

Таким образом:

1. В системах моделирования отложенного времени для моделирования ферромагнитного сердечника ТТ предпочтительнее использовать модели гистерезиса, в зависимости от известных параметров трансформатора тока и целей моделирования.

2. Для моделирования переходных режимов в реальном времени целесообразно использовать однозначную кривую намагничивания, из которой впоследствии формируется петля гистерезиса, так как она дает приемлемые для практических целей результаты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джаясинхе Р., Мутумуни Д. Моделирование насыщения трансформаторов тока для изучения устройств релейной защиты // Релейщик, № 2, 2014. с. 44-46.

2. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Жалалис Л.В. и др. Трансформаторы тока. – Л.: Энергия, Ленингр. Отд-ние, 1980.-344 с.

3. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of magnetic hysteresis// J. Magn. And Magn. Mater.< 1986, v . 61, p. 48-60.

4. Наумов В.А., Шевцов В.М. Математические модели трансформаторов тока в исследовании алгоритмов дифференциальных защит // Электрические станции, № 3, 2003. с. 51-56

5. Chan J.H., Vladimirescu A., Xiao Chun Gao, Liebmann P., Valainis J. Nonlinear

Transformer Model for Circuit Simulation // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, vol. 10, no. 4, pp. 476-482, Apr. 1991.

6. Стародубцев Ю. Магнитомягкие материалы: энциклопедический словарь-справочник. - Москва : Техносфера, 2011. - 659 с.

7. MATLAB 8.3, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2014

8. Real Time Digital Simulation for the Power Industry [Цифровое моделирование в режиме реального времени для энергетики; материалы фирмы-производителя программно-аппаратного комплекса RTDS] // RTDS Technologies Inc., Winnipeg, Manitoba Canada, 2009.

9. Neves L.A., Dommel H. On Modeling Iron Core Nonlinearities // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993, pp. 417-425.

Авторы:

**Федотов Александр Юрьевич**, инженер ООО НПП «ЭКРА», в 2015 году окончил факультет энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова;

**Кошельков Иван Александрович**, руководитель группы ООО НПП «ЭКРА», в 2010 году окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова.

УДК 621.314.224

### АНАЛИЗ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ УДАЛЕННЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Дмитренко А.М., Журавлев Д.П.  
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»

В докладе приведены результаты исследований времени до насыщения трансформаторов тока (ТТ) в режиме удаленных коротких замыканий (КЗ). Показаны зависимости времени до насыщения от приведенной предельной

The paper presents the results of research of current transformer (CT) saturation time in remote short circuit (SC) mode. The addictions of saturation time from reduced maximum multiplicity of accuracy, the time constant of the decay of the aperiodic component of the

кратности, постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, остаточной индукции и тока внешнего КЗ.

Ключевые слова: трансформатор тока, время до насыщения, предельная кратность по точности, остаточная индукция.

В переходных режимах сердечники ТТ могут насыщаться из-за влияния апериодической составляющей тока КЗ. Выражение для переходного тока КЗ можно записать в следующем виде [1]

$$i = I_{1m} \left[ e^{-\frac{t}{T_{1экв}}} \cos \psi - \cos(\omega t + \psi) \right], \quad (1)$$

где  $T_{1экв}$  – эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ;  $\psi$  – начальная фаза сверхпереходной ЭДС генератора или системы.

Формула (1) обеспечивает достаточную точность при  $T_{1экв} \geq 2T$ , где  $T$  – период частоты электроэнергетической системы.

Время до насыщения ТТ  $t_s$  при токе в соответствии с формулой (1) и активной нагрузке ТТ можно найти используя уравнение [1]

$$\frac{K'_{пр}(1 - B_r)}{I_{кз*}} = \omega T_{1экв} \left( e^{-\frac{t_s}{T_2}} - e^{-\frac{t_s}{T_{1экв}}} \right) \cos \psi + \sin \psi e^{-\frac{t_s}{T_2}} - \sin(\omega t_s + \psi) \quad (2)$$

где  $K'_{пр}$  – приведенная к номинальному току защищаемого трансформатора предельная кратность по точности  $K_{пр}$  ТТ;

$I_{кз*} = \frac{I_{кз}}{I_{ном.Т}}$  – относительный ток КЗ;

$B_r = \frac{B_r}{B_{пр}}$ ;  $B_r$  – остаточная индукция;  $B_{пр}$  –

предельное значение индукции (соответствует моменту насыщения ТТ);  $T_2$  – постоянная времени вторичного контура ТТ при ненасыщенном магнитопроводе.

Формула (2) получена при условии, что зависимость  $B = f(H)$  аппроксимируется двумя наклонными участками (рис. 1). При использовании одного наклонного участка 2 (метод СХН) используется такой параметр, как индукция условного

насыщения  $B_{s, усл}$ . В данном случае считается, что переход от наклонного участка 1 к наклонному участку 2 происходит при  $B = B_{пр} = 1,8 \div 1,85$  Тл.

Keywords: current transformer, saturation time, maximum multiplicity of accuracy, residual induction.

насыщения  $B_{s, усл}$ . В данном случае считается, что переход от наклонного участка 1 к наклонному участку 2 происходит при  $B = B_{пр} = 1,8 \div 1,85$  Тл.

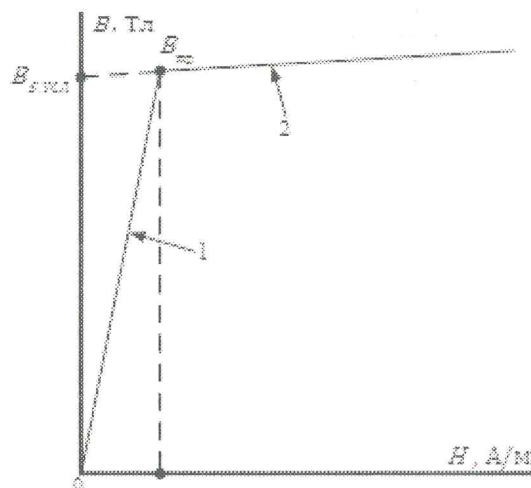


Рис. 1 Аппроксимация зависимости  $B = f(H)$

Аппроксимации на рис. 1 соответствует схеме замещения ТТ, приведенная на рис. 2. В схеме на рис. 2 имеем:

$$T_2 = \frac{L_{\mu 0}}{r_2}; \quad T_{2s} \approx \frac{L_{\mu s}}{r_2}, \quad \text{где } r_2 = r_{обм.2} + r_{нт},$$

$T_{2s}$  – постоянная времени в режиме насыщения (при замкнутом ключе  $s$ ).

Расчеты показали, что при использовании холоднокатаных электротехнических сталей и  $K_{пр} \geq 20$  – получается  $T_2 \geq 1$  с.

На наклонном участке (в насыщенном состоянии магнитопровода) постоянная времени  $T_{2s}$  обычно не более 0,02 с и

$$\text{отношение } \frac{T_2}{T_{2s}} \geq 50.$$



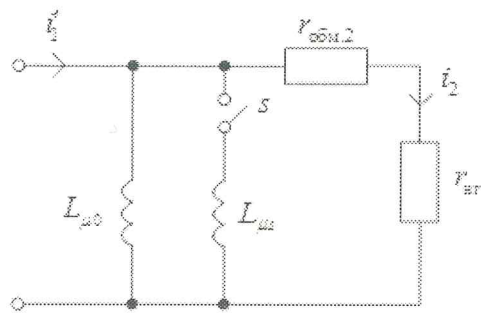


Рис. 2 Схема замещения ТТ с активной нагрузкой

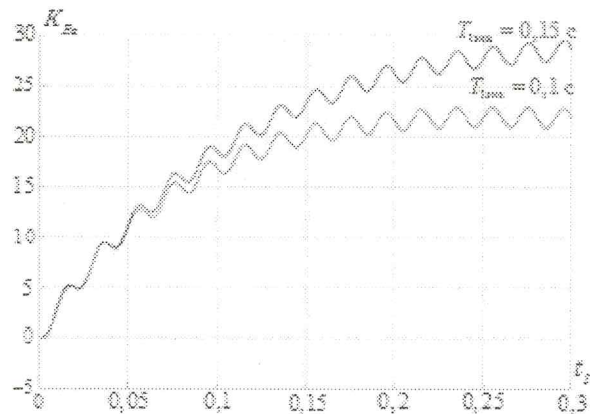


Рис. 3 Зависимости  $K_{Ba} = f(t_s)$

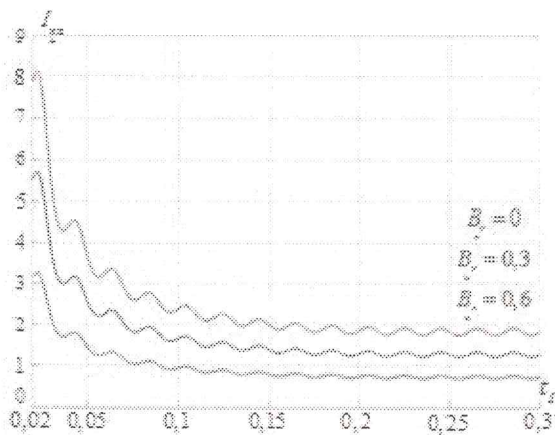


Рис. 4 Зависимость  $I_{kz}^* = f(t_s)$  при  $T_{1экв} = 0,1 c$

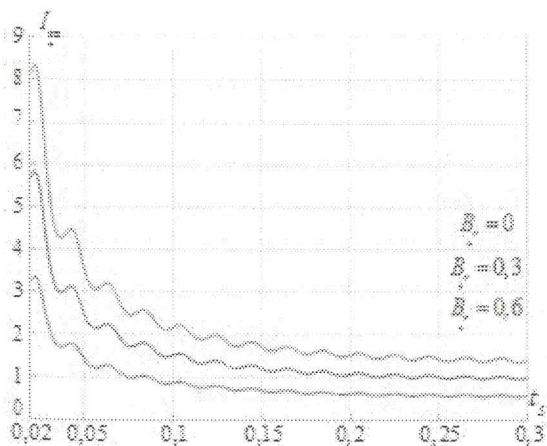


Рис. 5 Зависимость  $I_{kz}^* = f(t_s)$  при  $T_{1экв} = 0,15 c$

Формула (2) обычно используется для нахождения  $t_s$  при максимально возможном (для конкретного трансформатора) токе КЗ. При этом принимается  $\psi = 30^\circ$ , т.к. при этом получается более крутое нарастание правой части уравнения (2).

Для повышения чувствительности дифференциальных защит трансформаторов используется тормозная характеристика с горизонтальным участком в начальной части. В связи с этим представляет интерес нахождение времени  $t_s$  при небольших значениях относительных токов КЗ (порядка 1÷3). В таких случаях можно ожидать, что получатся значения  $t_s$  значительно больше периода  $T$ . Поскольку с ростом  $t_s$  апериодическая составляющая тока КЗ в момент насыщения ТТ уменьшается, то при небольших значениях  $I_{kz}^*$  целесообразно

проводить исследования при  $\psi = 0$ . С учетом этого, правая часть уравнения (2) принимает вид

$$K_{Ba} = \omega T_{1экв} \left( e^{-\frac{t_s}{T_2}} - e^{-\frac{t_s}{T_{1экв}}} \right) - \sin \omega t_s. \quad (3)$$

Для дифференциальной защиты трансформатора малые значения токов внешних КЗ получаются, например, при КЗ на линии, отходящей от шин электрической станции. С учетом этого, расчетное значение постоянной времени  $T_{1экв}$  принимается в пределах 0,1÷0,15 с (для мощных электрических станций). Максимальное время отключения линии основными защитами по условию устойчивости принимается 0,14 с [2]. С учетом возможного действия устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ) время протекания тока внешнего КЗ может увеличиваться до 0,2÷0,25 с. С учетом некоторого запаса времени до насыщения  $t_s$  рассматриваются в диапазоне от 0,02 до 0,3 с. На рис. 3 приведены зависимости  $K_{Ba} = f(t_s)$ , рассчитанные по формуле (3) при  $T_2 = 1 c$  и двух значениях  $T_{1экв}$ : 0,1 с и 0,15 с.

С использованием указанных зависимостей и левой части уравнения (2) построены зависимости  $I_{*кз} = f(t_s)$  при  $K'_{пр} = 40$  и трех значениях  $B_r : 0; 0,3$  и  $0,6$  (рис. 4 и рис. 5).

**Вывод.** В режиме удаленных КЗ при малых кратностях  $I_{*кз}$  время до насыщения  $t_s$  существенно возрастает. Применение в формуле (2) коэффициента  $e^{-\frac{t_s}{T_2}}$  позволяет уточнить метод расчета времени до насыщения ТТ  $t_s$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитренко А.М., Журавлев Д.П. Анализ и исследование способов торможения цифровых дифференциальных защит блочных трансформаторов. – Электрические станции, 2014, №11. – с. 36-41.
2. Кузнецов С.Л., Дегтярев А.А., Воробьев В.С., Москаленко В.В. Определение времени до насыщения

трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий. – Электрические станции, 2017, №1. – с. 42-47.

Авторы:

**Дмитренко Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленный предприятий Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 1962 г. окончил Южно-Российский политехнический университет им. М.И. Платова (НПИ). В 1993 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Времяимпульсные дифференциальные защиты элементов энергосистем».

**Журавлев Дмитрий Павлович**, в 2011 г. окончил электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В настоящее время – инженер ООО НПП «ЭКРА».

### АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ, ВКЛЮЧЕННЫХ НА СУММУ ТОКОВ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ЛИНИИ, ПРИ НАСЫЩЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Онисова О.А., Смирнов С.Ю.

ОАО «ВНИИР», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

*В докладе рассмотрены особенности функционирования дистанционных защит линий электропередачи 330 кВ и выше в условиях насыщения трансформаторов тока. Исследования проведены с учётом реальных параметров трансформаторов тока, характерных для данного класса напряжения. Особое внимание обращено на защиты, включённые на сумму токов ветвей выключателей в схемах распределительных устройств 3/2, 4/3, 2 выключателя на присоединение.*

**Ключевые слова:** дистанционная защита, насыщение трансформатора тока, остаточная намагниченность.

*The report discussed the features of distance protection operation for transmission lines of 330 kV and above under conditions of CT saturation. Studies were carried out taking into account the actual CT parameters for this voltage level. A lot of attention was paid to the protection measuring the sum of currents of two circuit breakers in switchgear scheme 3/2, 4/3, 2 breakers per connection.*

**Keywords:** Distance Protection, Current Transformers Saturation, Initial Remanence.