

УДК 621.314.21:004.94

UDC 621.314.21:004.94

4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1 – Technologies, machines and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАТОРА

SIMULATION MODELING OF TRANSITIONAL PROCESSES TRANSFORMERS

Баракин Николай Сергеевич
к.т.н., доцент
Scopus Author ID: 57200150182
SPIN-код: 2129-5026

Barakin Nikolai Sergeevich
Cand.Tech.Sci., docent
Scopus Author ID: 557200150182
RSCI SPIN-code: 2129-5026

Гранкина Наталия Александровна
к.т.н., доцент
SPIN-код: 8782-5062

Grankina Natalia Alexandrovna
Cand.Tech.Sci., docent
SPIN-code: 8782-5062

Усков Антон Евгеньевич
старший преподаватель
SPIN-код: 7461-9490

Uskov Anton Evgenievich
senior lecturer
Spin-code 7461-9490

Григорьев Дмитрий Витальевич
студент
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Grigoriev Dmitry Vitalievich
Student
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Имитационное моделирование силового трансформатора позволит эффективно изучать переходные процессы токов и напряжений. Разработанная модель основана на известной Т-образной схеме замещения и позволит рассмотреть броски токов и фиксировать их в виде осциллограммы. Кроме того модель позволит рассчитать характеристику холостого хода, нагрузочную характеристику, рассмотреть режим короткого замыкания. Полученные данные удобно сравнивать с экспериментально полученными осциллограммами, так как по сути разработанная модель имитирует физический эксперимент. Практическая значимость работы состоит в анализе переходных процессов, понимании физики явлений, происходящих в трансформаторе при включении и оценке их влияния на работу релейной защиты и других элементов энергосистемы. Полученные знания и навыки могут быть применены при проектировании и эксплуатации электротехнического оборудования не только студентами, но и специалистами, инженерами

Simulation modeling of a power transformer will make it possible to effectively study transient current and voltage processes. The developed model is based on the well-known T-shaped equivalent circuit and will allow us to examine current surges and record them in the form of an oscillogram. In addition, the model will make it possible to calculate the no-load characteristic, the load characteristic, and to examine the short-circuit mode. The obtained data can be conveniently compared with experimentally obtained oscillograms, since, in essence, the developed model simulates a physical experiment. The practical significance of the work lies in the analysis of transient processes, the understanding of the physics of phenomena occurring in a transformer during startup, and the assessment of their impact on the operation of relay protection and other elements of the power system. The knowledge and skills obtained can be applied in the design and operation of electrical equipment not only by students, but also by specialists and engineers

Ключевые слова: СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, БРОСОК ТОКА, ОСЦИЛЛОГРАММА, СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Keywords: POWER TRANSFORMER, IMITATION MODEL, TRANSIENT PROCESSES, CURRENT SURGE, OSCILLOGRAM, REPLACEMENT SCHEME

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-221-004>

<http://ej.kubagro.ru/2026/07/pdf/04.pdf>

Введение. Разработка лабораторных работ для изучения переходных процессов в электротехнике связано с определенными сложностями – для проведения натурного эксперимента необходимо использовать дорогостоящее электрооборудование и регистрирующих приборов (например, осциллограф), так из-за наличия высокого напряжения эксперимент для исследования силового трансформатора становится опасным и с точки зрения электробезопасности студенты должны иметь необходимую группу по электробезопасности.

Имитационное моделирование позволяет виртуально проводить эксперимент с электрооборудованием, который в реальности достаточно сложно подготовить [1]. Студент получает возможность в реальном времени изменять параметры схемы силового трансформатора, такие как момент включения, остаточная индукция в сердечнике или сопротивление нагрузки, и мгновенно наблюдать реакцию трансформатора на осциллографе имитационной модели. Имитационное моделирование даёт студенту возможность детально рассматривать переходные процессы тока и напряжения силового трансформатора.

Цель исследований. Разработать компьютерную имитационную модель исследования силового трансформатора на основе Т-образной схемы замещения в программной среде динамического моделирования SimInTech для исследования переходных процессов токов и напряжения.

Для реализации этой цели решались задачи по определению параметров имитационной модели Т-образной схемы замещения трансформатора и учета нелинейности его сердечника, а также проведения натурного эксперимента с трансформатором меньшей мощности, но который покажет типовой характер переходного процесса напряжения и тока во вторичной обмотке трансформатора при набросе и отключении нагрузки.

Материалы и методы исследований. Общеизвестно, что наличие сердечника в трансформаторе вносит определённые свойства, которые

необходимо учитывать и которые должна отражать имитационная модель. При больших токах магнитная проницаемость μ падает, что приводит к снижению индуктивности L , а при больших напряжениях сердечник входит в насыщение, что вызывает резкое увеличение тока первичной обмотки. Зависимость $B(H)$ нелинейна и неоднозначна, что вызывает дополнительные потери энергии.

Для исследования переходных процессов силового трансформатора возможно записать систему уравнений [2]:

$$\begin{aligned}u_1 &= I_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\-u_2 &= I_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}\end{aligned}$$

Взаимоиндуктивность при этом возможно определить по известной формуле [2]:

$$M = k_c \sqrt{L_1 L_2}$$

где L_1, L_2 - полные индуктивности обмоток, M - взаимная индуктивность, u_1, u_2 - напряжения на первичной и вторичной обмотке; I_1, I_2 - ток первичной и вторичной обмотки.

Учет нелинейности и эффекта насыщения силового трансформатора достаточно сложен. Известная Т-образная схема [3] замещения силового трансформатора позволяет заменить магнитную связь между элементами на электрическую. Разрабатываемая имитационная модель силового трансформатора (рисунок 1) содержит первичную обмотку (активное сопротивление R_1 и индуктивность L_1), вторичную обмотку (активное сопротивление R_2 и индуктивность L_2), контур намагничивания (активное сопротивление R_m и индуктивность L_m). Причем зависимость индуктивности L_m от приложенного напряжения от источника U формируется функцией в блоке программирования PL, выходной сигнал которого (зна-

чение индуктивности L_m) записывается в базу сигналов. В блоке индуктивности L_m прописывается переменная из базы сигналов, таким образом формируется индивидуальная характеристика намагничивания силового трансформатора (в модели $L_m = U/2\pi f I_0$, где I_0 – ток холостого хода). Коэффициент трансформации ($K_T=25$) закладывается в блок идеальный трансформатор.

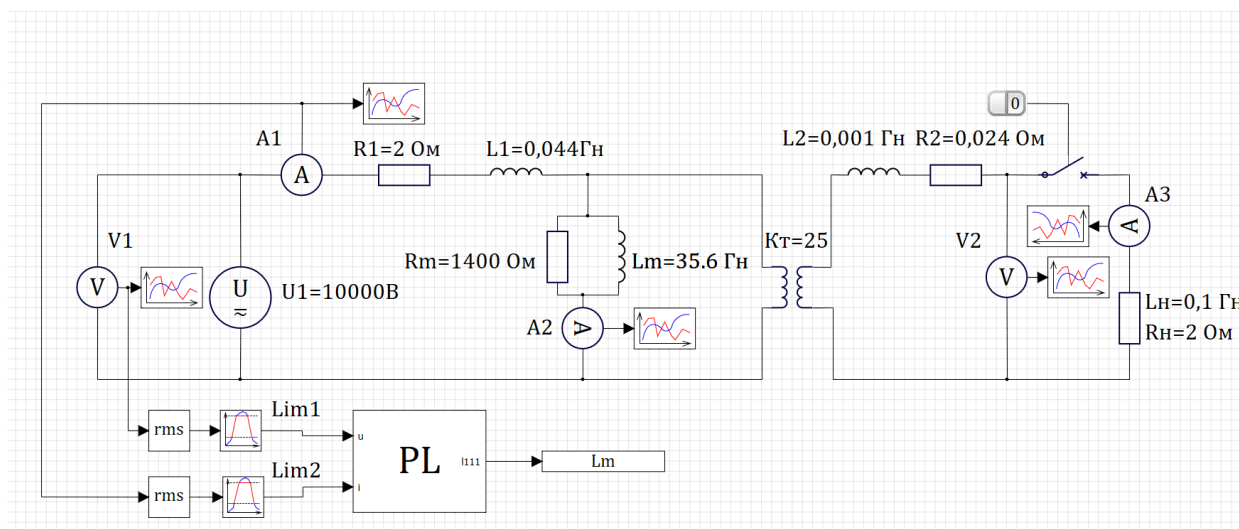


Рисунок 1 – Имитационная компьютерная модель исследования переходных процессов силового трансформатора.

Вспомогательные блоки RMS преобразуют сигнал от амперметра и вольтметра в среднеквадратичное, а блоки Lim исключают нулевые значения, т.е. случай в уравнении, исключающий деление на ноль.

В имитационной модели рассматривается случай с нагрузкой в виде индуктивности $L_n=0,1$ Гн и активного сопротивления $R_n=2$ Ом. Результатом является переходный процесс напряжения и тока нагрузки (Рисунок 2 и 3), на котором виден наибольший бросок тока (в 1,9 больше тока нагрузки).

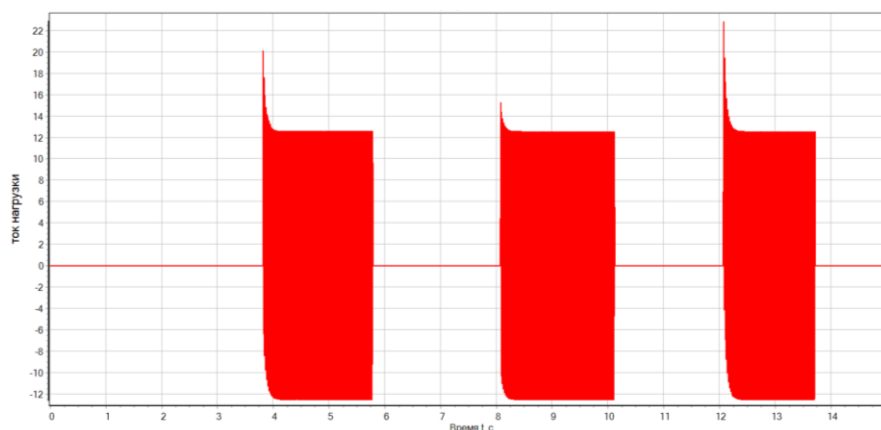


Рисунок 2 – Временной график переходного процесса тока нагрузки силового трансформатора.

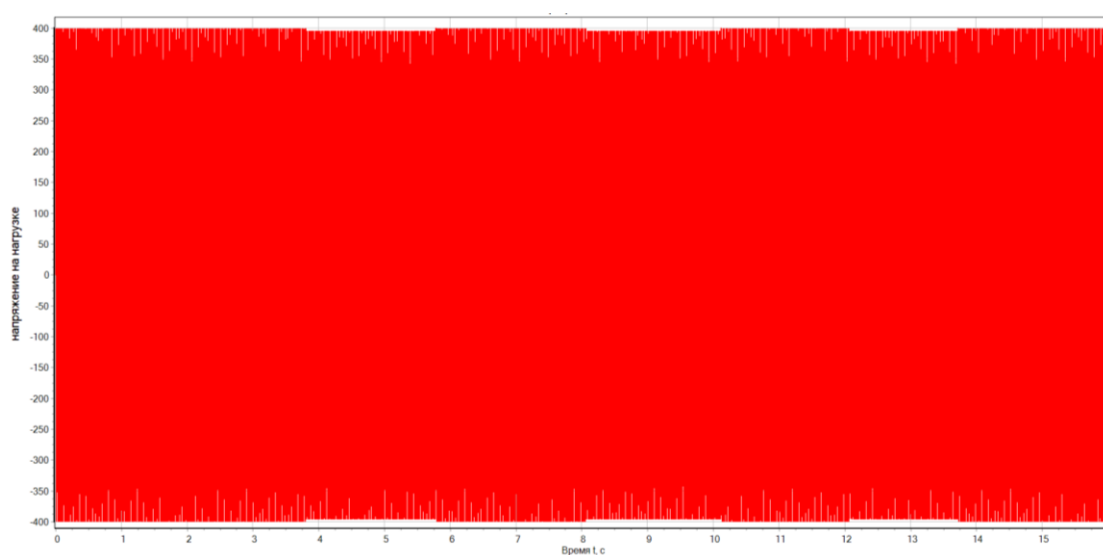


Рисунок 3 – Временной график переходного процесса выходного напряжения силового трансформатора.

Так как ток нагрузки можно описать уравнением

$$i = i_y + i_{св} = I_{mn} \sin(\omega t + \psi - \varphi_n) - I_{mn} \sin(\psi - \varphi_n) e^{-t/\tau}$$

где i_y , $i_{св}$ – ток установившейся и свободный; I_{mn} – амплитудное значение тока нагрузки; ψ – начальная фаза; φ_n – фазовый сдвиг.

Наихудший случай (максимальный бросок тока) наступает, когда свободная составляющая максимальна, то есть при $\sin(\psi - \varphi_n) = 1$. Студенты могут увидеть влияние начальной фазы напряжения на переходный процесс тока нагрузки и определить условия максимального броска тока и минимального значения.

Результаты исследований. Физический эксперимент возможно в учебных целях провести на трансформаторе меньшей мощности (рисунок 4). Для этого в эксперименте используется ЛАТР TSGC2 мощностью 3 кВА. Подключается осциллограф через шунт (1,5 А, 75 мВ), настраивается на режим однократного запуска. Синхронизация настраивается по фронту сигнала тока (канал 1 – 500 мВ/дел, кратность сигнала делителя 1) и напряжения (Канал 2 – 100 В/дел, кратность сигнала делителя на 10). Для удобства записи нескольких значений переходного процесса выставлялось время 1 с/дел.

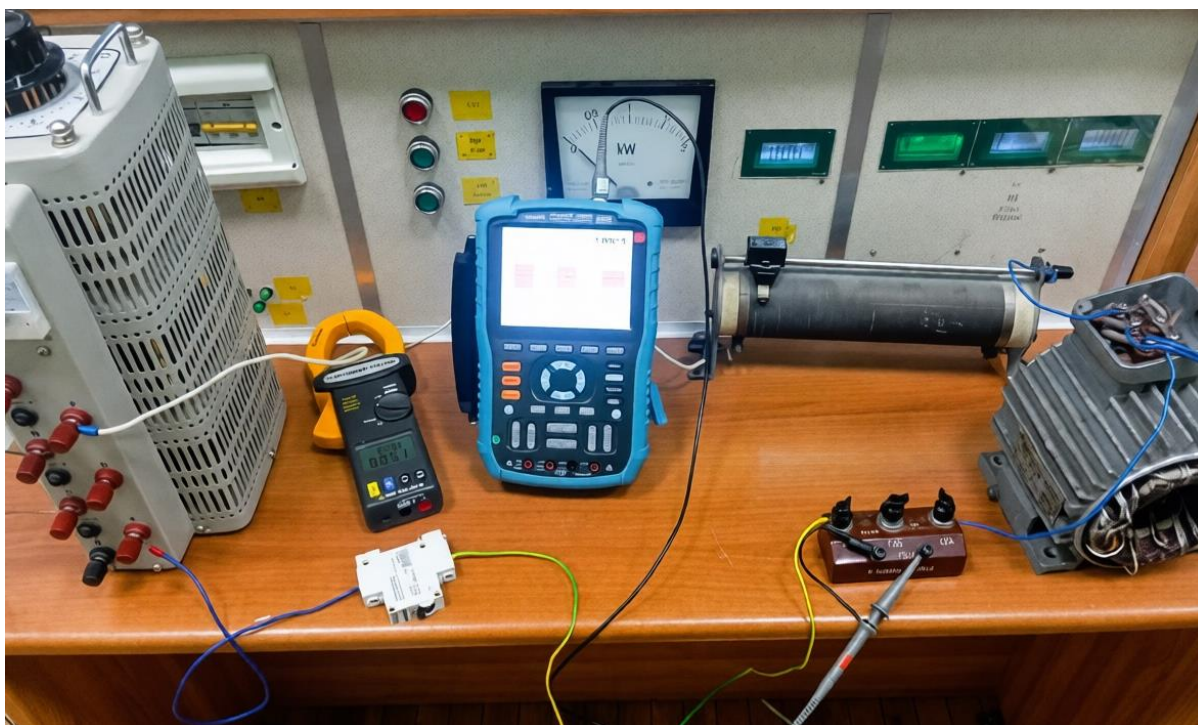


Рисунок 4 – Экспериментальный стенд для исследования переходного процесса авто-трансформатора.

В качестве нагрузки используется реостат на 30 Ом, 5 А и в качестве индуктивной нагрузки используется обмотка электродвигателя. (рисунок 5). Осциллограф в эксперименте используется двухканальный поэтому получены осциллограммы тока и напряжения на одном снимке, ток в цепи контролировался токовыми клещами АТК.

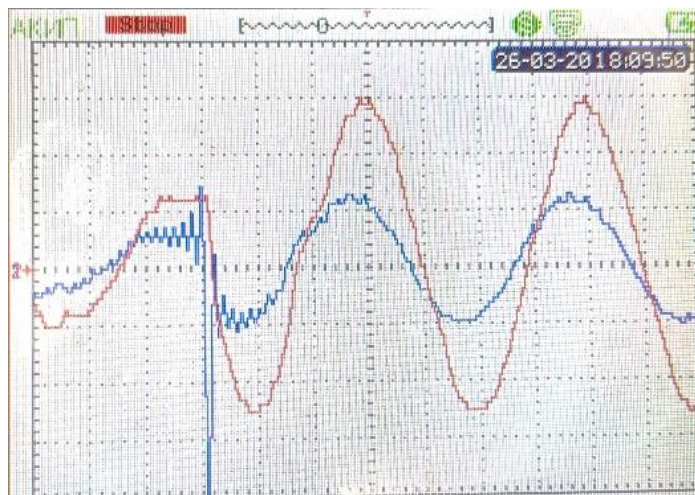


Рисунок 5 – Осциллограмма тока переходного процесса автотрансформатора (первый канал тока 5 А/дел, второй канал напряжения 100 В/дел).

Для удобства сравнения с имитационной моделью снята осциллограмма тока в цепи вторичной обмотки (рисунок 6) при периодическом включении и выключении нагрузки, на которой виден бросок тока (в 2,6 больше тока нагрузки).

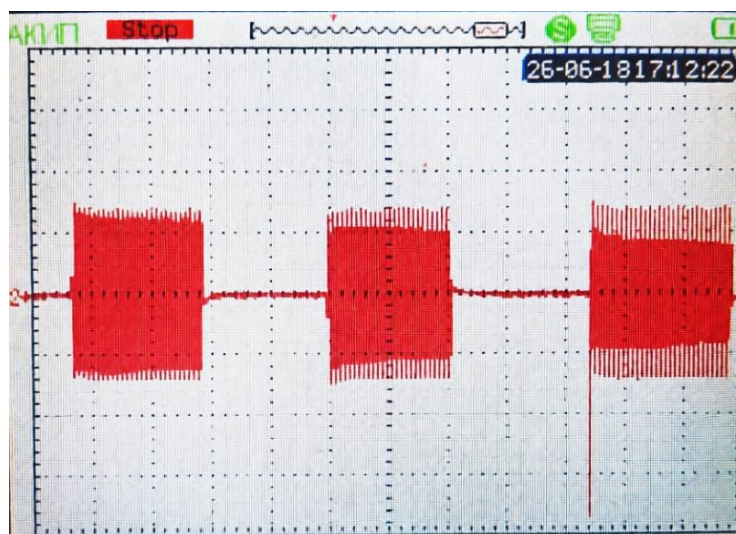


Рисунок 6 – Осциллограмма тока переходного процесса автотрансформатора (5 А/дел, 250 мс/дел) .

Выводы. Таким образом разработана имитационная модель силового трансформатора на основе известной Т-образной схемы позволяет определять токи и напряжения в первичной и вторичной обмотках, а также в контуре намагничивания. В модели реализован эффект насыщения сердечника. В учебных целях такая модель позволяет закрепить теоретически по-

лученные данные с расчетными. Далее проверить характер переходных процессов возможно экспериментально (бросок тока в модели – в 1,9 больше тока нагрузки, а в эксперименте – в 2,6 больше тока нагрузки).

Библиографический список

1. Баракин, Н. С. Компьютерная модель SIMINTECH иммитирующая короткое замыкание в линии электроснабжения 0,4 КВ / Н. С. Баракин, А. Е. Усков, Н. А. Гранкина, Д. А. Шаповалов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 211. – С. 218-228. – DOI 10.21515/1990-4665-211-020.
2. Кислицын, А. Л. Трансформаторы : учебное пособие / А. Л. Кислицын. — Ульяновск : УлГТУ, 2001. — 76 с.
3. Трансформаторы : учебное пособие для студентов вузов / под ред. И. П. Копылова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Энергоатомиздат, 2003. — 464 с.

References

1. Barakin, N. S. Komp'yuternaja model' SIMINTECH immitirujushhaja korotkoe замыкание в линии jelektrosnabzhenija 0,4 KV / N. S. Barakin, A. E. Uskov, N. A. Grankina, D. A. Shapovalov // Politematicheskij setевой jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. – № 211. – S. 218-228. – DOI 10.21515/1990-4665-211-020.
2. Kislicyn, A. L. Transformatory : uchebnoe posobie / A. L. Kislicyn. — Ul'ja-novsk : UIGTU, 2001. — 76 s.
3. Transformatory : uchebnoe posobie dlja studentov vuzov / pod red. I. P. Kopylo-va. — 2 e izd., pererab. i dop. — Moskva : Jenergoatomizdat, 2003. — 464 s.