

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАБЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В.А. ШУИН, В.Д. ЛЕБЕДЕВ, Г.А.ФИЛАТОВА

Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ)

Россия

shuin@rza.ispu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Электрические сети 6-10 кВ, защита от замыканий на землю, кабельные трансформаторы тока нулевой последовательности, математическое моделирование

1. ВВЕДЕНИЕ

Защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6-10 кВ по цепям тока подключаются к кабельным трансформаторам тока нулевой последовательности (ТТНП) различных типов (ТЗ, ТЗЛ, ТЗЛМ, ТЗРЛ и др.), часто работающих с большими вторичными нагрузками. В сетях, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, основное применение получили токовые и токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТЗНП и ТНЗНП), основанные на использовании токов и напряжений промышленной частоты. В компенсированных сетях 6-10 кВ в основном применяются защиты от ОЗЗ, основанные на использовании высших гармоник (ВГ) установившегося режима замыкания или электрических величин переходного процесса. Для защит, основанных на использовании различных составляющих тока установившегося режима ОЗЗ (токов промышленной частоты, высших гармоник), токи переходного процесса являются помехами, оказывающими влияние на динамическую устойчивость их функционирования (устойчивость в условиях влияния на работу релейной защиты электромагнитных переходных процессов [1], для защит, основанных на использовании переходных процессов – информационными сигналами. Вопросы работы указанных выше ТТНП в переходных режимах, а также на высших гармониках, особенно при больших вторичных нагрузках, исследованы недостаточно. Наиболее эффективным методом исследования как динамических, так и статических режимов работы различных устройств защиты от ОЗЗ является математическое моделирование на ЭВМ. Поэтому разработка математических моделей ТТНП различных типов для исследования особенностей функционирования защит от ОЗЗ в переходных режимах и на высших гармониках является, наш взгляд, актуальной задачей.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

О подходах к построению математической модели ТТНП. В большинстве случаев для построения математической модели нелинейного электротехнического устройства, содержащего магнитопровод из электротехнической стали, принято использовать основную кривую намагничивания (ОКН) [1]. В работах НПИ (ЮРГТУ) показано [2], что при необходимости максимально точного отображения не только интегральных, но и мгновенных значений вторичного тока при моделировании трансформаторов тока необходимо использовать средние кривые намагничивания (СКН).

В работе исследованы три подхода к построению математической модели ТТНП, основанных, соответственно:

- на использовании основной кривой намагничивания (ОКН) магнитопровода ТТНП;
- на использовании средней кривой намагничивания (СКН) магнитопровода ТТНП;

- с использованием уравнения динамики перемagnetивания магнитопроводов, предложенного в [1]:

$$\frac{dB}{dt} = r \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2} \right) (H(t) - H_{cm}) \quad (1)$$

в котором в качестве статической характеристики H_{cm} используется СКН.

Математическая модель ТТНП на основе ОКН. Точность такой математической модели существенно повышается, если использовать экспериментально снятую ОКН ТТНП. С учетом этого в работе использовалась полученная экспериментально с применением программно-инструментального комплекса NI LabView и источника первичного синусоидального тока ОКН наиболее широко применяемого в защитах от ОЗЗ ТТНП типа ТЗЛМ.

С использованием ОКН по рис. 1 в программном комплексе Matlab+Simulink с использованием стандартного блока трансформатора с нелинейным магнитопроводом была разработана модель ТТНП. Схема модели ТТНП в системе Matlab для исследования различных режимов работы приведена на рис. 1.

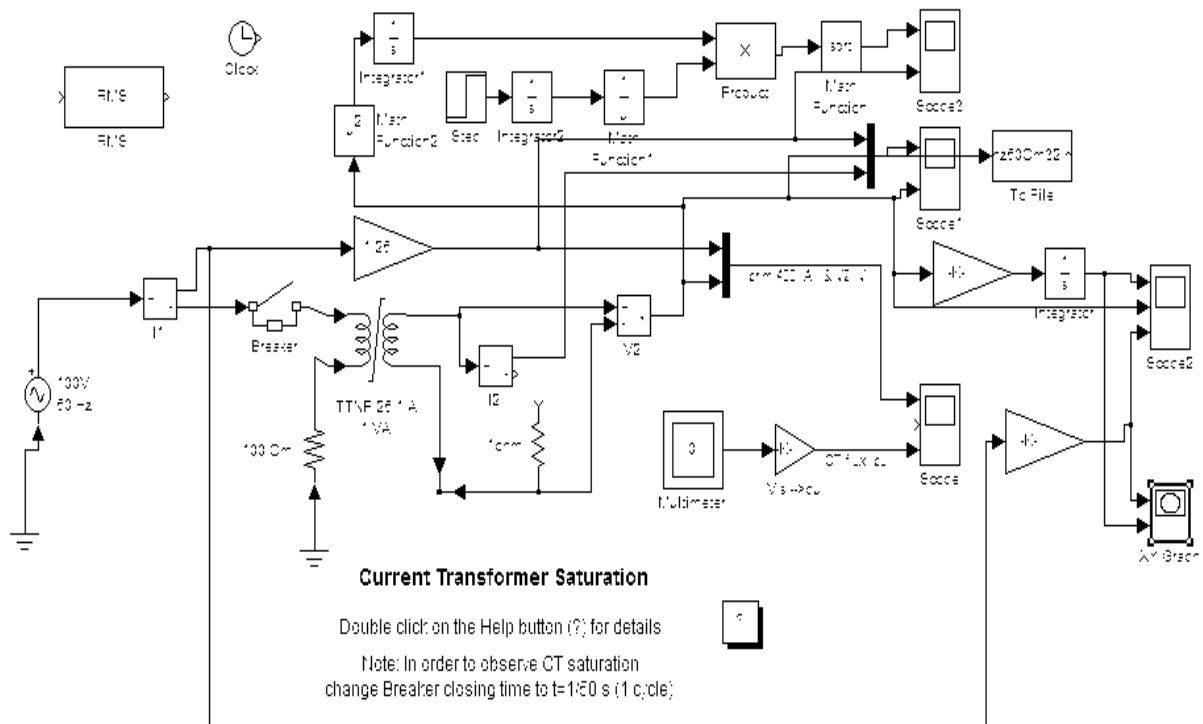


Рис. 1: Модель ТТНП в программном комплексе Matlab+Simulink

Для оценки точности модели ТТНП на основе ОКН в системе Matlab были сняты осциллограммы вторичных напряжений и зависимости среднеквадратичных значений вторичного напряжения от первичного тока ТТНП $U_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$ при синусоидальном первичном токе в диапазоне от $I_{1ТТНП} = 1...30$ А и диапазоне частот $f = 50...500$ Гц в режиме холостого хода и при сопротивлении вторичной нагрузки $R_H = 1$ Ом. Полученные на модели осциллограммы и зависимости сравнивались с аналогичными осциллограммами и зависимостями $U_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$, полученными экспериментально для реального образца ТТНП типа ТЗЛМ с использованием программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ (например, табл. 1).

Анализ данных табл. 1 показывает, что модель ТТНП на основе ОКН при работе ТТНП в режиме холостого хода обеспечивает приемлемые погрешности (до ~10%) по интегральным (среднеквадратичным) значениям вторичного напряжения только при работе на линейном участке

ОКН ($I_{1ТНП} = 3...10 \text{ А}$). При этом погрешности по мгновенным значениям могут значительно превышать 10% (например, рис. 2), что обуславливает возможность значительных искажений спектра высших гармоник вторичного напряжения. Поэтому модель ТТНП на основе ОКН неприемлема для исследования режимов функционирования защит от ОЗЗ на основе ВГ или электрических величин переходного процесса.

При работе ТТНП с нагрузкой $R_H \leq 1 \text{ Ом}$ токовая погрешность уменьшается до единиц процентов, т.е. модель ТТНП на основе ОКН обеспечивает приемлемую точность в рассмотренном выше диапазоне первичных токов.

Таблица 1: Экспериментальные и расчетные зависимости $U_{2ТНП} = f(I_{1ТНП})$ на частоте $f = 50 \text{ Гц}$

$I_{1ТНП}, \text{ А}$	$U_{2ТНП}, \text{ В}$	$U_{2\text{модель}}, \text{ В}$	Погрешность, %
3,00	1,09	1,87	71,56
5,00	2,70	3,15	16,67
7,00	4,20	4,15	-1,19
9,00	5,20	4,92	-5,38
11,00	5,64	5,66	0,35
13,00	5,89	6,22	5,60
15,00	6,03	6,68	10,78
17,00	6,13	7,11	15,99
19,00	6,20	7,48	20,65

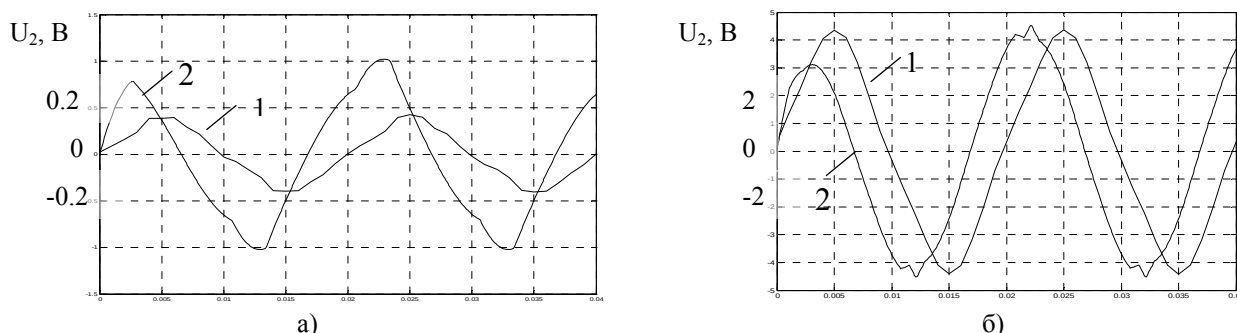


Рис.2: Сравнение экспериментально полученных осциллограмм $U_{2ТНП}(t)$ (кривая 1) и осциллограмм, полученных для модели ТТНП на основе ОКН (кривая 2):
а – $I_{1ТНП} = 1 \text{ А}$; б – $I_{1ТНП} = 5 \text{ А}$

Математическая модель ТТНП на основе СКН. Основной недостаток данного подхода – необходимость использования семейства СКН, соответствующих различным значениям тока намагничивания. Для построения модели на основе СКН использовались петли гистерезиса магнитопровода ТТНП типа ТЗЛМ, полученные экспериментально с помощью программно-инструментального комплекса NI LabView и источника первичного синусоидального тока на частоте $f = 50 \text{ Гц}$ в режиме источника тока при значениях первичного тока $I_{1ТНП} = 1...30 \text{ А}$. Математические модели ТТНП на основе СКН в системе моделирования Matlab аналогичны модели на основе ОКН (рис. 1).

Точность полученных моделей ТТНП на основе СКН оценивалась сравнением осциллограмм вторичных напряжений $U_{2ТНП}(t)$, полученных экспериментально и на моделях для различных значений первичного тока $I_{1ТНП} = 1...30 \text{ А}$ в режиме холостого хода трансформатора тока (например, рис.3).

Анализ полученных данных показал, что модели ТТНП на основе СКН обеспечивают значительное уменьшение как токовых, так и угловых погрешностей по сравнению с моделью на ос-

нове ОКН. Следует отметить, что с насыщением магнитопровода ТТНП погрешности модели на основе СКН возрастают. Как и для модели на основе ОКН, уменьшение вторичной нагрузки ТТНП обеспечивает существенное снижение токовой и угловых погрешностей.

Математическая модель ТТНП на основе уравнения динамики перемагничивания магнитопроводов. В основе данной модели лежит уравнение динамики перемагничивания (1), предложенное в [1], в котором в качестве статической характеристики H_{cm} используется усредненная СКН, полученная как аппроксимация частных СКН для разных значений первичного тока ТТНП. Потери в стали сердечника на гистерезис и вихревые токи учитывались в модели упрощенно постоянным сопротивлением, подключенным параллельно ветви намагничивания, что, как показали исследования, в основном и являлось основным фактором, обуславливающим погрешности рассматриваемой модели (рис. 4).

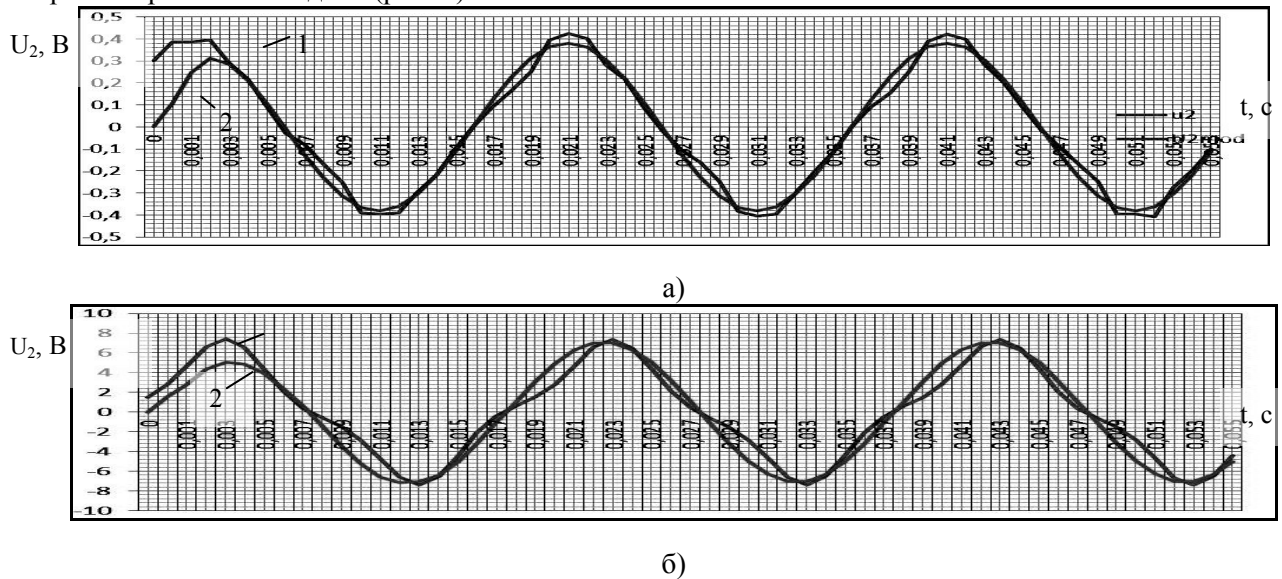
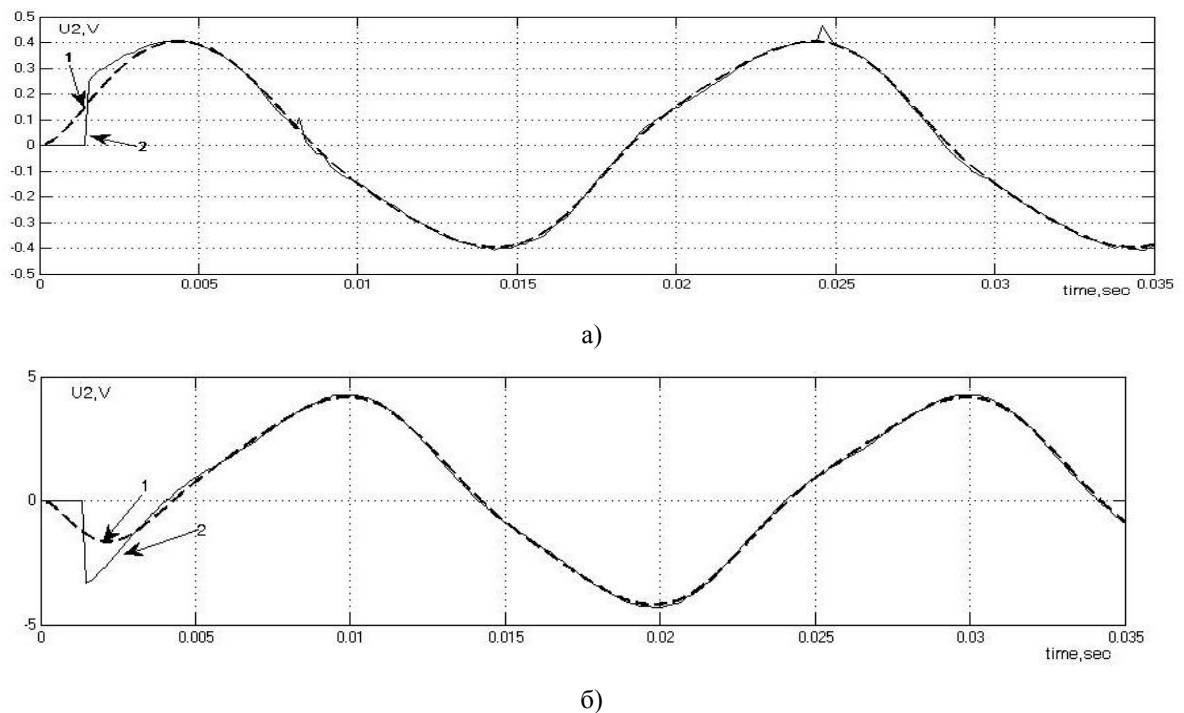
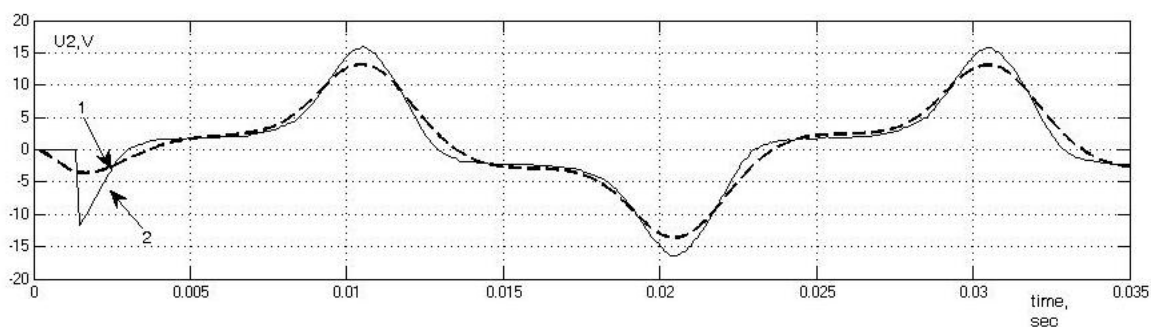


Рис. 3: Сравнение экспериментальных осциллограмм $U_{2ТТНП}(t)$ и осциллограмм, полученных для моделей ТТНП на основе СКН (кривая 2): а – $I_{ТТНП} = 1$ А; б – $I_{ТТНП} = 7$ А





в)

Рис. 4: Сравнение экспериментальных осциллограмм $U_{2TTP}(t)$ (кривая 2) и осциллограмм, полученных для моделей ТТП на основе уравнения динамики (кривая 1):

$$а - I_{1TTP} = 1 \text{ A}; б - I_{1TTP} = 5 \text{ A}; в - I_{1TTP} = 10 \text{ A}$$

Анализ показал, что модель на основе уравнения динамики перемагничивания (1) при работе ТТП с вторичной нагрузкой $R_n \leq 1$ Ом обеспечивает приемлемые погрешности (до 10-15%) как в установившихся, так и в переходных режимах ОЗЗ.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Модель ТТП на основе ОКН в режиме холостого хода дает приемлемые погрешности (до ~10%) для интегральных (среднеквадратичных) значений вторичного напряжения только на линейном участке кривой намагничивания.

2. При работе ТТП с нагрузкой токовая погрешность модели на основе ОКН уменьшается до единиц процентов.

3. Погрешности модели по п. 1 по мгновенным значениям могут значительно превышать 10%, что обуславливает возможность значительных искажений спектра высших гармоник вторичного напряжения при работе ТТП с большой нагрузкой.

4. Модели ТТП на основе СКН и уравнения динамики перемагничивания (1) обеспечивают снижение токовой и угловой погрешностей как по интегральным, так и по мгновенным значениям вторичного напряжения в режиме холостого хода до 10% и обеспечивают существенное уменьшение погрешностей по мгновенным значениям в диапазоне первичных токов ТТП от 1 до 15 А. При работе ТТП с вторичной нагрузкой погрешности указанных моделей на основе СКН не превышают 10%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кадочников А.И. Динамические петли магнитного гистерезиса. Екатеринбург, 2007.
- [2] Подгорный Э. В., Хлебников С. Д. О выборе расчетной характеристики трансформаторов тока в переходных режимах // Электричество. 1966. № 9. С 87-90. [6] Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. – 2000, № 1. – С. 20-22.
- [3] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996