

Секция 7. СИСТЕМНАЯ АВТОМАТИКА, РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И ПРОТИВОАВАРИЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621-316.925

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Алексеева С.Ф.¹, Сиразутдинов Ф.Р.²

¹ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань

²ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

¹alekseevasonfar@mail.ru

Науч. рук. Исаков Р.Г.

Предложена модель трансформатора тока, учитывающая наличие гистерезиса в его характеристике намагничивания. Магнитная система моделируемого трансформатора тока задана в соответствии с ферромагнитной теорией Джилса-Атертона.

Ключевые слова: трансформатор тока, насыщение трансформатора тока.

Магнитопроводы защитных трансформаторов тока (ТТ) выполняются из ферромагнитного материала – электротехнической стали. Измерительные ТТ данного типа могут быть подвержены насыщению, что вносит нелинейные искажения в форму кривой вторичного тока.

Для анализа работы устройств релейной защиты (РЗ) в переходных режимах короткого замыкания в первую очередь необходимо разработать модель измерительных ТТ.

В общем случае, для моделирования вторичного тока в переходных режимах КЗ могут быть использованы следующие модели кривой намагничивания ТТ: кусочно-линейная аппроксимация; аналитическая нелинейная функция; гистерезисная кривая (модель Джилса-Атертона, модель Джона Чена).

В стандартных библиотеках программ моделирования и симулирования энергетических систем модели измерительных ТТ учитывают кривую насыщения трансформатора тока, благодаря чему можно отследить искажение формы вторичного тока ТТ при насыщении сердечника. Однако

подобные модели недостаточно корректно отображают работу трансформатора тока в переходных режимах короткого замыкания, так как не учитывают возможное наличие остаточной намагниченности в магнитопроводе ТТ.

Наиболее полный учёт физических свойств ферромагнетика осуществляет модель кривой намагничивания Джилса-Атертона (Jiles-Atherton method – далее *J-A*), основанной на уравнении энергетического баланса. Математическая модель гистерезиса в модели *J-A* позволяет учитывать остаточную намагниченность в сердечнике ТТ. Моделирование магнитного гистерезиса разделяется на два этапа. На первом этапе рассматривается безгистерезисная намагниченность M_{an} . Затем, на втором этапе, гистерезис описывается дифференциальным уравнением с учетом знака изменения напряженности магнитного поля H . Под безгистерезисной намагниченностью понимают значение намагниченности M_{an} в материале после процесса размагничивания ниже постоянного значения напряженности магнитного поля H . Зависимость намагниченности от приложенного постоянного поля носит название кривой бизгистерезисного или идеального намагничивания.

Гистерезис зависимости намагниченности M и магнитной индукции B ферромагнитного материала при изменении напряженности внешнего магнитного поля H в модели *J-A* описывается дифференциальными уравнениями, описывающими необратимый (1.1) и обратимый (1.2) процесс намагничивания:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{(M_{an} - M_{irr})}{\delta k / \mu_0 - \alpha (M_{an} - M_{irr})}; \quad (1.1)$$

$$\frac{dM_{rev}}{dH} = c \cdot \left(\frac{dM_{an}}{dH} - \frac{dM}{dH} \right). \quad (1.2)$$

С учётом того, что общая намагниченность представляет собой сумму необратимой и обратимой намагниченности, получим:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\delta_m}{(1+c)} \frac{(M_{an} - M_{irr})}{\delta k / \mu_0 - \alpha (M_{an} - M_{irr})} + \frac{c}{(1+c)} \frac{dM_{an}}{dH}. \quad (1.3)$$

Расчет петли магнитного гистерезиса требует начальных условий. Эти условия определены состоянием ненамагниченного материала: $M_{irr} = 0$ и $H = 0$.

Алгоритм вычисления общей намагниченности в модели Джилса-Атертона представлен на рис. 1. Существенный недостаток данной модели состоит в обязательном задании параметров магнитной системы трансформаторов тока, которые не являются паспортными данными.

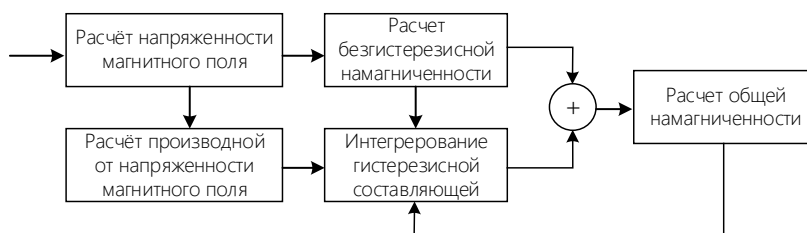


Рис. 1. Алгоритм реализации модели J-A

Моделирование работы трансформатора тока в переходных режимах с учетом насыщения и гистерезиса магнитного материала сердечника проводилось в среде MatLab/Simulink.

Результаты моделирования представлены на рис. 2. Уровень искажения синусоидальной кривой вторичного тока получен при условии, что постоянная времени затухания свободной апериодической составляющей тока $X / R = 10$, а отношение тока КЗ к номинальному току трансформатора тока $K_{MAX} = 10$.

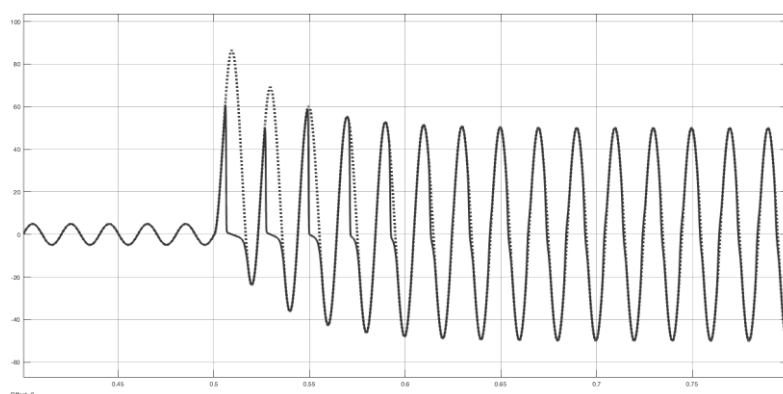


Рис. 2. Результаты моделирования для $X / R = 10$, $K_{MAX} = 10$

Параметры магнитной системы трансформатора тока соответствуют Fe 0,2 wt% C и приняты в соответствии с [1]:

– намагниченность насыщения $M_S = 1,5743 \cdot 10^6$ А/м;

- параметр, учитывающий эффективную напряженность магнитного поля в сердечнике $\alpha = 7,0921 \cdot 10^{-4}$ А/м;
- постоянная необратимой деформации доменных стенок – $k = 1154,6$;
- постоянная упругого смещения доменных единиц $c = 0,0198$.

Литература

1. Mathematical Model for Current Transformer Based On Jiles-Atherton Theory and Saturation Detection Method [Electronic resource]. URL: https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1093&context=ece_etds (date of the application: 04.09.2019).

УДК 621-313.3

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ СУЩЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ СИГНАЛА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Афонин И.И.

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

bkmz8991@mail.ru

Науч. рук. Хузяшев Р.Г.

Предложена блок-схема алгоритма, который определяет набор существенных признаков осциллограммы, полученной программно-аппаратным комплексом волнового определения места повреждения. Также представлены примеры обработки нескольких реальных осциллограмм в виде графиков и численных значений.

Ключевые слова: энергоэффективность, модель, волновое определение места повреждения, алгоритм, сигналы переходного процесса.

Тема работы связана с обработкой осциллограмм сигналов переходного процесса, зафиксированных программно-аппаратным комплексом волнового определения места повреждения [1]. Перед нами была поставлена цель: заменить осциллограмму набором численных значений существенных признаков [2]. Под существенными признаками мы понимаем размах амплитуды, начало сигнала переходного процесса, численное фиксированное приращение переднего фронта сигнала переходного процесса (величина ступеньки и время). По этим параметрам мы можем определить вид осциллограммы, которая связана с видом источника сигнала переходного процесса [3].