

УДК 621.318.4:621.311.001.57:004.94
DOI



CC BY 4.0

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ ТРЕХСТЕРЖНЕВОГО ДРОССЕЛЯ

¹Буш С. В., ¹Ковалев В. З., ^{2,3}Хамитов Р. Н.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск, Российская Федерация,
e-mail: bush.sergej111@gmail.com;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Российская Федерация;

³Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация

В работе рассматривается задача идентификации параметров обмотки трехфазного силового дросселя, используемого в составе физической модели потребителя электроэнергии комплекса полунатурного моделирования автономных систем электроснабжения. Для решения задачи применяется метод затухания постоянного тока, основанный на анализе переходного процесса в активно-индуктивной цепи. Разработан автоматизированный алгоритм обработки экспериментальных данных, включающий предобработку сигнала, коррекцию нулевого уровня, выделение информативного участка и аппроксимацию зависимости тока во времени экспоненциальной функцией. Оценка параметров модели осуществляется методом наименьших квадратов с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта. Отдельное внимание также уделено оценке устойчивости процедуры идентификации, анализу качества аппроксимации и изменению эквивалентной индуктивности при различных уровнях начального тока. Проведены серии экспериментальных исследований с использованием аппаратно-программного комплекса ПАК-ИП/10. Показано, что предложенный подход обеспечивает достаточную точность определения эквивалентной индуктивности обмотки в широком диапазоне токов при квазистационарных режимах эксплуатации трехстержневых дросселей. Полученные результаты расширяют возможности экспериментальной идентификации параметров индуктивных элементов и могут быть использованы при формировании физических моделей потребителей энергии после дополнительной валидации и при учёте нелинейности дросселя.

Ключевые слова: метод затухания постоянного тока, идентификация параметров, силовой дроссель, обработка экспериментальных данных, индуктивность, аппроксимация, полунатурное моделирование, гибридные энергетические системы

AUTOMATED SYSTEM FOR IDENTIFICATION OF WINDING PARAMETERS OF A THREE-LEG CORE REACTOR

¹Bush S. V., ¹Kovalev V. Z., ^{2,3}Khamitov R. N.

¹Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Ugra State University”, Khanty-Mansiysk, Russian Federation,
e-mail: bush.sergej111@gmail.com;

²Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Tyumen Industrial University”, Tyumen, Russian Federation;

³Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Omsk State Technical University”, Omsk, Russian Federation

The paper addresses the problem of identifying the winding parameters of a three-phase power reactor used as part of a physical load model within a hardware-in-the-loop simulation complex for autonomous power supply systems. The solution is based on the direct current decay method, which relies on the analysis of the transient process in an RL circuit. An automated algorithm for processing experimental data has been developed, including signal preprocessing, baseline correction, extraction of the informative segment, and approximation of the current–time dependence by an exponential function. The model parameters are estimated using the least squares method with the Levenberg–Marquardt algorithm. Special attention is also paid to assessing the stability of the identification procedure, analyzing the approximation quality, and evaluating changes in the equivalent inductance at different initial current levels. A series of experimental studies was conducted using the PAK-IP/10 hardware–software measurement system. The results demonstrate that the proposed approach provides sufficient accuracy for determining the equivalent inductance of a winding over a wide current range under quasi-steady-state operating conditions of three-limb reactors. The obtained results extend the capabilities of experimental identification of inductive element parameters and may be used in the development of physical load models after additional validation and with consideration of reactor nonlinearity.

Keywords: DC decay method, parameter identification, power choke, inductance, experimental data processing, curve fitting, hardware-in-the-loop simulation, hybrid energy systems

Введение

В рамках исследований, направленных на разработку и верификацию алгоритмов управления автономными гибридными энергетическими установками, в работе [1] был разработан и описан комплекс полунатурного моделирования автономной системы электроснабжения, включающий математические модели источников генерации, реальную подсистему накопления энергии и систему управления, а также физическую модель потребителя электроэнергии (ФМПЭ).

Физическая модель потребителя электроэнергии, реализованная в составе комплекса, предназначена для формирования заданных режимов электропотребления и основана на использовании дискретно коммутируемых активных и индуктивных элементов. Существенную роль при этом играют силовые дроссели, обеспечивающие формирование реактивной составляющей нагрузки.

Точность воспроизведения режимов электропотребления в значительной степени определяется корректностью задания параметров индуктивных элементов. Однако фактические значения индуктивности дросселей могут отличаться от номинальных и зависеть от условий их работы, что обуславливает необходимость их экспериментальной идентификации.

В связи с этим возникает необходимость разработки экспериментальных методов идентификации параметров дросселей, позволяющих определять их эквивалентные характеристики при квазистационарных режимах эксплуатации. Одним из таких методов является опыт затухания постоянного тока (ОЗПТ), основанный на анализе переходного процесса в активно-индуктивной цепи [2].

Эффективное применение данного метода требует разработки алгоритмов обработки экспериментальных данных, обеспечивающих выделение информативного участка сигнала и устойчивую оценку параметров модели. В связи с этим в работе рассматривается задача автоматизированной идентификации параметров обмотки трёхфазного дросселя на основе обработки экспериментальных данных, полученных методом затухания постоянного тока.

Целью настоящего исследования является разработка и экспериментальная верификация автоматизированного метода идентификации эквивалентной индуктивности обмотки трехфазного дросселя при квазистационарных режимах эксплуатации, на основе метода затухания по-

стоянного тока, включающего алгоритмы предобработки экспериментальных данных, аппроксимации переходных процессов и оценки параметров модели.

Материалы и методы исследования

Описание исследуемого дросселя

В качестве объекта исследования использовалась обмотка трёхфазного силового дросселя, входящего в состав физической модели потребителя электроэнергии комплекса полунатурного моделирования [1]. Отметим, что на практике дроссели активно применяются для решения задач, связанных с обеспечением электромагнитной совместимости [3], построения пассивных фильтров электромагнитных помех [4], что хорошо согласуется с общими задачами, решаемыми при функционировании физической модели потребителя электроэнергии комплекса полунатурного моделирования [1].

Дроссель (рис. 1) выполнен на шихтованном трехстержневом магнитопроводе с воздушным зазором, тремя рабочими обмотками и предназначен для формирования требуемой реактивной составляющей нагрузки, моделируемой ФМПЭ. В силу конструктивных особенностей магнитопровода и наличия магнитной связи между обмотками исследуемый объект представляет собой сложную электромагнитную систему, параметры которой зависят от режима возбуждения и уровня протекающего тока [5; 6].



Рис. 1. Фотография исследуемого дросселя
Примечание: фото авторов

Существующие подходы, например [7], не в полной мере отвечают требованиям, вытекающим из особенностей эксплуата-

ции автоматизированной системы идентификации параметров обмотки трехсердечного дросселя в составе физической модели потребителя электроэнергии комплекса полунатурного моделирования автономных систем электроснабжения [1].

В связи с этим для определения параметров дросселя необходим экспериментальный метод, позволяющий оценить эквивалентную индуктивность обмотки в заданных условиях.

Описание ОЗПТ

Для экспериментального определения параметров обмоток дросселя использовался опыт затухания постоянного тока, основанный на анализе переходного процесса в активно-индуктивной цепи при разряде энергии, накопленной в магнитном поле [2; 8].

Метод широко применяется для идентификации параметров электрических машин и индуктивных элементов, поскольку позволяет получать информацию о параметрах цепи по временной зависимости тока без использования частотных характеристик [8; 9].

Принцип проведения эксперимента иллюстрируется на рисунке 2. На первом этапе в цепи «источник постоянного напряжения – активное сопротивление – индуктивность» формируется постоянный ток. После достижения установившегося режима источник питания отключается, а выводы обмотки замыкаются, что приводит к разряду накопленной магнитной энергии через активное сопротивление цепи.

В результате в цепи возникает переходный процесс затухания тока, характер которого определяется параметрами исследуемой системы. Типичная форма зависимости тока от времени также представлена на рисунке 2.

В рамках данного исследования принимается допущение об описании переходного процесса одной экспоненциальной функцией:

$$i(t) = I_m e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где I_m – начальное значение тока, определяемое экспериментально, а λ – коэффициент затухания.

Коэффициент затухания связан с параметрами цепи следующим соотношением:

$$\lambda = R / L, \quad (2)$$

где R – активное сопротивление цепи, L – эквивалентная индуктивность цепи. Таким образом, эквивалентная индуктивность может быть определена по выражению:

$$L = R / \lambda, \quad (3)$$

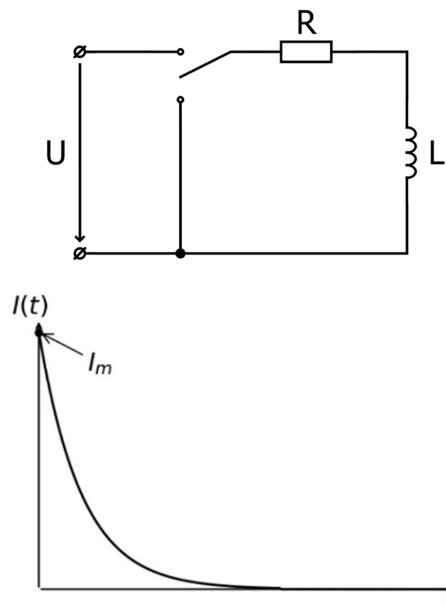


Рис. 2. Схема эксперимента по методу ОЗПТ и характерная экспоненциальная зависимость тока

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Следует отметить, что в общем случае процесс затухания тока в электромагнитных системах может иметь более сложный характер и описываться суммой нескольких экспоненциальных составляющих, что в значительной мере обусловлено наличием распределённых параметров и магнитной нелинейности [8; 10]. Однако целью настоящего исследования является не построение полной динамической модели исследуемого дросселя, а определение эквивалентной индуктивности обмотки при различных уровнях тока в условиях квазистационарных режимов эксплуатации. В связи с этим использование одноэкспоненциальной модели рассматривается как способ получения интегральной оценки параметров объекта и определения эквивалентной индуктивности исследуемой обмотки.

Описание ПАК-ИП/10

Экспериментальные исследования проводились с использованием аппаратно-программного комплекса ПАК-ИП/10, предназначенного для реализации метода затухания постоянного тока, регистрации переходных процессов и последующей обработки данных. Фотография данного прибора представлена на рисунке 3.

Комплекс обеспечивает формирование режима разряда исследуемой цепи, измерение временной зависимости тока и цифровую обработку полученных сигналов [11].

В состав измерительной системы входит токовый преобразователь ЛАН 25-NP, работающий по компенсационному принципу на основе эффекта Холла.



Рис. 3. Фотография аппаратно-программного комплекса ПАК-ИП/10
Примечание: фото авторов

Датчик использовался в конфигурации с одним витком первичной цепи, что соответствует номинальному первичному току $I_{PN}=25$ А и коэффициенту преобразования $k = N_p/N_s = 1000$. В данном режиме номинальный вторичный ток составляет $I_{SN}=25$ мА, что обеспечивает линейную связь между первичным и вторичным токами.

Для преобразования вторичного тока в измеряемое напряжение $u(t)$ использовался прецизионный резистор сопротивлением 340 Ом, подключённый к выходу датчика. С учётом коэффициента преобразования датчика k связь между измеряемым напряжением $u(t)$ и первичным током $i(t)$ определяется соотношением:

$$i(t) = u(t) / 0,34, \quad (4)$$

Управление процессом измерений осуществляется с помощью микроконтроллера ATmega328. В качестве источника постоянного тока применяются литий-ионные аккумуляторы.

Перед проведением измерений в комплексе реализуется процедура размагничивания магнитопровода, обеспечивающая воспроизводимость начальных условий эксперимента.

Регистрация переходного процесса осуществляется в виде дискретной зависимости тока от времени, которая далее используется для идентификации параметров модели.

Регистрация переходного процесса осуществлялась с использованием аналого-цифрового преобразователя LCard E-2010B с частотой дискретизации 1 МГц, что обеспечивало высокое временное разрешение при анализе быстропротекающих переходных процессов. Активное сопротивление обмотки дросселя определялось с использованием микроомметра Sonel MMR-610, что позволило получить значения сопротивления, необходимые для расчёта эквивалентной индуктивности.

Алгоритм обработки результатов экспериментов

Обработка экспериментальных данных выполнялась в автоматизированном режиме с использованием разработанного программного комплекса, реализующего алгоритмы предобработки, прореживания и аппроксимации экспериментальных зависимостей, и включала последовательность операций, направленных на выделение информативного участка переходного процесса и последующую идентификацию параметров модели [11]. Схема алгоритма обработки результатов экспериментов представлена на рисунке 4.

На первом этапе выполнялась загрузка совокупности файлов с результатами измерений, предварительно преобразованных из формата .dat в текстовый формат .txt. Для каждой записи формировалась временная ось на основе известной частоты дискретизации.

Зарегистрированные значения напряжения пересчитывались в ток по соотношению (4).

С целью устранения систематического смещения сигнала выполнялась коррекция нулевого уровня. Для этого по хвостовой части кривой, начиная с заданного момента времени, определялось среднее значение сигнала, которое интерпретировалось как дрейф нуля и вычиталось из всей зависимости. Необходимость данной операции обусловлена наличием смещения датчика тока, величина которого, согласно паспортным данным, может достигать ± 150 мА.

Далее из обработки исключался начальный участок кривой, соответствующий коммутационному процессу во время перехода из состояния «накачки» в состояние «затухание тока» (рис. 2). В расчётах использовалось фиксированное значение времени отсечения, равное 0,05 мс, что позволило исключить влияние коммутационных переходных эффектов, не связанных с процессом затухания. После этого кривая ограничивалась по первому моменту достижения током нулевого значения.

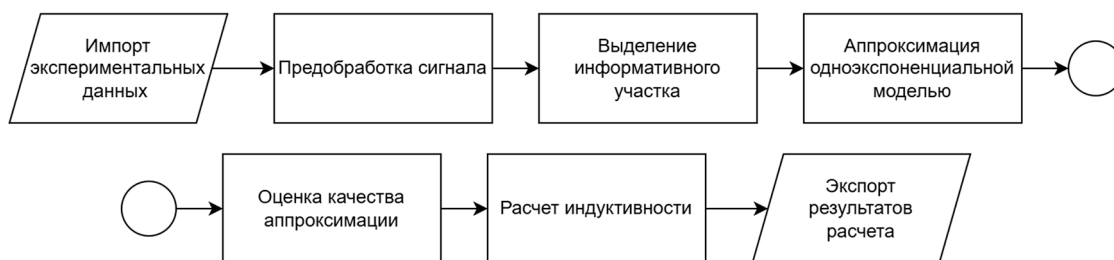


Рис. 4. Схема алгоритма обработки результатов экспериментов
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Для каждой обработанной кривой определялось расчетное амплитудное значение тока $I_{m(p)}$ как среднее значение первых десяти отсчетов. Использование усреднения вместо одного значения позволяет снизить влияние шумов измерения и повысить устойчивость последующей процедуры идентификации.

Регистрация переходного процесса осуществлялась с частотой дискретизации 1 МГц. Для уменьшения вычислительной нагрузки после предварительной обработки применялась процедура прореживания данных, при которой сохранялась каждая 100-я точка сигнала, что соответствует общему подходу к снижению частоты дискретизации сигналов, применяемым в цифровой обработке сигналов [12; 13].

Проведенный анализ показал, что в рассматриваемом диапазоне параметров эксперимента использование различных стратегий прореживания, а также изменение эффективной частоты дискретизации не оказывает существенного влияния на результаты идентификации коэффициента затухания. В связи с этим в работе использовано равномерное прореживание, обеспечивающее снижение объема обрабатываемых данных при сохранении точности аппроксимации.

Следует отметить, что разработанный алгоритм допускает использование более сложных стратегий прореживания, в частности адаптивного прореживания, при котором плотность точек изменяется в зависимости от амплитудного значения тока. Такой подход позволяет сохранять повышенное разрешение в начальной части кривой и дополнительно снижать вычислительные затраты при обработке длинной и малоинформативной хвостовой части сигнала (рис. 2).

Определение коэффициента затухания λ осуществлялось на основе аппроксимации экспериментальной зависимости тока во времени. В качестве модели использовалась экспоненциальная функция вида (1), где I_m принималось равным расчетному начальному значению тока $I_{m(p)}$, определенному из экспериментальных данных,

и не подлежало оптимизации, а единственным идентифицируемым параметром являлся коэффициент затухания λ .

Оценка параметра λ выполнялась методом наименьших квадратов с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта [14], что является частным случаем задачи нелинейной аппроксимации экспоненциальных зависимостей [15].

Качество аппроксимации оценивалось с использованием метрик средней абсолютной ошибки (MAE), среднеквадратической ошибки (RMSE), средней относительной ошибки (MAPE) [16], а также средней относительной ошибки, нормированной по амплитудному значению тока ($MAPE(I_m)$).

Полученные параметры аппроксимации сохранялись в табличной форме, а также формировался массив регрессионных остатков, включающий временную зависимость, экспериментальные значения тока, значения модели и ошибки аппроксимации.

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении экспериментов по методике опыта затухания постоянного тока значения начального тока I_m задавались таким образом, чтобы коэффициент вариации $CV(I_m)$ в пределах каждой группы не превышал 3,5%. Такой подход позволяет моделировать условия, близкие к реальной эксплуатации, при которых параметры системы задаются с допустимым уровнем разброса.

Для исследования зависимости параметров переходного процесса от уровня тока было сформировано десять групп экспериментальных данных. Каждая группа содержала по пять реализаций процесса затухания тока, полученных при близких значениях начального тока I_m . Для каждой реализации по результатам аппроксимации кривой затухания определялось значение коэффициента затухания λ .

В таблице 1 представлены статистические характеристики сформированных групп.

Таблица 1

Статистические характеристики экспериментальных данных по группам тока

Группа №	$I_{m,cp}$, А	$\sigma(I_m)$, А	$CV(I_m)$, %	λ_{cp} , с ⁻¹	$\sigma(\lambda)$, с ⁻¹	$CV(\lambda)$, %
	1,16	0,039	3,35	3,208	0,020	0,63
	2,02	0,066	3,25	3,206	0,013	0,40
	2,98	0,040	1,34	3,200	0,003	0,10
	3,67	0,064	1,75	3,210	0,004	0,12
	4,47	0,031	0,69	3,193	0,002	0,05
	5,56	0,032	0,58	3,208	0,002	0,08
	6,25	0,058	0,93	3,237	0,005	0,15
	7,13	0,076	1,07	3,231	0,002	0,07
	7,98	0,062	0,78	3,287	0,002	0,06
	8,86	0,105	1,19	3,350	0,014	0,40

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Средние значения начального тока $I_{m,cp}$ и коэффициента затухания λ_{cp} определялись как арифметическое среднее значений соответствующих величин внутри группы. Стандартное отклонение и коэффициент вариации рассчитывались по следующим выражениям:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_k - x_{cp})^2}, \quad (5)$$

$$CV(x) = \frac{\sigma(x)}{x_{cp}} \times 100\%, \quad (6)$$

где x_k – значение исследуемой величины для k -й реализации эксперимента, а x_{cp} – среднее значение величины в группе, N – число реализаций в группе.

Характерные формы кривых затухания для различных уровней тока, полученные с применением комплекса ПАК-ИП/10, представлены на рисунке 5.

Анализ результатов показал, что коэффициент вариации коэффициента затухания $CV(\lambda)$ в большинстве групп не превышает 0,4%, а максимальное значение наблюдается в группе 1 и составляет 0,63%. Это свидетельствует о высокой устойчивости процедуры идентификации и низкой чувствительности разработанного метода к случайным погрешностям измерений и обработки данных [17].

При расчёте эквивалентной индуктивности использовалось значение активного сопротивления цепи, равное $R=0,1302$ Ом, определённое экспериментально.

Анализ качества аппроксимации (табл. 2) показал, что с увеличением амплитуды тока наблюдается рост абсолютной ошибки

(MAE, RMSE). При этом в диапазоне малых и средних токов увеличение ошибки носит умеренный характер, тогда как при больших токах (группы 7–10) наблюдается её ускоренный рост.

Значения MAPE возрастают до 10% при больших токах, что связано с высокой чувствительностью данной метрики к малым значениям тока в хвостовой части экспоненты. В то же время нормированная по амплитуде ошибка $MAPE(I_m)$ остаётся на низком уровне (менее 0,5%), что свидетельствует о высокой точности аппроксимации в области максимальных значений тока.

Полученные результаты указывают на отклонение реального процесса от одноэкспоненциальной модели при высоких уровнях тока. Несмотря на это, для решаемых задач точность аппроксимации остаётся достаточной в рассматриваемом диапазоне токов, а наблюдаемое отклонение носит систематический характер и может быть обусловлено физическими особенностями объекта.

Результаты расчёта эквивалентной индуктивности (табл. 3) и определения доверительных интервалов показывают её незначительное снижение при увеличении амплитуды тока. Зависимость эквивалентной индуктивности от амплитудного значения тока представлена на рисунке 6. Доверительный интервал ΔL определялся как

$$\Delta L = \frac{\sigma(L)}{\sqrt{N}} \cdot t, \quad (7)$$

где $\sigma(L)$ – стандартное отклонение, рассчитанное по выражению (5), t – значение t -критерия при доверительной вероятности 0,95. Результаты расчета представлены в таблице 3 и на рисунке 6.

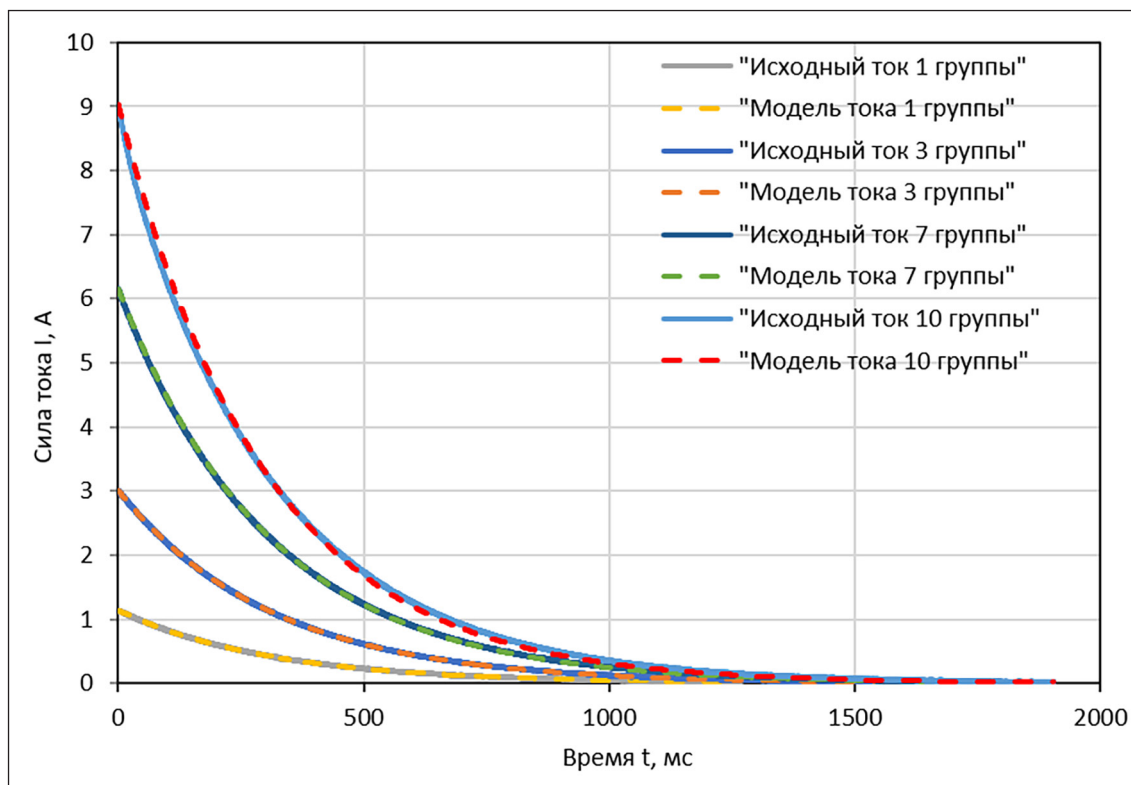


Рис. 5. Кривые затухания тока для некоторых уровней тока (группы 1, 3, 7, 10). Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 2

Метрики качества аппроксимации кривых затухания тока

Группа №	MAE, А	MAPE, %	MAPE(I_m), %	RMSE, А
1	0,0036	4,0780	0,3072	0,0045
2	0,0037	3,6255	0,1823	0,0047
3	0,0040	3,6336	0,1338	0,0051
4	0,0054	3,5116	0,1463	0,0069
5	0,0044	3,4974	0,0980	0,0055
6	0,0064	3,6045	0,1150	0,0083
7	0,0101	4,3846	0,1608	0,0135
8	0,0114	4,1971	0,1604	0,0153
9	0,0244	6,8501	0,3051	0,0351
10	0,0425	10,0016	0,4790	0,0629

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Данный эффект может быть связан с нелинейными свойствами трехстержневой магнитной системы дросселя, в частности со снижением магнитной проницаемости при увеличении уровня магнитного потока. В рассматриваемом диапазоне токов наблюдается общая тенденция к снижению эквивалентной индуктивности; при этом наиболее

выраженное снижение проявляется в области повышенных значений тока. Такая интерпретация согласуется с теоретическими представлениями о нелинейных свойствах магнитных материалов [18; 19], а также с экспериментальными исследованиями зависимости параметров магнитных материалов от уровня подмагничивания [20].

Таблица 3

Зависимость эквивалентной индуктивности от уровня тока

Группа №	$I_{м.ср}$, А	$L_{ср}$, мГн	ΔL , мГн
1	1,156	40,6	0,316
2	2,018	40,6	0,202
3	2,985	40,7	0,052
4	3,665	40,6	0,061
5	4,468	40,8	0,025
6	5,563	40,6	0,039
7	6,254	40,2	0,076
8	7,133	40,3	0,035
9	7,980	39,6	0,032
10	8,864	38,9	0,195

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

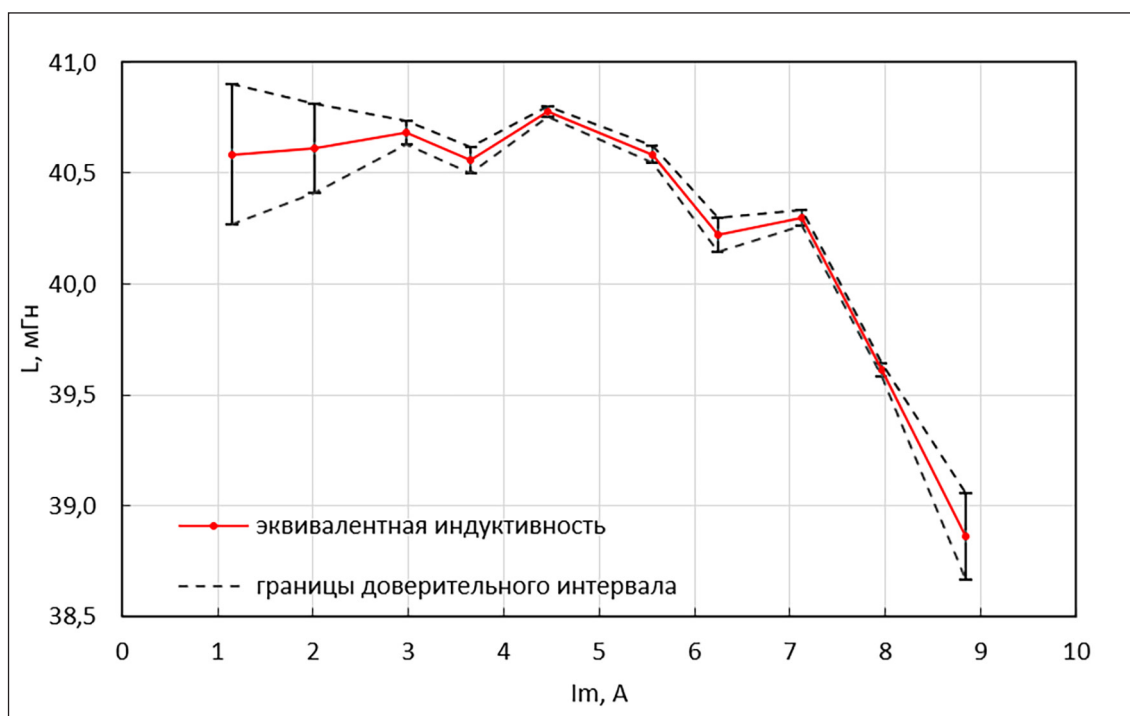


Рис. 6. Зависимость эквивалентной индуктивности от амплитудного значения тока

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Предложенный подход ориентирован на определение эквивалентной индуктивности обмоток трехстержневых силовых дросселей в условиях квазистационарных режимов эксплуатации методом затухания постоянного тока. Полученные результаты относятся к исследуемому объекту и диапазону токов, рассмотренному в работе. В исследовании не анализи-

ровалось влияние температуры, а также не проводилось сопоставление результатов с независимыми методами определения индуктивности. Кроме того, использовалось допущение об одноэкспоненциальном характере переходного процесса, позволяющее получить интегральную оценку эквивалентной индуктивности, но не предназначенное для полного описания динамики

электромагнитных процессов. Поэтому распространение полученных зависимостей на дроссели другой конструкции или иные режимы эксплуатации требует проведения дополнительных исследований.

Заключение

В работе представлен автоматизированный подход к идентификации параметров обмотки трехфазного дросселя на основе метода затухания постоянного тока. Разработан алгоритм обработки экспериментальных данных, обеспечивающий выделение информативного участка переходного процесса и устойчивую оценку параметров модели.

Установлено, что одноэкспоненциальная модель обеспечивает приемлемое инженерное приближение процесса затухания тока для целей определения интегральной оценки эквивалентной индуктивности в диапазоне малых и средних значений тока. При больших токах наблюдается рост ошибки аппроксимации, что указывает на ограниченность принятого допущения.

Анализ качества аппроксимации показал, что при увеличении амплитуды тока наблюдается рост абсолютной ошибки. Это может быть обусловлено нелинейными свойствами магнитной системы дросселя, для подтверждения требуются дополнительные измерения магнитного состояния. При этом относительная ошибка остаётся на низком уровне. Установлено, что эквивалентная индуктивность обмотки демонстрирует тенденцию к снижению при увеличении уровня тока, что согласуется с теоретическими представлениями о насыщении магнитопровода.

Полученные результаты могут быть использованы при формировании физических моделей нагрузки и последующей верификации алгоритмов управления автономными системами электроснабжения после дополнительной валидации на независимых методах измерения и при учёте нелинейности дросселя.

Полученные зависимости эквивалентной индуктивности от амплитудного значения тока могут быть использованы в дальнейших исследованиях для анализа добротности дросселя, частотного диапазона, температурного коэффициента индуктивности, а также для сопоставления различных методов идентификации параметров с учётом конструкции магнитопровода и предполагаемого режима эксплуатации.

Список литературы

1. Буш С. В., Архипова О. В., Ковалев В. З. Физическая модель потребителя электрической энергии в составе

комплекса полунатурного моделирования автономной системы электроснабжения // Инженерный вестник Дона. 2026. № 3. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2026/10845> (дата обращения: 16.03.2026).

2. Maurer F., Øyvang T., Nøland J. K. Evaluating the Precision of the DC Decay Test Method for Characterizing Wound-Field Synchronous Machines in Power Plants // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2023. Vol. 10. P. 572–582. DOI: 10.1109/OAJPE.2023.3312732.

3. Макаров О. Ю., Ромашенко М. А., Гудков А. В. Эквивалентная модель синфазного дросселя в среде LTSPICE для обеспечения электромагнитной совместимости АС-DC-преобразователей // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 7. С. 25–30. URL: <http://radiotec.ru/ru/journal/Radioengineering/number/2025-7/article/25188> (дата обращения: 23.05.2026). DOI: 10.18127/j00338486-202507-05.

4. Dwiza B., Singh S., Gorla N. B. Y., Jayaraman K., Pou J. Integrated Magnetic Choke Solutions for Compact Passive Electromagnetic Interference Filters // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2025. Vol. 13. № 4. P. 4771–4783. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11004040> (дата обращения: 23.05.2026). DOI: 10.1109/JESTPE.2025.3570156.

5. Климов А. А. Параметрическое моделирование насыщения силового дросселя с помощью симулятора LTspice и программного комплекса MATLAB на примере сердечника из аморфного сплава 2605SA1 // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 16. № 3. С. 29–35. URL: https://rio.ksc.ru/data/documents/12_trudy_3_-2018.pdf#page=30 (дата обращения: 23.05.2026). DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.29-35.

6. Мишин С. В. Управляемый дроссель-трансформатор в структуре электрохимической системы генерирования переменного тока постоянной частоты // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 213. С. 22–27. URL: <https://avia.mstuca.ru/jour/article/view/443/369> (дата обращения: 23.05.2026).

7. Duan Ju., Bao Ya., Zhang G., Wang X., Jiang P., Niu W., Zhang H., Zhen W., Xia Yu., Song R. Modeling and Simulation Analysis of Three-Phase Saturable Transformers: A Study on the Effects of Geomagnetically Induced Current on Transformers // Energies. 2025. Vol. 18. № 4. Art. 824. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/4/824> (дата обращения: 23.05.2026). DOI: 10.3390/en18040824.

8. Аникин В. В., Хамитов Р. Н. Способ определения электромагнитных параметров погружных асинхронных электродвигателей // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 33–37. URL: [https://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/files/arhiv/2019/3%20\(165\)/33-37%20Аникин%20В.%20В.,%20Хамитов%20Р.%20Н..pdf](https://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/files/arhiv/2019/3%20(165)/33-37%20Аникин%20В.%20В.,%20Хамитов%20Р.%20Н..pdf) (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-33-37.

9. Maurer F., Tu X. M., Simond J.-J. Two Full Parameter Identification Methods for Synchronous Machine Applying DC-Decay Tests for a Rotor in Arbitrary Position // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. Vol. 53. No. 4. P. 3505–3518. DOI: 10.1109/TIA.2017.2688462.

10. Ковалев В. З., Архипова О. В., Хусаинов Э. И., Сайфуллин Р. В., Миронов А. Ю. Оценка воспроизводимости результатов испытаний обмотки трансформатора при искусственных межвитковых коротких замыканиях // Инженерный вестник Дона. 2025. № 12. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2025/10620> (дата обращения: 20.03.2026).

11. Буш С. В. Программный комплекс для обработки и аппроксимации совокупности кривых токов затухания индуктивных элементов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025697158. Бюл. 2025. № 1. URL: https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EV M&DocNumber=2025697158&TypeFile=html (дата обращения: 16.03.2026).

12. Куликов А. Л., Лоскутов А. Б., Илюшин П. В., Севостьянов А. А. Обеспечение когерентности цифровой обработки сигналов токов и напряжений электроэнергетических систем при снижении частоты дискретизации // *Электричество*. 2020. № 8. С. 5–16. URL: <https://etr1880.mpei.ru/index.php/electricity/article/view/227> (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-5-16.
13. Dudarin A., Molnar G., Vucic M. Optimum multiplier-less sharpened cascaded-integrator-comb filters // *Digital Signal Processing*. 2022. Vol. 127. Art. 103564. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1051200422001816> (дата обращения: 12.04.2026). DOI: 10.1016/j.dsp.2022.103564.
14. Sun Y., Wang P., Zhang T., Li K., Peng F., Zhu C. Principle and Performance Analysis of the Levenberg–Marquardt Algorithm in WMS Spectral Line Fitting // *Photonics*. 2022. Vol. 9. № 12. Art. 999. URL: <https://www.mdpi.com/2304-6732/9/12/999> (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.3390/photonics9120999.
15. Hokanson J. M. Projected Nonlinear Least Squares for Exponential Fitting // *SIAM Journal on Scientific Computing*. 2017. Vol. 39. № 6. P. A3107–A3128. URL: <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/16M1084067> (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.1137/16M1084067.
16. Hyndman R. J., Koehler A. B. Another Look at Measures of Forecast Accuracy // *International Journal of Forecasting*. 2006. Vol. 22. № 4. P. 679–688. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207006000239> (дата обращения: 11.04.2026). DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.
17. Åsberg A., Bolann B. J. Calculating the Coefficient of Variation from Duplicate Measurements: A New Method // *The Journal of Applied Laboratory Medicine*. 2023. Vol. 8. № 1. P. 220–222. URL: <https://academic.oup.com/jalm/article/8/1/220/6847493> (дата обращения: 11.04.2026). DOI: 10.1093/jalm/jfac098.
18. Гусев Ю. П., Лхамдондог А. Д., Монаков Ю. В., Ягова Н. В. Влияние знакопостоянного тока на процессы намагничивания трехфазных силовых трансформаторов // *Электричество*. 2019. № 9. С. 16–21. URL: <https://etr1880.mpei.ru/index.php/electricity/article/view/108> (дата обращения: 11.04.2026). DOI: 10.24160/0013-5380-2019-9-16-21.
19. Khalilifar M., Shahrtash S. M., Fateminia M., Ranjbar A. M. Reactor modelling with saturation characteristic and inter-phase magnetic coupling // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 123. Art. 106228. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061520307729> (дата обращения: 15.04.2026). DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106228.
20. Kutorasiński K., Szewczyk M., Molas M., Pawłowski J. Measuring Impedance Frequency Characteristics of Magnetic Rings with DC-Bias Current // *ISA Transactions*. 2023. Vol. 143. P. 723–739. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057823003968> (дата обращения: 11.04.2026). DOI: 10.1016/j.isatra.2023.08.031.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.