



Определение требуемого времени точной трансформации тока для корректной работы ДЗТ

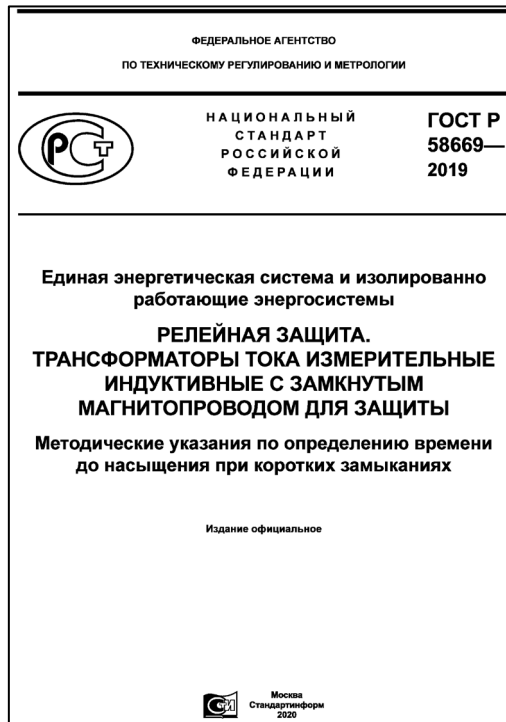
А.В. Панащатенко, к.т.н. А.А. Яблоков, А.Р. Тычкин
к.т.н. С.Е. Бобров, И.А. Галанин

Россия, г. Иваново
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», АО «РАДИУС Автоматика»

Правила технологического функционирования электроэнергетических систем требуют обеспечения корректной работы устройств РЗА в том числе в переходных режимах:

$$t_{\text{нас.ТТ}} \geq t_{\text{РЗ}}$$

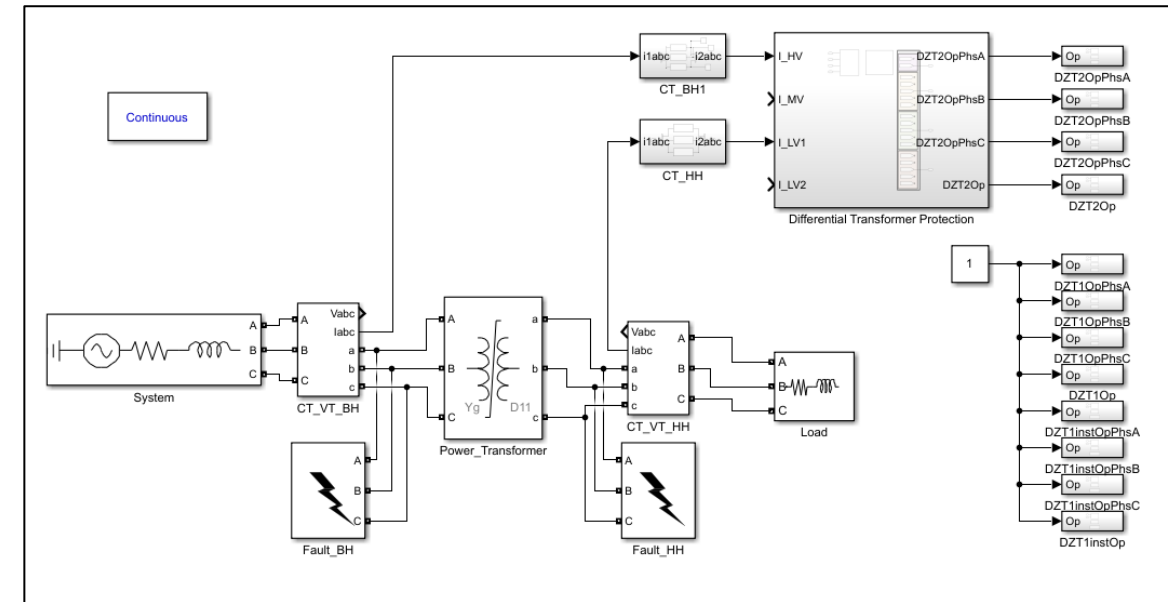
Для расчета $t_{\text{нас.ТТ}}$ есть методики расчета времени до насыщения ТТ



Методики определения требуемого времени точной трансформации тока для корректной работы УРЗА ($t_{\text{РЗ}}$) практически не представлены в научно-технической литературе.

В ходе работы была разработана и апробирована методика определения требуемого времени точной трансформации тока для УРЗА "Сириус-Т4-01" (ДЗТ) производства АО «РАДИУС Автоматика».

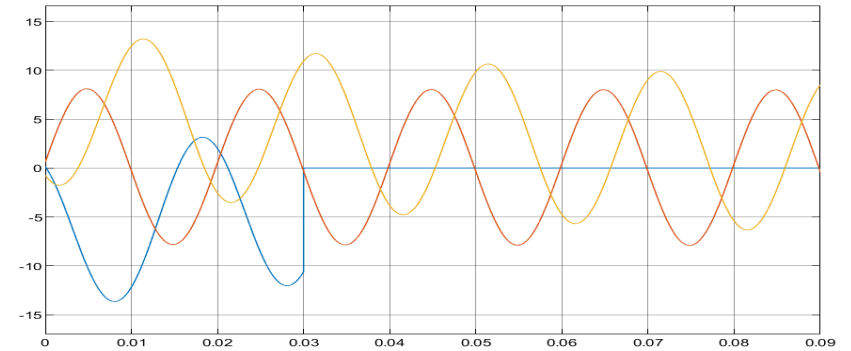
1. Выполнен комплекс исследований на верифицированных имитационных моделях электроэнергетического объекта, ТТ и терминала УРЗА в программном продукте MATLAB (с использованием приложения Simulink).
2. Подтверждение полученных на имитационной модели результатов путём воспроизведения отобранных осциллограмм токов на УРЗА и контроля ожидаемого поведения проверяемой функции.



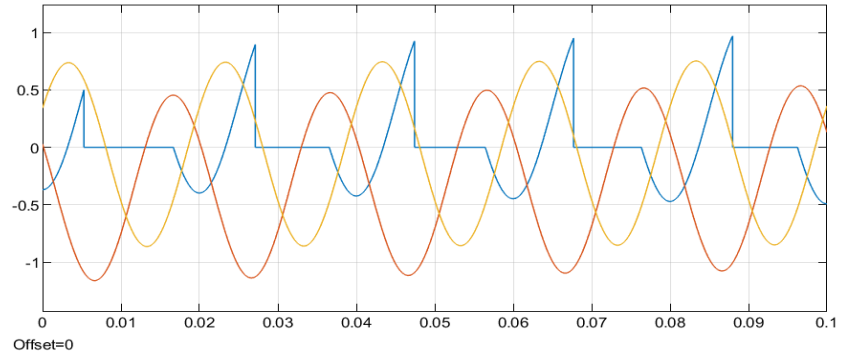
Испытательная схема в Simulink

Опыты были выполнены с тремя верифицированными моделями ТТ:

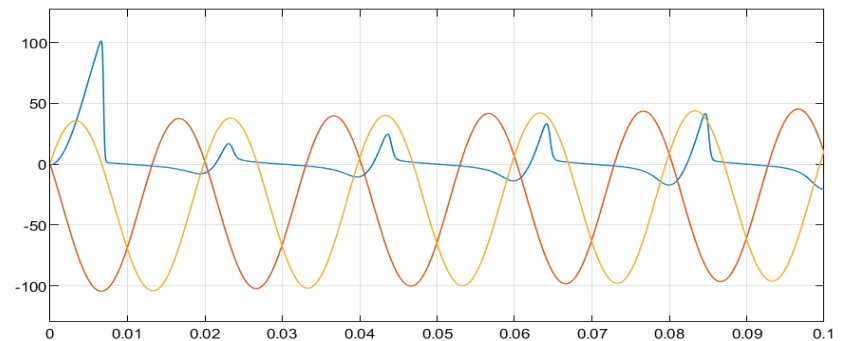
1. Модель ТТ с обнулением тока
2. Модель ТТ на основе ПХН
3. Модель ТТ на основе средней характеристики намагничивания $B(H)$



Обнуление



ПХН



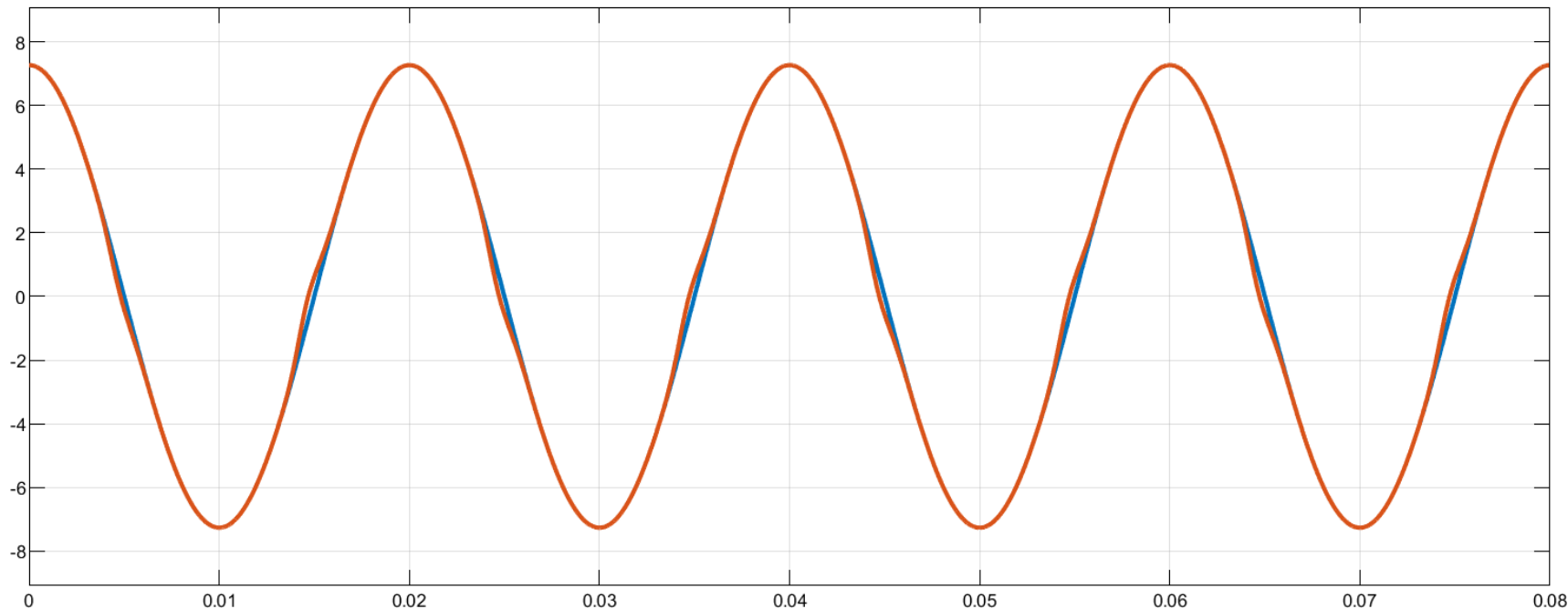
ВН

Для определения момента насыщения ТТ, был проведен сравнительный анализ более 40 критериев, среди которых:

1. Погрешность коэффициента преобразования тока по действующему значению 1 гармоники (1/5/10 %).
2. Полная погрешность преобразования тока, нормированная к действующему значению 1 гармоники (1/5/10 %).
3. Погрешность коэффициента преобразования тока по действующему значению полного спектра частот (1/5/10 %).
4. Угловая погрешность преобразования тока (60 угл. мин).
5. На основе индукции насыщения
 - определенная по критерию 10/50;
 - определенная по критерию 5/5;
 - определенная по паспортному значению коэффициента предельной кратности;
 - определенная по полному насыщению магнитопровода;
6. По величине тока намагничивания (10 %).
7. И многие другие ...

Наиболее близкие результаты к методике описанной в ГОСТ 58669 были получены для критерия по 10% мгновенной погрешности преобразования тока, нормированной к действующему значению 1 гармоники.

Параметры моделей подбирались таким образом, чтобы ТТ находился на границе симметричного насыщения при установившемся токе КЗ и номинальной нагрузке, это позволяло получать при варьировании параметров ТТ комбинации различных случаев с различными временами до насыщения ТТ.



Сопоставление приведенного первичного тока и вторичного тока модели, при выбранных параметрах ТТ

Для создания банка тестовых осциллограмм с различным временем до насыщения ТТ было изучено влияние нескольких факторов на насыщение ТТ:

1. Величина постоянной времени затухания апериодической составляющей в токе КЗ.
2. Величина остаточной намагниченности.
3. Величина подключенной нагрузки (в % от номинала).
4. Начальная фаза периодической составляющей первичного тока в момент возникновения КЗ.

Одна из таблиц с результатами изучения варьирования K_R

[illegible]

Для каждой серии испытаний с различными параметрами ТТ фиксировались:

1. Вид КЗ – однофазные и трехфазные КЗ
2. Место КЗ – внутренние и внешние КЗ
3. Количество насыщаемых фаз – случаи с насыщением одной, двух или трех фаз
4. Установившиеся значения тока КЗ в привязке к соответствующим величинам дифференциального тока защиты – 1 / 5 / 6 о.е.
5. Значения уставок для функций ДЗТ (варьируя кратности уставок к значению тока установившегося режима).

Для фиксированных параметров описанных выше варьировались параметры ТТ, для получения случаев с различными временами до насыщения:

1. Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ – 15, 30, 50, 75, 100, 300 мс.
2. Величина нагрузки подключенной к ТТ – от номинала до 30%.
3. Начальная фаза периодической составляющей первичного тока в момент возникновения КЗ – 0 – 0.005 мс.
4. Величина остаточной намагниченности – 0 – 95 %.

Варьирование параметров позволяло получать различные случаи насыщения ТТ в диапазоне от 0 мс до $t_{\text{ср}}$.

Полученные осциллограммы вторичных токов воспроизводились на имитационной модели терминала с контролем правильности его работы (при этом был выполнен учет наличия фазового выравнивания), таким образом были получена информация о временах до насыщения ТТ, при которых проверяемый алгоритм корректно выполняет свои функции.

Время до насыщения, мс	Индикация срабатывания защиты	Время срабатывания защиты, мс	Вид КЗ	Фаза, мс	T_A , с	K_R , о.е.	$Z_{наг}$, Ом
6.8	0	0	1	0.000556	0.3	0.9	2
6.8	0	0	1	0.000556	0.3	0.95	2
6.9	0	0	1	0	0.3	0.35	1.5
7	0	0	1	0	0.3	0.1	2
7	0	0	1	0	0.3	0.55	1
7.1	0	0	1	0	0.3	0.05	2
7.1	0	0	1	0	0.3	0.3	1.5
7.3	0	0	1	0	0.3	0	2
7.3	0	0	1	0	0.3	0.25	1.5
7.3	0	0	1	0	0.3	0.5	1
7.5	0	0	1	0	0.3	0.2	1.5
7.5	0	0	1	0	0.3	0.45	1
7.6	0	0	1	0	0.3	0.15	1.5

Пример таблицы анализа работы защиты для различных времен до насыщения ТТ

1. С целью группового запуска расчетов описываемые в методике эксперименты были оформлены в виде программного кода (скрипта), обращающегося к имитационной модели в программном комплексе MATLAB / Simulink.
2. Учитывая вычислительную сложность и объем проводимых экспериментов, их запуск осуществляется одновременно на нескольких ядрах процессора (параллельные вычисления) используемого компьютера.
3. Для осуществления расчетов в общей сложности использовалось 5 ноутбуков с многоядерными процессорами Intel Core i7 и 1 ноутбук с многоядерными процессорами Intel Core i9.
4. Проверка полученных времен была осуществлена посредством воспроизведения полученных осциллограмм вторичного тока для граничных случаев с использованием управляемого источника тока подключенного к реальному терминалу.

1. Разработаны и верифицированы имитационные модели ТТ.
2. Исследованы критерии насыщения ТТ.
3. Исследованы факторы используемые для варьирования с целью получения различных времен до насыщения ТТ.
4. Разработана методика определения требуемого времени точной трансформации на основе граничного условия по симметричному насыщению ТТ и варьирования параметров его функционирования.
5. Получены и подтверждены времена требуемые для корректной работы УРЗА ДЗТ АО «Радиус Автоматика» в различных режимах.

6. Не менее важно то, что помимо определения требуемого времени до насыщения дополнительно был выполнен анализ работы алгоритма в различных переходных режимах и выработаны рекомендации по его совершенствованию.
7. Варьирование K_R необходимо для уменьшения шага дискретизации по времени до насыщения для получаемых тестовых случаев.
8. Варьирование $Z_{\text{НАГР}}$ в сторону уменьшения от номинального значения позволяет получать случаи с большим временем насыщения ТТ до $t_{\text{ср}}$

9. Результаты эксперимента показали необходимость варьирования начальной фазы периодической составляющей первичного тока в момент возникновения КЗ поскольку были обнаружены случаи для которых при прочих равных условиях защита срабатывала при нулевом значении фазы (момент КЗ в момент времени, когда напряжение равно 0) и не срабатывала при других значениях фазы. Дополнительно варьирование фазы позволяет увеличить дискретность при получении тестовых случаев.

Время до насыщения, мс	Индикация работы защиты	Время срабатывания, мс	Вид КЗ	Фаза, с	Значение T_a , с	Кг, %	Нагрузка, Ом
4.8	1	17	3	0	0.3	0	3.5
4.8	1	16.5	3	0.000278	0.3	0	3.5
4.8	1	15.5	3	0.001944	0.3	0	3.5
4.8	0	0	3	0.003889	0.3	0	3.5
4.8	0	0	3	0.004167	0.3	0	3.5
4.8	0	0	3	0.004444	0.3	0	3.5
4.8	0	0	3	0.004722	0.3	0	3.5

1. Тестирование алгоритмов других защит производства АО «Радиус Автоматика».
2. Оптимизация скриптов с целью ускорения проводимых расчетов.
3. Разработка критериев учитывающих не только время насыщения ТТ, но и величину искажения (форму вторичного тока при насыщении ТТ).