортные данные ТТ			Параметры провода токовых цепей			
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	0,4	Параметры устройств РЗ			
Реактивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	0,9	Реле № 1 Потребляемая мощность на фазу, ВА	$S_{уст.}$	Р642	2,5
Коэффициент мощности нагрузки	$\cos\varphi_H$	0,8	сопротивление фазы устройства, Ом	$Z_{р.ф.}$		0,1
	$\sin\varphi_H$	0,6	Реле № 2 потребляемая мощность на фазу, ВА	$S_{уст.}$	Р143	0,15
Полная погрешность ТТ, в %	ε	10	сопротивление фазы устройства, Ом	$Z_{р.ф.}$		0,006
Схема соединения вторичных обмоток ТТ	Звезда		Реле № 3 потребляемая мощность на фазу, ВА	$S_{уст.}$	-	0
Количество вторичных обмоток для РЗ	1		Сопротивление фазы устройства, Ом	$Z_{р.ф.}$	-	0

Таблица 3

Пример расчета

Наименование величины	при трехфазном коротком замыкании	при однофазном коротком замыкании
Максимальный ток КЗ, А	6100	4600
Эквивалентная постоянная времени затухания $T_{р.экв}$, сек	0,02	0,014
Фактическое сопротивление нагрузки $R_{н.факт} = R_{пр\Sigma}$	301	
Фактическое сопротивление нагрузки		602
$R_{н.факт} = 2R_{пр\Sigma}$ при однофазном коротком замыкании		
Фактическое сопротивление нагрузки $X_{н.факт} = Z_{р.ф\Sigma}$ при трехфазном коротком замыкании $X_{н.факт} = Z_{р.ф.} + Z_{р0}$, Ом при однофазном коротком замыкании	0,1	0,1
Номинальное полное сопротивление вторичной нагрузки ТТ $Z_{2\Sigma ном}$, Ом	2,115	2,115

Таблица 3 (окончание)

Наименование величины	при трехфазном коротком замыкании	при однофазном коротком замыкании
Полное сопротивление ветви вторичного тока $Z_{2\Sigma}$, Ом	1,221	1,416
Параметр режима А	5,111	5,847
Определение времени без остаточного намагничивания		
Остаточная намагниченность K_r	0	0
Проверка условия $\omega \times T_{p.экв} + 1 > A \cdot (1 - K_r)$ если условие	Условие выполняется	Условие выполняется
Проверка условия $A \cdot (1 - K_r) > 1$ невыполнение означает, что эксплуатация ТТ недопустима	Условие выполняется	Магнитопровод не насыщается
Время насыщения $t_{нас}$, сек	0,0213	Равно бесконечности
Определение времени с остаточным намагничиванием		
Остаточная намагниченность K_r	0,86	0,86
Проверка условия $\omega \times T_{p.экв} + 1 > A \cdot (1 - K_r)$ если условие	Условие выполняется	Условие выполняется
Проверка условия $A \cdot (1 - K_r) > 1$ невыполнение означает, что $t_{нас}$ принимает отрицательное значение и необходим расчёт графическим методом	Необходим расчёт графическим методом	Необходим расчёт графическим методом
Время насыщения $t_{нас}$, сек	-0,0009	-0,0006
Время насыщения по графическому методу $t_{нас}$, сек	0,0045	0,0053

Эксплуатируемые в настоящее время ТТ класса 10Р имеют в сердечнике остаточную магнитную индукцию, достигающую 86%. Поэтому в соответствии с ГОСТом [2] коэффициент остаточной намагниченности сердечника ТТ K_r необходимо принимать равным 0,86. В ходе расчёта при невыполнении условия $A \cdot (1 - K_r) > 1$ время насыщения $t_{нас}$ ТТ принимает отрицательное значение и возникает необходимость расчёта графическим методом, для его осуществления требуется построить график функции коэффициента переходного режима $K_{п.р}(t)$. При активно-индуктивном характере сопротивления вторичной цепи ТТ:

$$K_{п.р}(t) = \sin \alpha \cdot e^{-\frac{t}{T_p}} + \cos \alpha \cdot \omega \cdot T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) - \sin(\omega \cdot t + \alpha)$$

активно-индуктивным характере сопротивления вторичной цепи ТТ:

$$K_{п.р}(t) = \omega \cdot T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) - \sin(\omega t)$$

Ниже представлены графики для нахождения $t_{нас}$ для трёхфазного короткого замыкания – рисунок 1, и для однофазного короткого замыкания – рисунок 2.

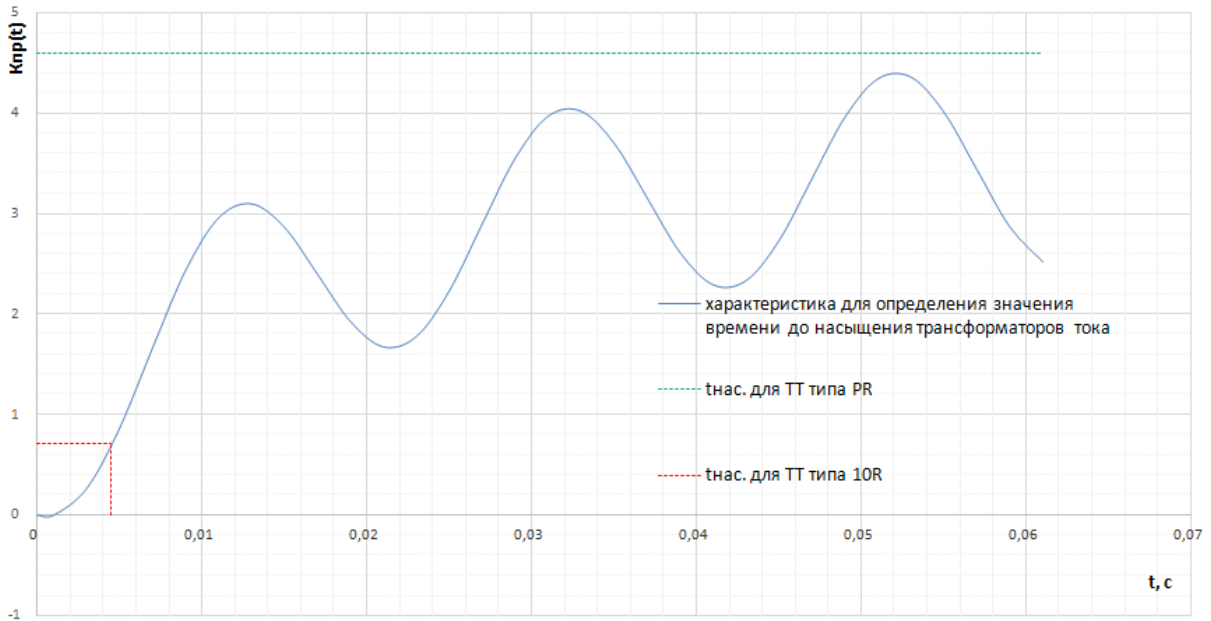


Рисунок 1 – График для ТТ с $T_{р. экв} = 0,02$ с

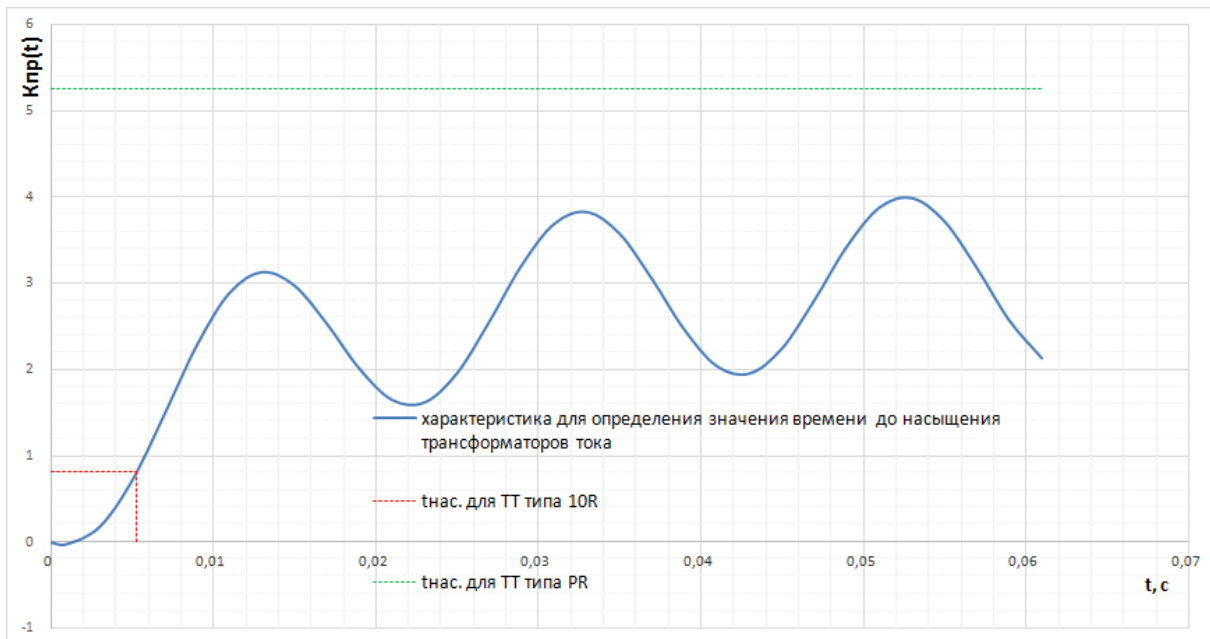


Рисунок 2 – График для ТТ с $T_{р. экв} = 0,018$ с

Для нахождения времени насыщения $t_{нас}$ на рисунках 1 и 2 необходимо значение $A \cdot (1 - K_r)$ отложить по оси ординат и на пересечении с графиком $K_{п.р}(t)$ по оси абсцисс определим искомое значение времени.

Также на рисунке 2 показано значение $A \cdot (1 - K_r)$ для ТТ класса PR с нормируемой остаточной намагниченностью достигающую 10%. В таком случае время насыщения $t_{нас}$ увеличивается, в нашем случае оно равно бесконечности, соответственно, не превышает время срабатывания релейной защиты, что соответствует всем требованиям. ТТ класса PR могут быть установлены на место действующих трансформаторов.

Продемонстрированный расчёт, выполненный с использованием программного пакета Excel, показал удобство и простоту нахождения всех необходимых данных для выбора технических характеристик ТТ и подключенных устройств РЗ на предмет соответствия последнему ГОСТ Р58669 - 2019. Данный метод позволяет значительно упростить и ускорить процесс выбора, минимизировать ошибки, опираясь на таблично-графическую визуализацию. Благодаря самостоятельно построенной характеристике апериодической составляющей с использованием коэффициента переходного режима $K_{п.р.}(t)$, нахождение времени насыщения ТТ значительно упрощается. Математические выражения, кривые, определяющие содержание апериодической составляющей в первичном токе, достаточно единожды представить в программе Excel. Табличный вариант позволяет наглядно видеть изменение в расчетах при изменении входных величин и может быть шаблоном при выполнении расчетов как проектными, так и энергоснабжающими организациями.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНСТ 283-2018. Предварительный национальный стандарт РФ «Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока» Москва. Стандартинформ, 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161312> (обращение 09.03.2021).

2. ГОСТ Р58669-2019 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях». 2007-2021, ФГУП. СТАНДАРТИНФОРМ. [Электронный ресурс]. URL: <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=238273> (обращение 09.03.2021).

3. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.