
УДК 621.314.224

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ТОКА ПРИ НАСЫЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

© 2022 г. Д. Ю. Вихарев¹, *, Н. А. Родин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина”, Иваново, Россия

*e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.01.2022 г.

После доработки 12.08.2022 г.

Принята к публикации 15.08.2022 г.

Проблема насыщения трансформаторов тока на сегодняшний день не является полностью решенной. Это явление может привести к невыполнению защитами функций несрабатывания при внешних коротких замыканиях и срабатывания при внутренних коротких замыканиях. Наиболее перспективным и универсальным решением представляется восстановление кривой тока при насыщении. В статье представлен алгоритм восстановления приведенного первичного тока при насыщении измерительного трансформатора тока по параметрам собственной индуктивности вторичной обмотки и взаимной индуктивности между первичной и вторичной обмотками. Для построения данного алгоритма было получено дифференциальное уравнение, описывающее вторичный ток трансформатора тока в насыщении, определено выражение для восстановления приведенного первичного тока и представлена методика определения участка насыщения. Проведены опыты как математического, так и физического моделирования, подтверждающие эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: трансформатор тока, насыщение, алгоритм, цифровая коррекция вторичного тока, восстановление вторичного тока

DOI: 10.31857/S0002331022060061

ВВЕДЕНИЕ

Насыщение электромагнитных трансформаторов тока является серьезной проблемой для устройств релейной защиты и автоматики. Это явление может привести к ложным действиям устройств продольной дифференциальной токовой защиты из-за искажения вторичных токов трансформаторов тока при внешних коротких замыканиях [1, 2].

Наиболее универсальным решением проблемы насыщения магнитопровода трансформатора тока является восстановление формы кривой приведенного первичного тока во время насыщения, так как это решение не имеет ограничений в отношении типов релейной защиты для микропроцессорных устройств. Способы восстановления информации о первичном токе при насыщении трансформаторов тока можно разделить на две группы: в которых используются или не используются параметры характеристики намагничивания трансформатора тока [3]. Первая группа способов, которые описаны в [3–5], имеет существенный недостаток: использование основной кривой

намагничивания. Нередко электромагнитный трансформатор тока работает с остаточной намагничённостью или перемагничивается по частной петле гистерезиса, поэтому восстановление кривой приведенного первичного тока с помощью таких алгоритмов может быть неточным. Способы, относящиеся ко второй группе, описанные в [5, 6], основаны на точном определении момента насыщения. Такие алгоритмы часто используют факт резкого изменения вторичного тока при насыщении. Однако способы, относящиеся ко второй группе, не позволяют обеспечить быстрое действие основных защит [5].

В настоящей работе представлен алгоритм восстановления приведенного первичного тока по параметрам собственной индуктивности вторичной обмотки и взаимной индуктивности между первичной и вторичной обмотками при насыщении трансформатора тока. Основой предложенного способа восстановления является предположение о том, что электромагнитный трансформатор тока при глубоком насыщении магнитопровода описывается уравнениями, справедливыми для воздушного трансформатора.

Для теоретического подтверждения выдвинутой гипотезы необходимо разработать математическую модель трансформатора тока, включающую в себя модель воздушного трансформатора как частный случай.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА С АДДИТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ЦЕПИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Основой математической модели трансформатора тока является метод перехода от полевой задачи к цепной, который описан в [7]. Суть применения этого метода к трансформатору тока заключается в записи второго закона Кирхгофа для контура вторичной обмотки. Уравнение, описывающее вторичную обмотку, нагруженную на активное сопротивление, имеет следующий вид:

$$-\frac{\partial(\psi_1 + \psi_2 + \psi_{ст})}{\partial t} = i_2(R_2 + R_n), \quad (1)$$

где ψ_1 – потокосцепление с магнитным полем, созданным током первичной обмотки; ψ_2 – потокосцепление с магнитным полем, созданным током вторичной обмотки; $\psi_{ст}$ – потокосцепление с магнитным полем, созданным структурой магнитопровода; i_2 – вторичный ток; R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки; R_n – активное сопротивление нагрузки трансформатора тока.

Потокосцепление с магнитным полем в вакууме можно представить следующим образом [8]:

$$\psi_1 = -M_{12}i_1, \quad (2)$$

где M_{12} – коэффициент взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками; i_1 – первичный ток.

$$\psi_2 = L_2i_2, \quad (3)$$

где L_2 – собственная индуктивность вторичной обмотки.

Потокосцепление, обусловленное наличием магнитопровода, определяется намагничивающей силой по вебер-амперной характеристике:

$$\psi_{ст} = \lambda(F) = \lambda(-i_1 + w_2i_2), \quad (4)$$

где $\lambda(F)$ – вебер-амперная характеристика магнитопровода; F – намагничивающая сила; w – число витков вторичной обмотки.

Объединяя выражения (1), (2), (3), (4), можно получить дифференциальное уравнение, описывающее вторичный ток:

$$\left(w_2 M_{12} + w_2 \frac{\partial \lambda}{\partial F} \right) \left(\frac{1}{w_2} \frac{\partial i_1}{\partial t} - \frac{\partial i_2}{\partial t} \right) = i_2 (R_2 + R_H) + (L_2 - w_2 M_{12}) \frac{\partial i_2}{\partial t}. \quad (5)$$

Индуктивность, стоящую в правой части выражения (5), принято называть индуктивностью цепи намагничивания:

$$L_{\text{нам}} = w_2 M_{12} + w_2 \frac{\partial \lambda}{\partial F}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что $L_{\text{нам}}$ представляет собой сумму индуктивностей, обусловленных различными магнитными полями: в вакууме и в магнитопроводе. При отсутствии магнитопровода уравнение (5) описывает воздушный трансформатор. Поэтому модель воздушного трансформатора является частным случаем уравнения (5).

Анализ вебер-амперных характеристик различных трансформаторов тока показывает, что при больших значениях намагничивающей силы наклон характеристики стремиться к нулю, то есть:

$$\lim_{F \rightarrow \infty} \left[\frac{\partial \lambda}{\partial F} \right] = 0. \quad (7)$$

Поэтому при насыщении магнитопровода трансформатор тока описывается уравнениями, справедливыми для воздушного трансформатора:

$$M_{12} \frac{\partial i_1}{\partial t} = i_2 (R_2 + R_H) + L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t}. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение (8) позволяет записать выражение для определения первичного тока по отсчетам вторичного.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ТОКА ПО ДАННЫМ ВТОРИЧНОГО ТОКА

Для приведенного первичного тока уравнение (8) примет вид:

$$M_{12} w_2 \frac{\partial i_1'}{\partial t} = i_2 (R_2 + R_H) + L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t}. \quad (9)$$

Формула Ньютона-Лейбница позволяет определить приведенный первичный ток по его начальному значению в точке t_H и его производной:

$$i_1'(t) = i_1'(t_{H1}) + \int_{t_{H1}}^t \frac{\partial i_1'(t)}{\partial t} \partial t, \quad t \in [t_{H1}; t_{H2}], \quad (10)$$

где $[t_{H1}; t_{H2}]$ – временной интервал, в котором вторичный ток удовлетворяет уравнению (9).

Итоговое выражение для вычисления приведенного первичного тока может быть получено из (9) и (10):

$$i_1'(t) = \frac{L_2}{w M_{12}} (i_2(t) - i_2(t_{H1})) + \frac{R_2 + R_H}{w M_{12}} \int_{t_{H1}}^t i_2(t) \partial t + i_1'(t_{H1}). \quad (11)$$

Полученное выражение (11) позволяет вычислить приведенный первичный ток по данным вторичного тока при насыщении магнитопровода.

Применяя метод линеаризации к выборкам вторичного тока, соответствующего линейному режиму магнитной системы трансформатора тока, можно получить значение первичного тока в момент начала насыщения. Малая погрешность определения начального значения обусловлена малым временем, необходимым для перехода магнит-

ной системы в нелинейный режим работы, в отношении аппроксимации функции вторичного тока на этом участке.

Для реализации такого алгоритма восстановления требуется определить интервал времени, в течение которого трансформатор тока находится в насыщенном состоянии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ, В ТЕЧЕНИЕ КОТОРОГО МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА НАХОДИТСЯ В НАСЫЩЕННОМ СОСТОЯНИИ

Для определения момента времени, соответствующего началу насыщения магнитопровода трансформатора тока, можно воспользоваться видом общего решения линейного неоднородного дифференциального уравнения (9) относительно вторичного тока:

$$i_2(t) = (i_2(t_{н1}) - i_{2пр}(t_{н1})) e^{-\frac{R_2 + R_{н1}}{L_2}(t - t_{н1})} + i_{2пр}(t), \quad (12)$$

где $i_{2пр}$ – частное решение неоднородного дифференциального уравнения (9), зависящее от функции первичного тока.

Анализ опытных осциллограмм вторичного тока, соответствующего насыщению магнитопровода, показывает, что в моменты времени, близкие к $t_{н1}$, вторичный ток изменяется по экспоненциальному закону.

Таким образом, выражение (12), описывающее вторичный ток, примет следующий вид:

$$I_2(t) \approx I_2(t_{н1}) e^{-\frac{R_2 + R_{н1}}{L_2}(t - t_{н1})}. \quad (13)$$

Изменение тока в некотором интервале времени Δt по экспоненциальному закону (13) позволяет определить момент времени $t_{н1}$ по следующему алгоритму:

1. Для момента времени t_i , соответствующего i -ой выборке из осциллограммы вторичного тока, рассчитывается дальнейшая зависимость вторичного тока до момента времени t_{i+n} с предположением того, что t_i соответствует моменту времени $t_{н1}$, при котором начинается насыщение трансформатора тока. Число n определяется следующим равенством:

$$t_{i+n} - t_i \approx \Delta t = \frac{L_2}{R_2 + R_{н1}}. \quad (14)$$

2. С помощью сравнения площадей под кривыми действительного и предполагаемого вторичных токов в интервале времени $[t_i; t_{i+n}]$ делается оценка степени совпадения этих кривых по следующему неравенству:

$$\frac{\|S_{д}\| - \|S_{п}\|}{\|S_{п}\|} \times 100\% \leq \Delta S_{\%доп}, \quad (15)$$

где $\|S_{д}\|$ – площадь под кривой действительного вторичного тока; $\|S_{п}\|$ – площадь под кривой предполагаемого вторичного тока; $\Delta S_{\%доп}$ – предельно допустимая относительная разница площадей под кривыми токов.

В результате моделирования насыщения трансформаторов тока различных типов было установлено, что предельно допустимая относительная разница площадей, обеспечивающая определение момента насыщения $t_{н1}$ и несрабатывание без насыщения, находится в диапазоне от 10% до 20%. После первого выполнения условия (15) дальнейшее распознавание момента насыщения не производится. Графическое пояснение к методу определения момента насыщения представлено на рис. 1.

3. Так как совпадение зависимостей предполагаемого вторичного тока в насыщении и действительного вторичного тока оценивается путем сравнения площадей, мо-

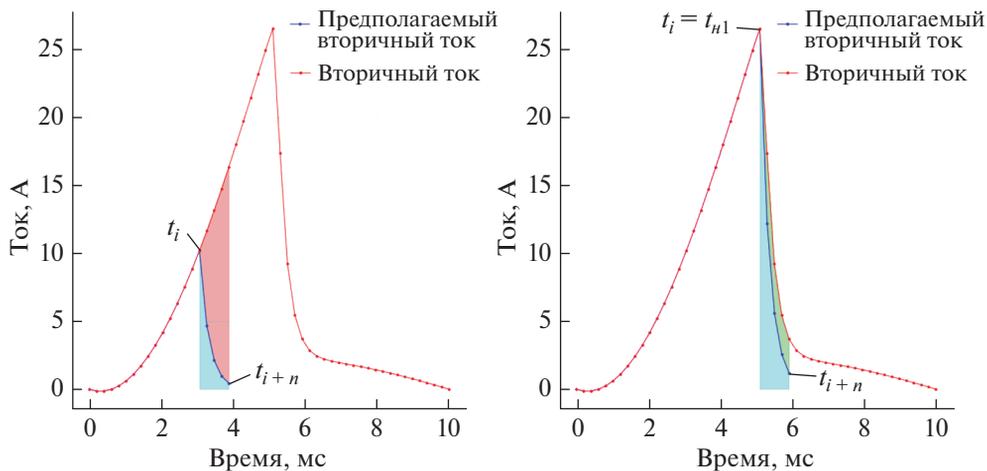


Рис. 1. Определение момента насыщения путем сравнения площадей (на левом графике красным цветом отмечена разность площадей, не удовлетворяющая соотношению (15); на правом графике зеленым цветом отмечена разность площадей, удовлетворяющая соотношению (15); синим цветом на обоих графиках отмечена площадь, с которой происходит сравнение).

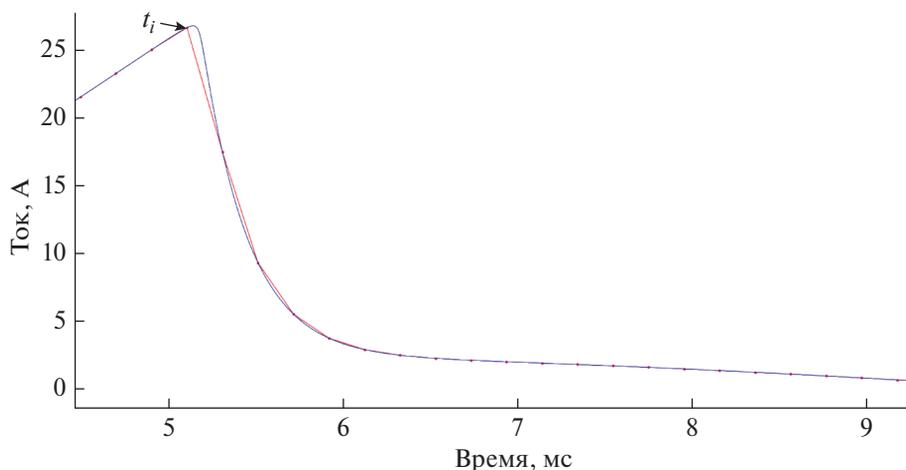


Рис. 2. Случай неверного определения момента времени насыщения в точке t_i (красная кривая – осциллограмма вторичного тока (96 выборок за 20 мс); синяя кривая – действительная зависимость вторичного тока).

мент насыщения t_{n1} может быть получен раньше, чем действительный момент насыщения. В таком случае результат восстановления зависимости приведенного первичного тока окажется неверным, так как полученный момент времени не удовлетворяет уравнению (9). На рис. 2 представлен возможный случай определения t_{n1} в точке t_i .

Поэтому в качестве t_{n1} необходимо взять время t_{i+1} , где i – порядковый номер выборки, для которой выполнилось условие (15). Такая коррекция момента времени t_{n1}

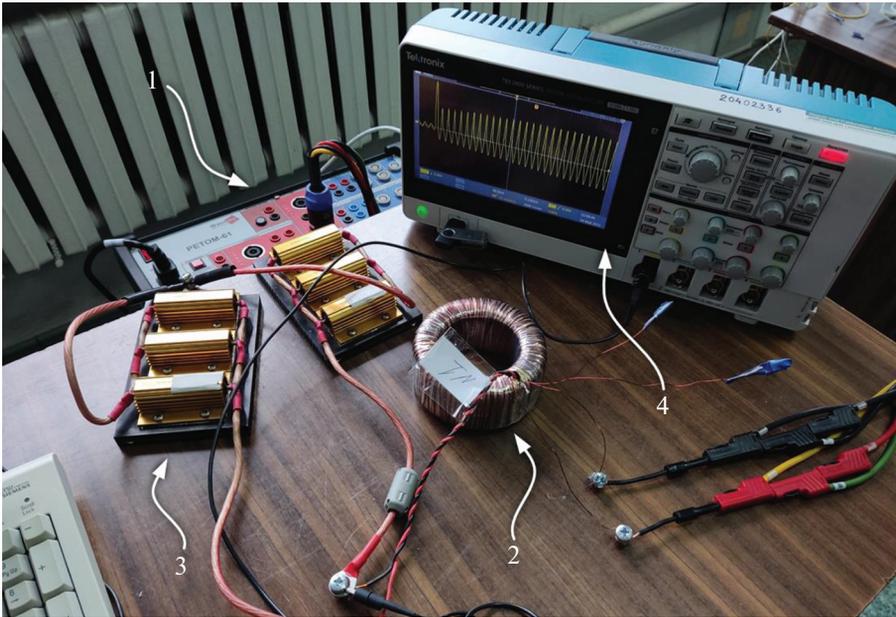


Рис. 3. Экспериментальная установка для получения осциллограмм вторичного тока трансформатора тока при насыщении его магнитопровода (1 – испытательный комплекс “РЕТОМ-61”; 2 – исследуемый трансформатора тока; 3 – измерительный шунт; 4 – осциллограф).

позволит восстанавливать зависимость приведенного первичного тока по данным вторичного тока, удовлетворяющего уравнению (9). Но при применении такого метода выражение (9) уже не является верным, так как вторичный ток при насыщении магнитопровода резко уменьшается в первые моменты процесса насыщения. Поэтому начальное значение приведенного первичного тока необходимо взять на несколько выборок ранее.

4. Так как принужденная составляющая вторичного тока в насыщении мала, концом интервала времени насыщения $t_{н2}$ можно считать момент времени, когда приведенный первичный ток, рассчитанный по формуле (11), перейдет через ноль.

ВЕРИФИКАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО ПЕРВИЧОГО ТОКА

Проверка разработанного алгоритма осуществлялась по данным вторичного тока, полученным методами физического и математического моделирования. Верификация алгоритма предполагает оценку восстановления первичного тока при наличии шумовых составляющих и высших гармоник в исходном сигнале.

Суть опытов физического моделирования заключается в получении осциллограмм вторичного тока существующего трансформатора при подаче в его первичную обмотку тока, представляющего собой сумму периодической и аperiodической составляющих. подача первичного тока осуществляется с помощью испытательного комплекса “РЕТОМ-61”. Получение данных о вторичном токе осуществляется путем измерения напряжения на шунте, являющегося нагрузкой трансформатора тока. Экспериментальная установка для получения осциллограмм вторичного тока представлена на рис. 3.

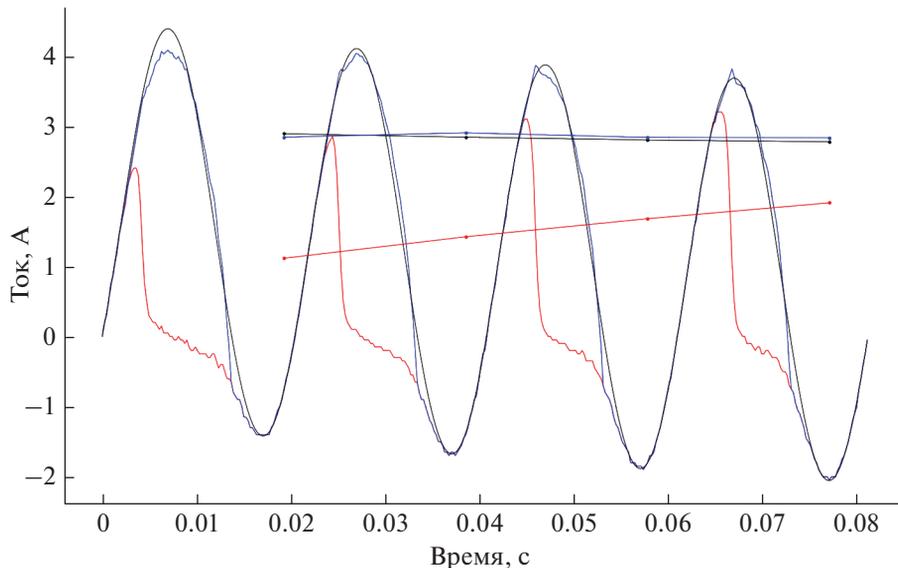


Рис. 4. Пример восстановления приведенного первичного тока по результатам физического опыта №1 (красная кривая – осциллограмма вторичного тока (96 выборок за 20 мс) и амплитудное значение гармоники 50 Гц; синяя кривая – восстановленный приведенный первичный ток и амплитудное значение гармоники 50 Гц; черная кривая – действительный приведенный первичный ток и амплитудное значение гармоники 50 Гц).

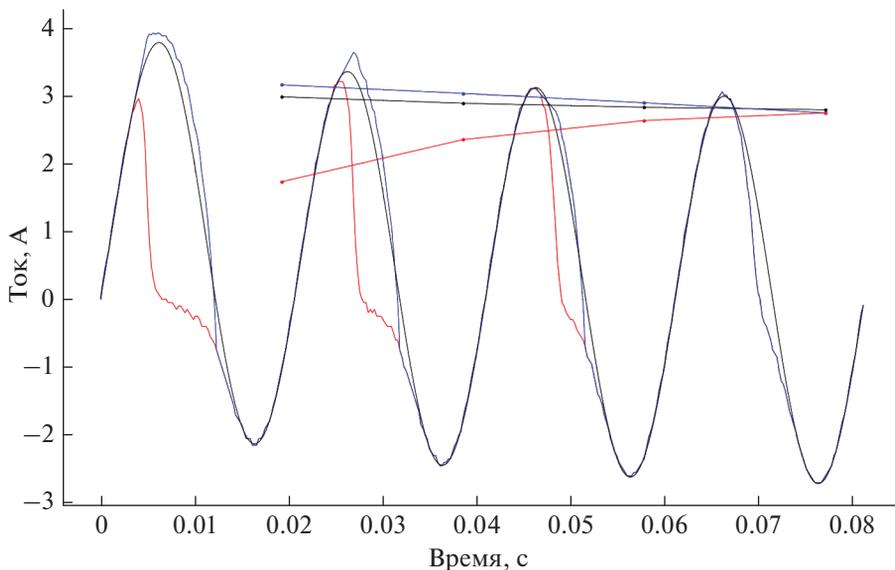


Рис. 5. Пример восстановления приведенного первичного тока по результатам физического опыта №2 (красная кривая – осциллограмма вторичного тока (96 выборок за 20 мс) и амплитудное значение гармоники 50 Гц; синяя кривая – восстановленный приведенный первичный ток и амплитудное значение гармоники 50 Гц; черная кривая – действительный приведенный первичный ток и амплитудное значение гармоники 50 Гц).

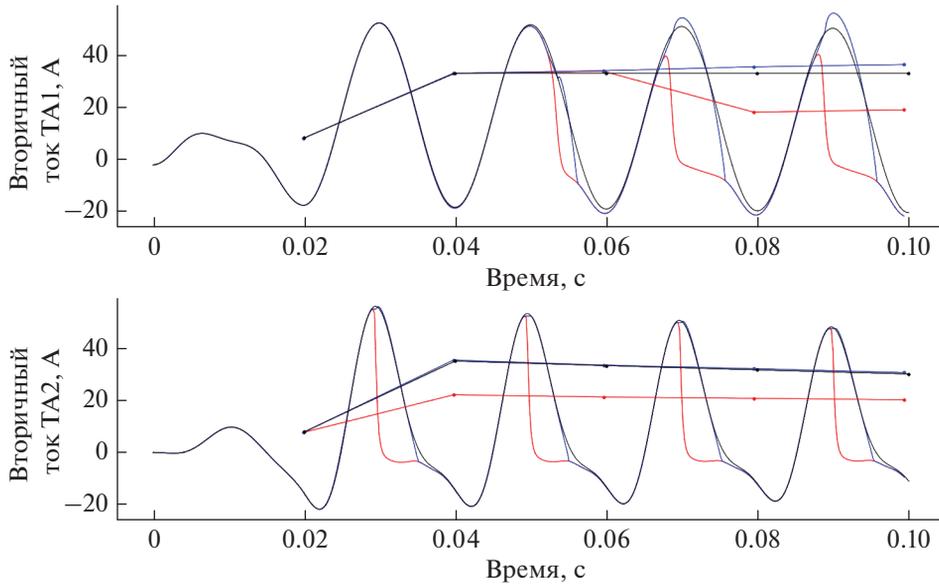


Рис. 6. Пример восстановления приведенного первичного тока на выводах генератора при внутреннем трехфазном коротком замыкании по результатам математического моделирования (красная кривая – оциллограмма вторичного тока (96 выборок за 20 мс) и амплитудное значение гармоники 50 Гц; синяя кривая – восстановленный приведенный первичный ток и амплитудное значение гармоники 50 Гц; черная кривая – приведенный первичный ток и амплитудное значение гармоники 50 Гц; ТА1, ТА2 – трансформаторы тока, установленные на линейных и нулевых выводах генератора соответственно).

Пример восстановления первичного тока по результатам физического моделирования представлен на рис. 4–5.

Основой опытов математического моделирования является модель блока “генератор-трансформатор” Ивановской ТЭЦ-2. Для построения математической модели генератора “ТВФ-63-2 У3” использованы принципы, описанные в [9]. Для целей восстановления первичного тока получены временные зависимости вторичного тока путем моделирования различных видов коротких замыканий на выводах блока.

Пример восстановления первичного тока по результатам математического моделирования представлен на рис. 6–7. Временные зависимости в каждом опыте соответствуют вторичным токам трансформаторов, установленных на линейных и нулевых выводах генератора.

Во всех опытах физического и математического моделирования полная погрешность, рассчитанная по результатам восстановления, не превышала 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен способ восстановления первичного тока, основанный на представлении насыщенного трансформатора тока уравнениями, справедливыми для воздушного трансформатора. Разработанный алгоритм обладает рядом преимуществ:

1. Для определения факта насыщения необходимо всего 1–2 мс, что обеспечивает малую задержку восстановления первичного тока.
2. Для расчета математических формул восстановления не требуется большого объема вычислительной мощности.

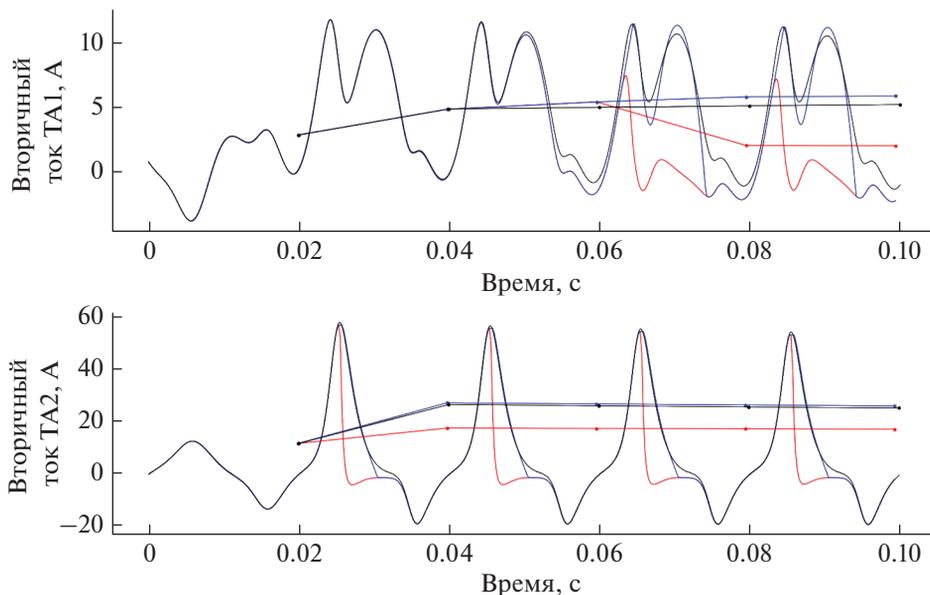


Рис. 7. Пример восстановления приведенного первичного тока на выводах генератора при внутреннем двухфазном коротком замыкании по результатам математического моделирования (красная кривая – осциллограмма вторичного тока (96 выборок за 20 мс) и амплитудное значение гармоники 50 Гц; синяя кривая – восстановленный приведенный первичный ток и амплитудное значение гармоники 50 Гц; черная кривая – приведенный первичный ток и амплитудное значение гармоники 50 Гц; ТА1, ТА2 – трансформаторы тока, установленные на линейных и нулевых выводах генератора соответственно).

3. Алгоритм позволяет восстанавливать любую форму первичного тока.

4. Интегральные принципы, на которых основан алгоритм, обеспечивают устойчивость алгоритма к зашумленности входного сигнала.

Преимущества разработанного алгоритма доказаны не только на основе математических моделей, но и на основе физического эксперимента. Применение предложенного способа восстановления позволяет устранить влияние насыщения магнитопровода на работу микропроцессорных устройств защит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Дони Н.А., Шурупов А.А., Петров А.А., Костарев Л.Н., Кошельков И.А. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1(34). С. 28–36.
2. Скотников Р.В. Анализ технологических нарушений в ПАО «ФСК ЕЭС», вызванных насыщением магнитопроводов индуктивных трансформаторов тока // Научные исследования XXI века. 2021. № 1(9). С. 182–191.
3. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Сербиновский Б.Б. Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 3 (28). С. 43–51.
4. Ozgonenel O. Correction of saturated current from measurement current transformer. IET Electric Power Applications. 2013. № 7. P. 580–585.
5. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 3. С. 29–31.

6. Лямец Ю.Я., Никонов И.Ю., Петряшин И.Е. Восстановление тока, искаженного вследствие насыщения трансформатора тока, по малому числу отсчетов // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: Материалы научно-технической конференции молодых специалистов в рамках форума “РЕЛАВЭКСПО-2021”. Чебоксары, 20–22 апреля 2021 года. Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. 2021. С. 95–99.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники в трех частях. М.: Высшая школа. 1964. 753 с.
8. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат. 1986. 488 с.
9. Вихарев Д.Ю., Родин Н.А. Модель неявнополюсной электрической машины на основе математического описания магнитного поля в воздушном зазоре // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2021. № 6. С. 27–37.

Algorithm for Restoring the Reduced Primary Current in Case of Saturation of the Electromagnetic Current Transformer without Using the Saturation Curve

D. Yu. Vikharev^a, * and N. A. Rodin^a

^a *Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia*

**e-mail: dvikhareff@yandex.ru*

Saturation of current transformers is a problem that hasn't been completely solved to date. This phenomenon can lead to the failure of the some functions: non-operation in case of external short circuits and operation in case of internal short circuits. Recovery of the current curve when the current transformer saturates is the most promising and universal solution. The article presents an algorithm for restoring the reduced primary current when current transformer is saturated according to the parameters of the self-inductance of the secondary winding and the mutual inductance between the primary and secondary windings. A differential equation that describes the secondary current of current transformer in saturation was derived, an expression for restoring the reduced primary current was determined, and a method for determining the saturation section was presented. Experiments of both mathematical and physical modeling have been carried out, confirming the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: current transformer, saturation, algorithm, secondary current correction, recovery of secondary current