

ООО Научно-производственная фирма «Квазар»
(ООО НПФ «Квазар»)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В РЕЖИМАХ С ГЛУБОКИМ НАСЫЩЕНИЕМ МАГНИТОПРОВОДОВ

С.Л. КУЖЕКОВ, А. А. ДЕГТЯРЁВ ООО НПФ «Квазар», Россия

P. FORSYTH, C. PETERS RTDS Technologies Ltd
J. ZAKONJSEK, М.А. ШАМИС, Ф. А. ИВАНОВ ЭнЛаб, Россия

Новочеркасск 2015

НАСЫЩЕНИЕ СЕРДЕЧНИКОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Трансформаторы тока (ТТ) с замкнутыми сердечниками в настоящее время являются одними из основных датчиков информации для релейной защиты и автоматики.

Нагрузка на ТТ выбирается по условию 10%-ной или 5%-ной погрешности.

В переходных режимах КЗ с наличием значительной апериодической составляющей в первичном токе и остаточной магнитной индукции в сердечниках ТТ, совпадающей по знаку с направлением перемагничивания, погрешности ТТ могут существенно превышать 10%.

В стандартах США и Великобритании нормировано минимальное время насыщения ТТ в переходном режиме, равное 2 мс.

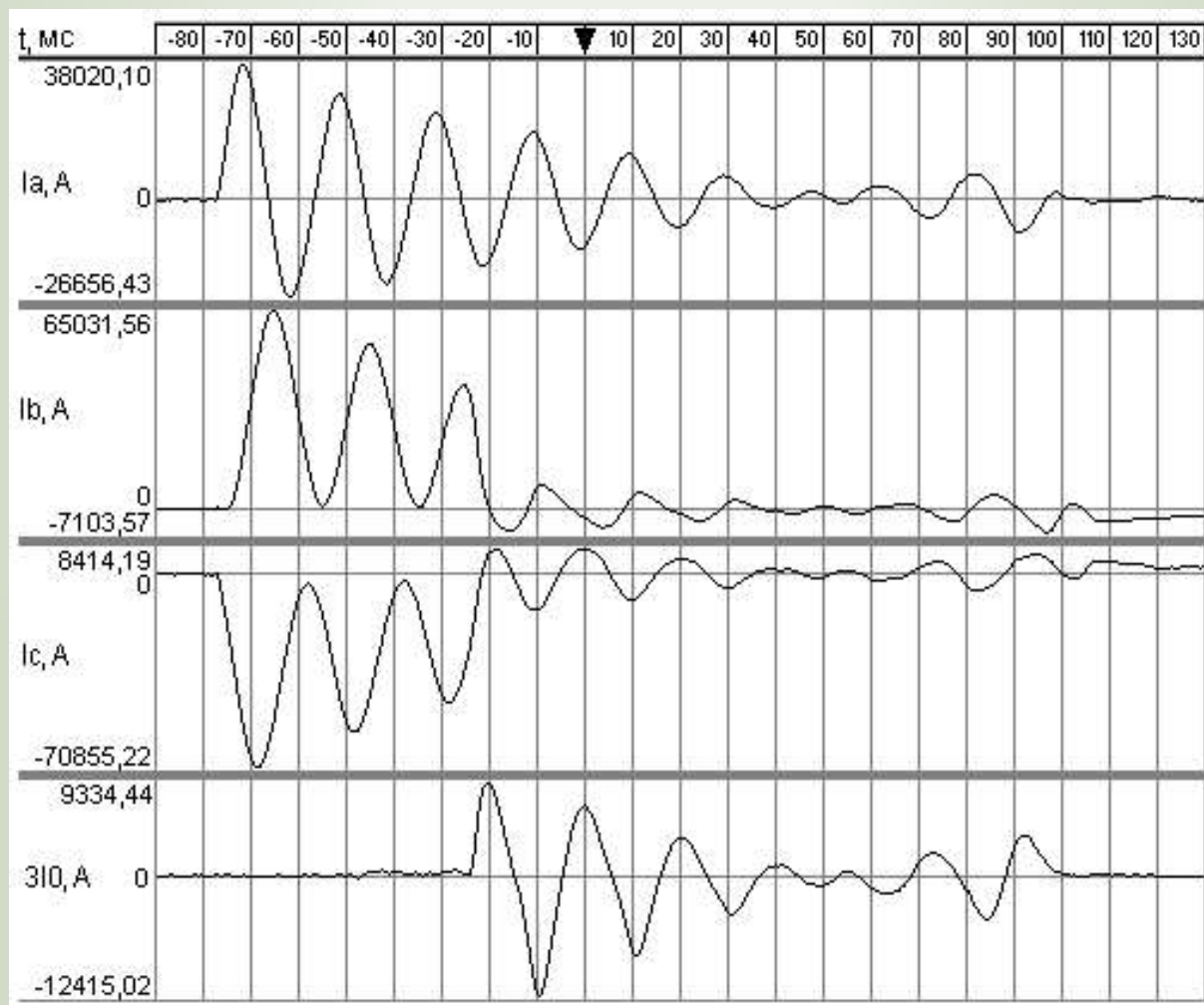
ОСНОВНЫЕ СЛУЧАИ, ПРИ КОТОРЫХ ПОЯВЛЯЮТСЯ АПЕРИОДИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

- неуспешное автоматическое повторное включение ;
- внезапное КЗ вблизи сборных шин крупных электростанций;
- несинхронные включения генераторов.

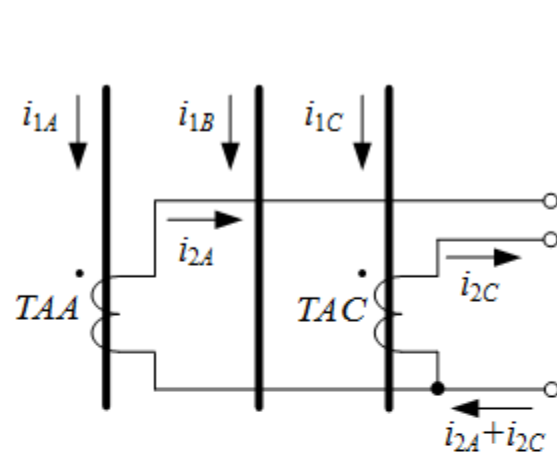
Исследования [НПИ, ВНИИЭ] показали, что вероятность больших начальных значений апериодической составляющей составляет 0,1 и менее.

Однако при КЗ вблизи крупных электростанций вероятность насыщения ТТ и уровень токов КЗ выше, чем даёт статистический анализ. По указанной причине такие КЗ целесообразно выделять в отдельную группу и учитывать возможность насыщения ТТ.

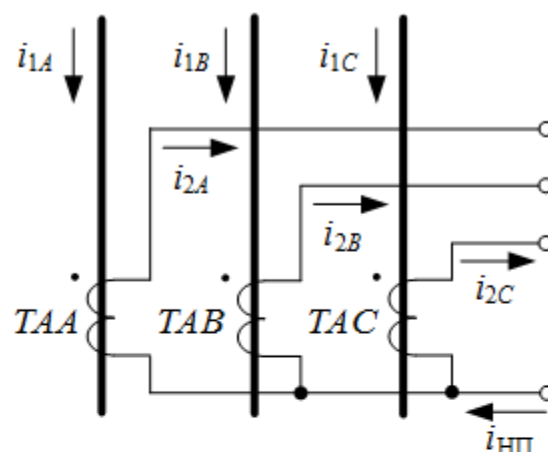
ЛОЖНОЕ СРАБАТЫВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ БЛОКА ГЕНЕРАТОР- ТРАНСФОРМАТОР ПРИ НЕПРАВИЛЬНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ



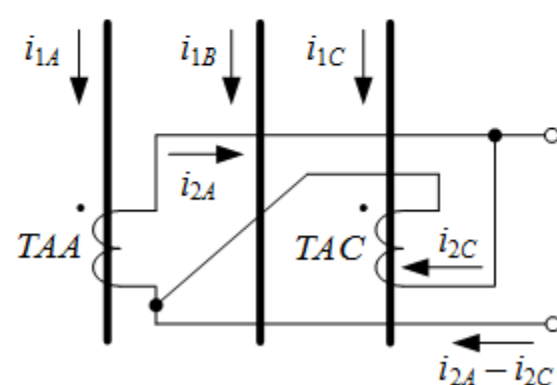
ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА



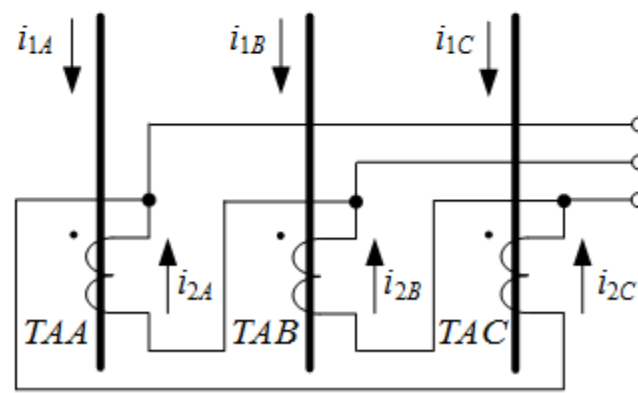
а)



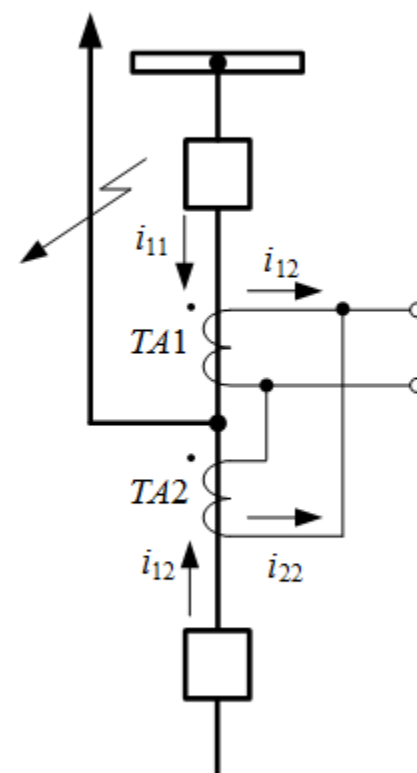
б)



в)

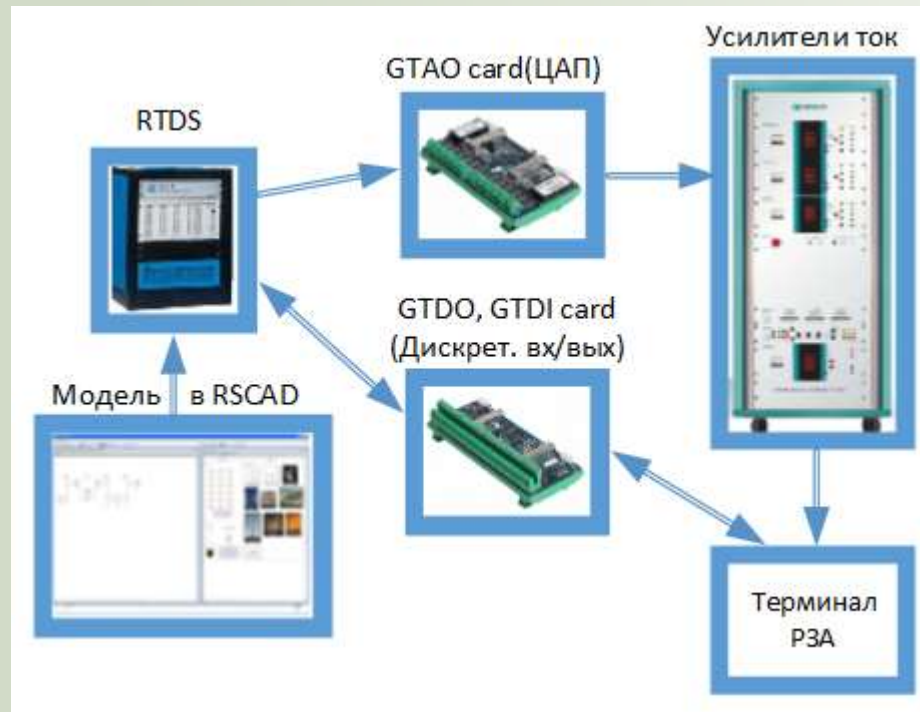


г)



д)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В RTDS Simulator



- Наиболее удобно проводить исследование влияния процессов на работу устройств РЗ с помощью программно-аппаратных комплексов, к выходам которых подключены устройства защиты.
- В RTDS Simulator моделирование ТТ производится с использованием модели гистерезиса Jiles D.C., Atherton D.L.
- Достоинствами указанной модели являются возможность реализации частных циклов перемагничивания, высокая точность и устойчивость решения.
- В библиотеке RSCAD отсутствуют модели групп ТТ.

НЕУЧЕТ ЧАСТНЫХ ЦИКЛОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ

▣ В условиях насыщения сердечников ТТ, как показали исследования, проведенные в Новочеркасском политехническом институте профессором А. Д. Дроздовым и его учениками С.Д. Хлебниковым и Э.В. Подгорным, допустимо не учитывать частные циклы перемагничивания сердечников ТТ и использовать однозначную характеристику намагничивания.

Указанное допущение дает потенциальную возможность производить в реальном времени расчеты процессов в ТТ с учетом их взаимного влияния при соединении в группы.

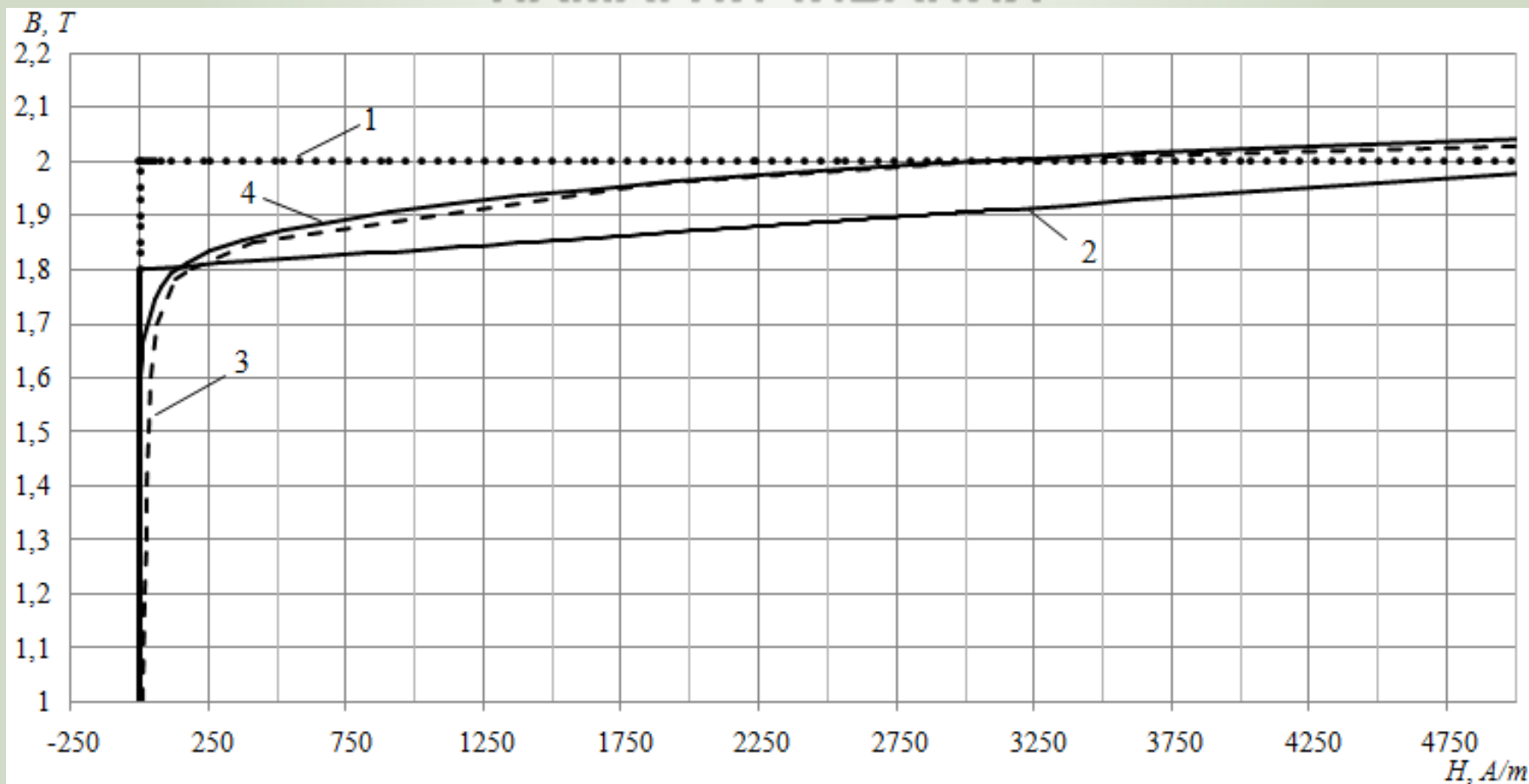
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель – разработка библиотеку программ расчета процессов в одиночном ТТ и их группах.

Задачи:

- выбрать и обосновать расчетные характеристики намагничивания ТТ;
- предложить критерии применимости однозначных характеристик намагничивания ТТ;
- разработать математические модели ТТ и их групп;
- выбрать численный метод расчета вторичных токов моделей ТТ;
- разработать компьютерные программы расчета процессов в ТТ и их группах;
- оценить погрешность, обусловленную неучетом неоднозначности характеристики намагничивания.

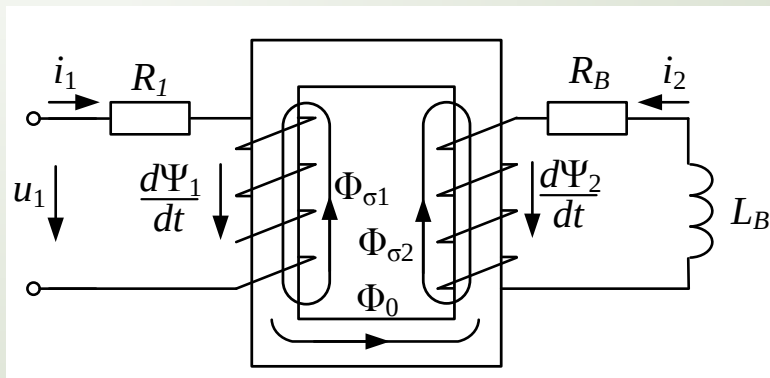
ОДНОЗНАЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ



Однозначные характеристики намагничивания:

- 1 – прямоугольная; 2 – спрямленная; 3 – средняя;
- 4 – нисходящая ветвь предельной петли гистерезиса

ДОПУЩЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТТ



Трансформатор тока

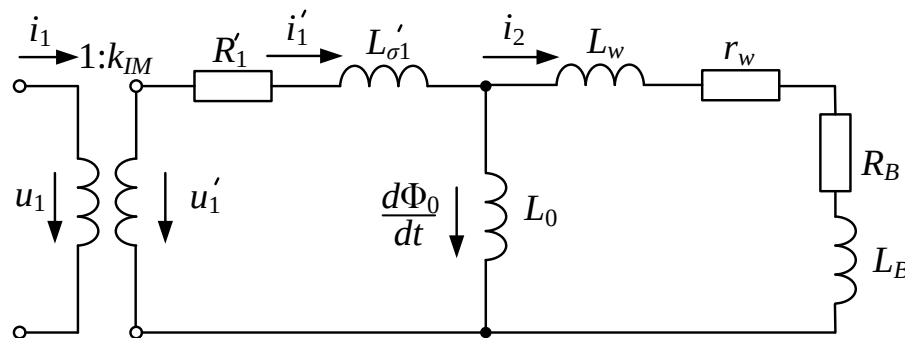
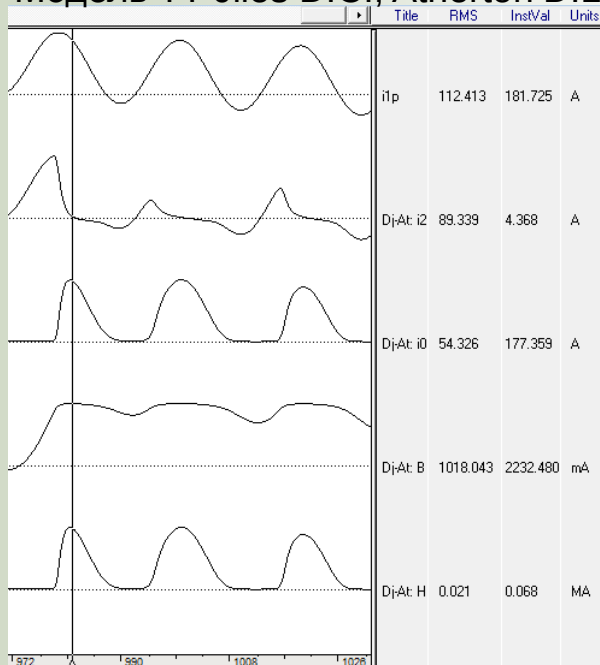


Схема замещения ТТ

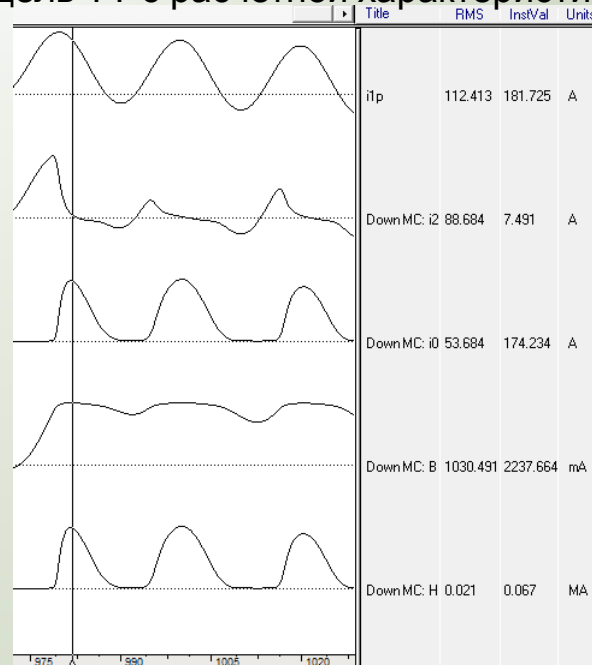
- сложная картина магнитного поля заменена суммой трех магнитных потоков: Φ_0 — основной магнитный поток (взаимной индукции), $\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$ — потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток;
- потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$ пропорциональны первичному i_1 и вторичному i_2 токам, соответственно, и, следовательно, постоянны индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток;
- активные сопротивления потерь на гистерезис и вихревые токи не учитываются.

ОЦЕНКА НЕТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ВТОРИЧНОГО ТОКА ТТ

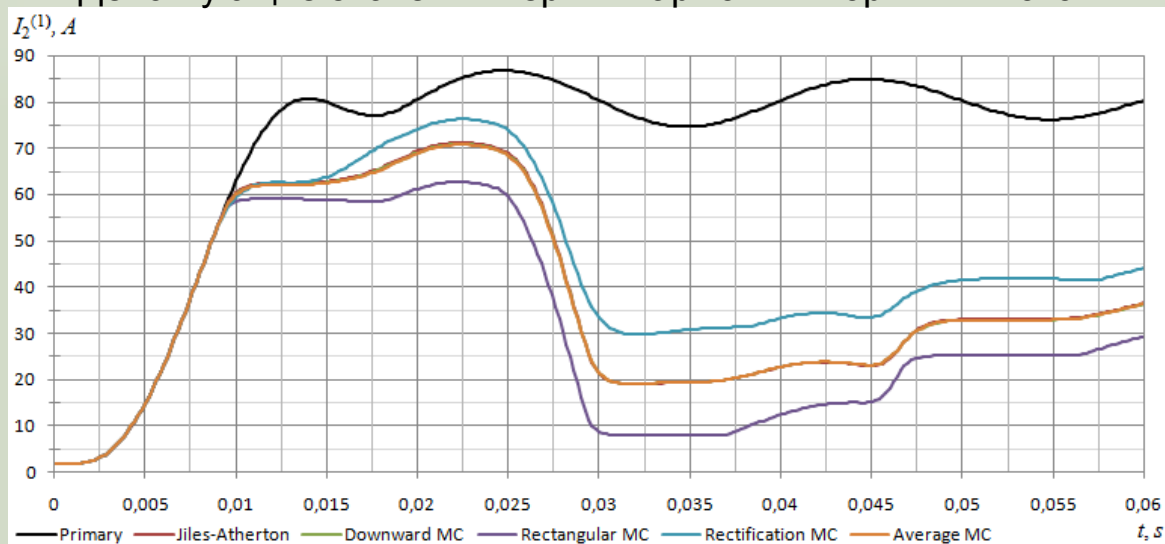
Модель ТТ Jiles D.C., Atherton D.L



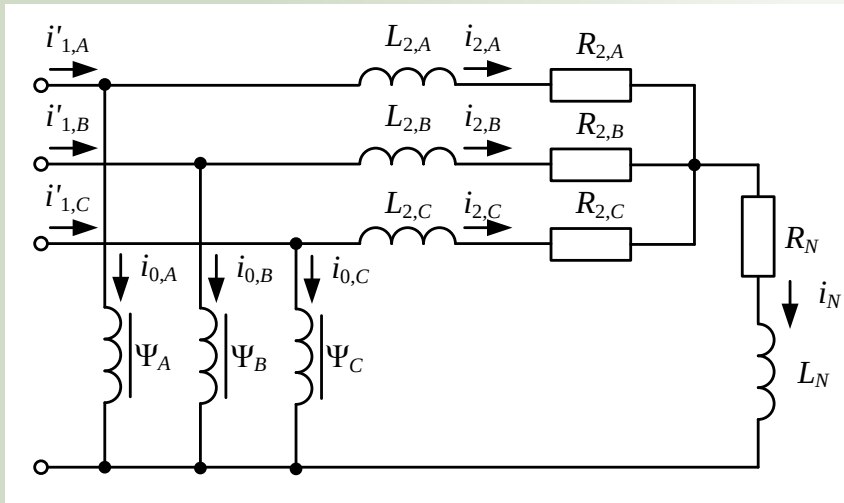
Модель ТТ с расчетной характеристикой



Действующие значения первых гармоник вторичных токов



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУППЫ ТТ, СОЕДИНЕННОЙ В ЗВЕЗДУ



где $j = A, B, C$;

W_2 – число витков вторичной обмотки ТТ;

S – сечение магнитопровода ТТ;

B – магнитная индукция;

R_2 – суммарное активное сопротивление (обмотки, соединительных проводников, переходного сопротивления контактных соединений и нагрузки) вторичной цепи;

i_2 – вторичный ток ТТ;

L_2 – суммарная индуктивность (обмотки и нагрузки) вторичной цепи;

$i'_{1,j}$ – первичный ток ТТ, приведенный ко вторичной цепи;

i_0 – намагничивающий ток ТТ;

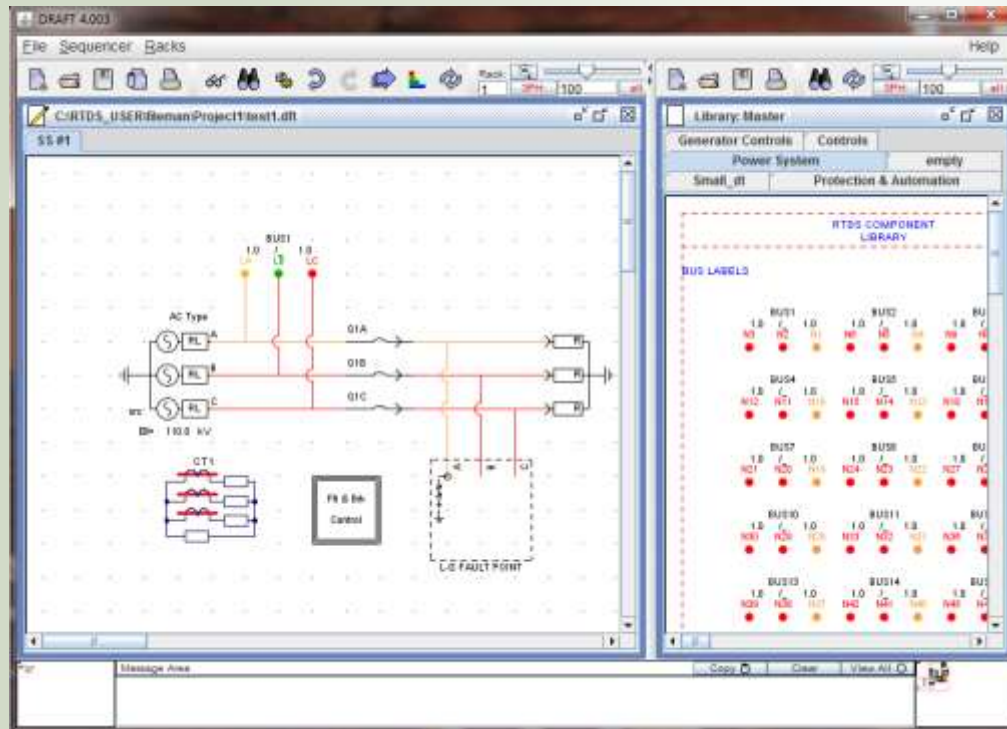
R_N – активное сопротивление общей нагрузки;

i_N – общий ток (ток в нулевом проводе);

L_N – индуктивность общей нагрузки.

$$\begin{cases} W_{2,j} S_j \frac{dB_j}{dt} = R_{2,j} i_{2,j} + L_{2,j} \frac{di_{2,j}}{dt} + R_N i_N + L_N \frac{di_N}{dt}; \\ i_{2,j} = i'_{1,j} - i_{0,j}; \\ i_N = \sum_{j=A,B,C} i_{2,j}; \\ B_j = B_{0,j} + \frac{1}{W_{2,j} S_j} \left[R_{2,j} \int_0^t i_{2,j} dt + L_{2,j} i_{2,j} + R_N \int_0^t i_N dt + L_N i_N \right]; \\ i_{2,j} = i'_{1,j} - \frac{l_j}{W_{2,j}} H(B); \\ i_N = \sum_{j=A,B,C} i_{2,j}. \end{cases}$$

ЭЛЕМЕНТ БИБЛИОТЕКИ ГРУППЫ ТТ ДЛЯ RSCAD



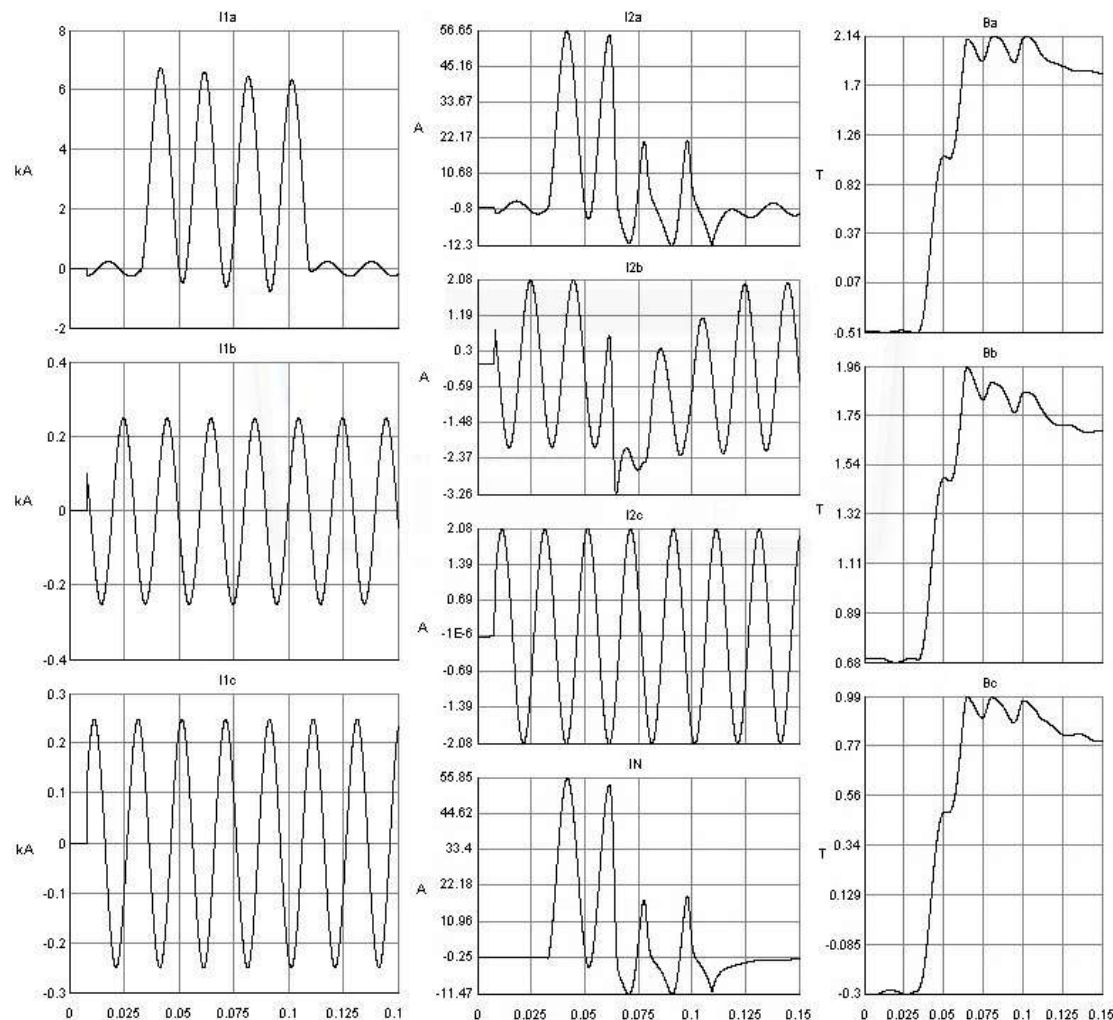
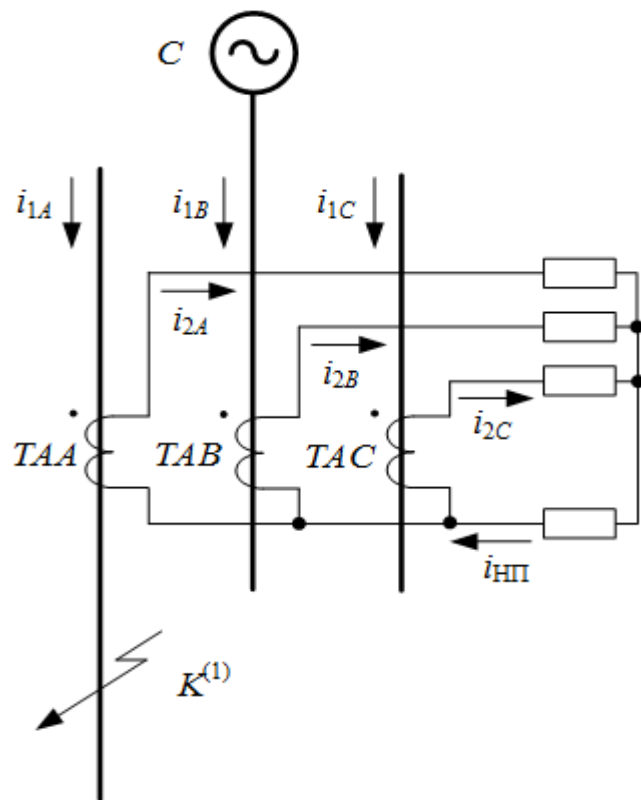
Параметры модели группы ТТ

Моделирование группы ТТ, соединенной по схеме звезда

KVZ_CT_Yn.def					
B1b,H1b ... Bnb,Hnb		B1c,H1c ... Bnc,Hnc		Common wire	
Output signals CTA		Output signals CTB		Output signals CTC	
CONFIGURATION		Main Data CTA		Main Data CTB	
				B1a,H1a ... Bna,Hna	
				Main Data CTC	
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
ISIGa	Primary current signal name	I1a			
Sa	Cross-sectional area	1.91e-3	m ²		
lma	Path length	0.935	m		
B0a	Initial flux	0	T		
W1a	The number of turns of the winding 1	3			
W2a	The number of turns of the winding 2	359			
R2a	The total resistance of the secondary circuit and load CT	10.01	Ohm		
L2a	The total inductance of the secondary circuit and load CT	1.0E-2	H		
nHBa	Number of samples of the curve H (B)	32		8	32

Update Cancel Cancel All

ВОЗМОЖНОСТЬ НАСЫЩЕНИЯ СЕРДЕЧНИКА ТТ, НЕ ОБТЕКАЕМОГО ТОКОМ КЗ



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны математические модели групп ТТ со схемами соединения: звезда, неполная звезда, треугольник, последовательное и параллельное соединения ТТ, схемы на разность (сумму) токов, дифференциальных схем (однофазной и трехфазной).

Разработан и проверен элемент библиотеки RSCAD – модель группы ТТ, соединенная в звезду.

Направление дальнейшей работы заключается в доработке разработанных программ расчета к виду, соответствующему требованиям к элементам библиотеки RSCAD.