

Кузьмин Данил Кириллович, магистрант
Дальневосточный федеральный университет
Kuzmin Danil Kirillovich, Far Eastern Federal University

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF A DIGITAL TWIN POWER TRANSFORMER

Аннотация. В работе представлен прототип цифрового двойника силового трансформатора, разработанный в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки Simscape Electrical. Прототип включает имитационную модель системы электроснабжения с трансформатором 30 МВА напряжением 132/11 кВ и подсистему обработки измерительных сигналов на основе аналогового фильтра Баттерворта и вычислителя действующих значений. Проведена верификация модели в режимах холостого хода и под нагрузкой. Показана возможность использования прототипа как основы для создания полнофункционального цифрового двойника с интеграцией технологий IoT.

Abstract. The paper presents a prototype of a power transformer digital twin developed in MATLAB/Simulink using the Simscape Electrical library. The prototype includes a simulation model of a power supply system with a 30 MVA, 132/11 kV transformer and a measurement signal processing subsystem based on an analog Butterworth filter and an RMS calculator. Verification of the model in no-load and load modes was carried out. The possibility of using the prototype as a basis for creating a full-featured digital twin with integration of IoT technologies is shown.

Ключевые слова: Цифровой двойник, силовой трансформатор, MATLAB/Simulink, Simscape Electrical.

Keywords: Digital twin, power transformer, MATLAB/Simulink, Simscape Electrical.

Силовые трансформаторы относятся к критически важному и дорогостоящему оборудованию электрических сетей. Значительная часть трансформаторного парка в России эксплуатируется за пределами нормативного срока службы, что повышает риски аварийных отключений и экономических потерь. Традиционные методы мониторинга, основанные на периодических осмотрах и испытаниях, не всегда позволяют своевременно выявить развивающиеся дефекты [1–3].

В последние годы активно развивается концепция цифрового двойника (Digital Twin) – виртуальной модели физического объекта, непрерывно актуализируемой на основе данных измерений с реального оборудования. Применение цифровых двойников в электроэнергетике открывает возможности для перехода от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому техническому состоянию [4, 5].

Программная среда MATLAB/Simulink с библиотекой Simscape Electrical является одной из наиболее доступных платформ для создания прототипов цифровых двойников электротехнического оборудования. Она позволяет моделировать электрические, магнитные и тепловые процессы в единой вычислительной среде и обеспечивает возможность последующей интеграции с промышленными протоколами передачи данных [6].

Целью настоящей работы является разработка прототипа цифрового двойника силового трансформатора в среде MATLAB/Simulink, включающего имитационную модель системы электроснабжения и подсистему обработки измерительных сигналов, который может служить основой для дальнейшей интеграции с системами IoT.

Архитектура цифрового двойника силового трансформатора

Цифровой двойник силового трансформатора может быть представлен в виде четырёхуровневой архитектуры, включающей:

□ уровень сбора данных (датчики тока, напряжения, температуры, газоанализаторы);



- уровень виртуальной модели (электрическая, магнитная и тепловая модели);
- уровень анализа и прогнозирования (выявление аномалий, прогнозирование остаточного ресурса);
- уровень визуализации и интерфейса (мнемосхемы, тренды, сигнализация).

В рамках данной работы реализован прототип, соответствующий уровню виртуальной модели с элементами сбора данных и визуализации. Тепловая подсистема и уровень прогнозирования составляют предмет дальнейших исследований.

Разработка имитационной модели в MATLAB/Simulink

Моделирование выполнялось в среде MATLAB R2018 с использованием блоков библиотеки Simscape Electrical. Разработанная модель воспроизводит полный тракт передачи электроэнергии от источника до потребителя (рис. 1) и включает следующие блоки:

Источник питания (Three-Phase Source) с линейным напряжением 132 кВ и частотой 50 Гц. Внутреннее сопротивление задано через параметры короткого замыкания: мощность КЗ – 500 МВА, отношение $X/R = 7$.

Высоковольтный выключатель (HV CB) на основе блока Three-Phase Breaker. Начальное состояние – разомкнут; замыкание трёх фаз в момент $t = 0$ моделирует подачу напряжения на трансформатор.

Измерительный блок (HV CT) – Three-Phase VI Measurement, настроенный на измерение тока и напряжения в комплексной форме. Выполняет функцию виртуального датчика.

Силовой трансформатор мощностью 30 МВА с напряжениями обмоток 132/11 кВ и схемой соединения YY. Параметры заданы в относительных единицах: активные сопротивления обмоток $R_1 = R_2 = 0,002$ о.е., индуктивности рассеяния $L_1 = L_2 = 0,08$ о.е., сопротивление ветви намагничивания $R_m = 500$ о.е., индуктивность намагничивания $L_m = 500$ о.е.

Заземляющий резистор нейтрали (NER) – сопротивление 4 Ом между нейтралью обмотки ВН и землёй.

Низковольтный выключатель (LV CB) – аналогичен HV CB, установлен на стороне 11 кВ.

Нагрузка – трёхфазная активно-индуктивная нагрузка мощностью 20 МВт + j5 Мвар, $\cos \varphi \approx 0,97$.

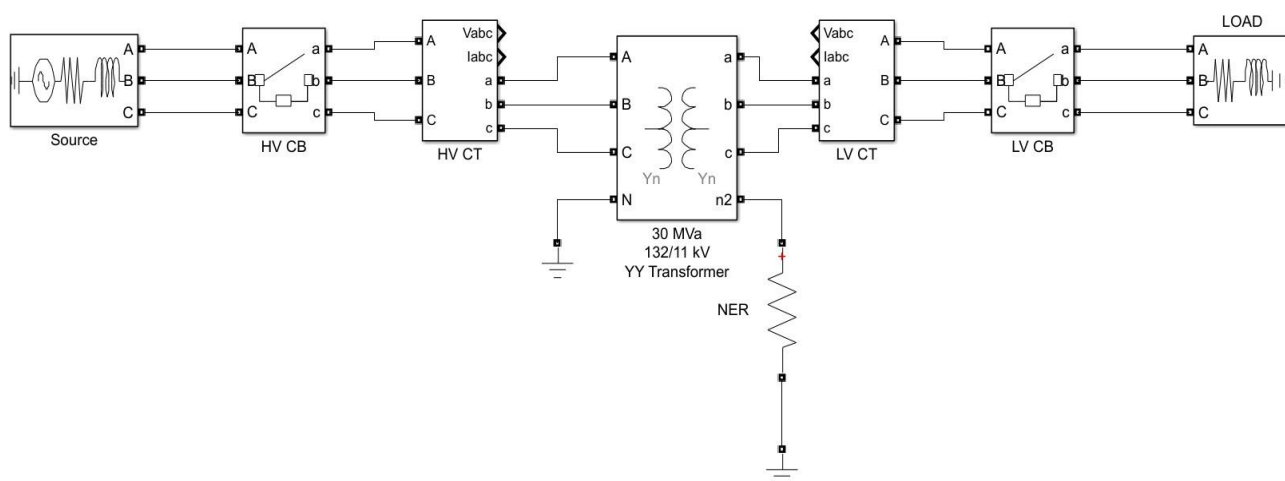


Рис. 1. Имитационная модель системы электроснабжения

Подсистема обработки измерительных сигналов

Для преобразования мгновенных значений тока и напряжения, измеряемых блоком HV CT, в информативные параметры режима разработана трёхканальная подсистема обработки сигналов (рис. 2). Каждый канал (фазы A, B, C) содержит последовательную цепочку «аналоговый фильтр – вычислитель RMS».

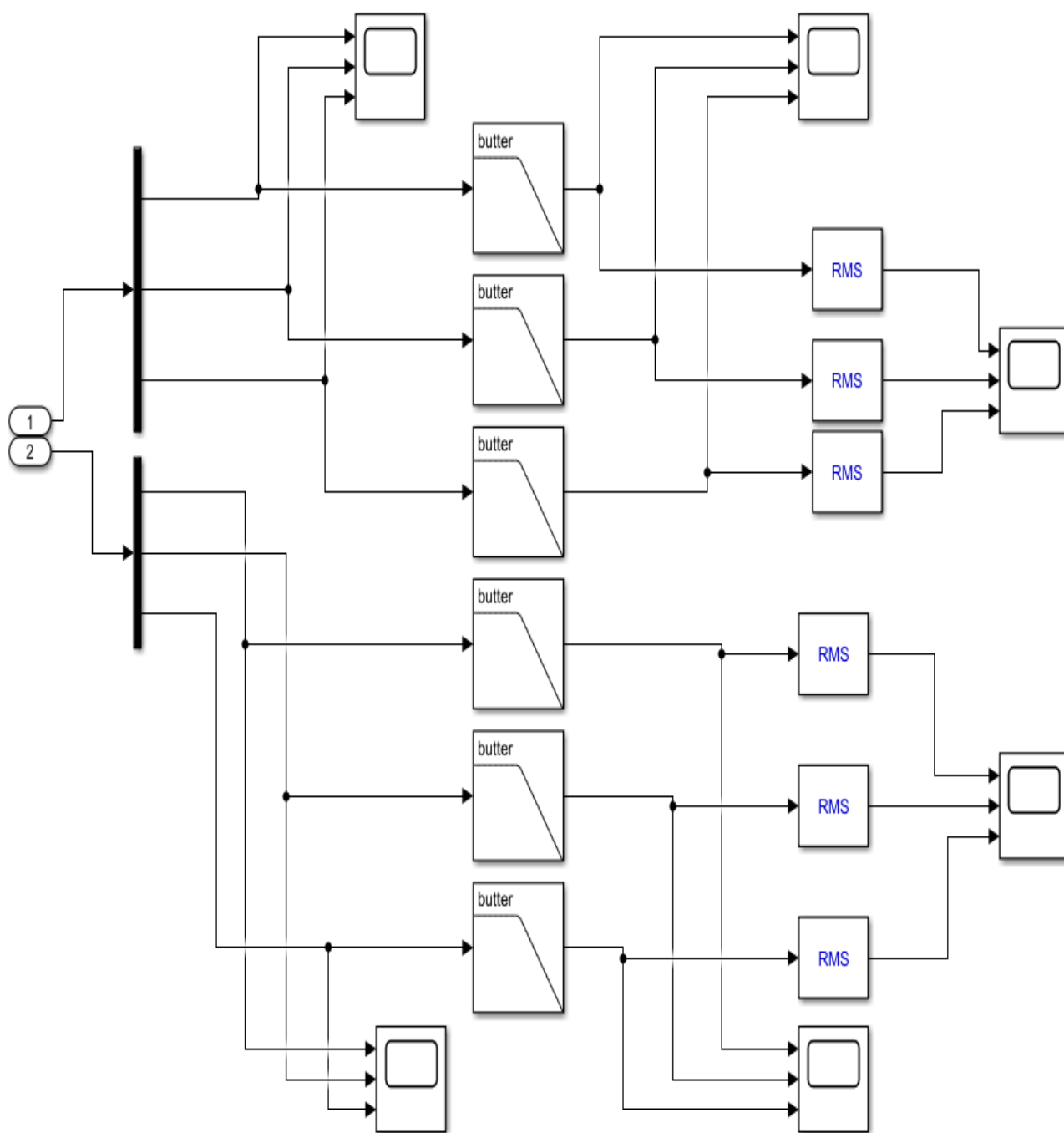


Рис. 2. Подсистема обработки измерительных сигналов

Аналоговый фильтр реализован на основе блока Analog Filter Design. Выбран фильтр Баттерворта 8-го порядка типа «нижних частот» с частотой среза 100 Гц (628,3 рад/с). Фильтр Баттерворта обеспечивает максимально гладкую амплитудно-частотную характеристику в полосе пропускания, что минимизирует искажения сигнала основной частоты. Частота среза, вдвое превышающая номинальную частоту сети (50 Гц), гарантирует неискажённое прохождение основной гармоники и эффективное подавление высших гармонических составляющих (начиная со 150 Гц) благодаря крутому спаду ~48 дБ/октаву.

Вычислитель RMS выполнен на блоке RMS в режиме True RMS (истинное среднеквадратическое значение), с фундаментальной частотой 50 Гц. Применение предварительной фильтрации перед RMS-преобразованием позволяет стабилизировать показания и избежать завышения значений, характерного для прямого вычисления RMS по сигналу с высшими гармониками и аperiodической составляющей.

Результаты моделирования

На рис. 3–6 представлены осциллограммы фазного тока и напряжения на стороне ВН трансформатора в различных точках измерительного тракта.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

До обработки (рис. 3, а и б) сигналы имеют симметричную синусоидальную форму с небольшими искажениями как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой.

После фильтрации (рис. 4, а и б) форма сигналов сохраняется без изменений, что подтверждает корректность выбора параметров фильтра и отсутствие вносимых им фазовых искажений.

После RMS-преобразования (рис. 5, а и б) на выходе формируются стабильные действующие значения. В режиме холостого хода RMS тока минимален (определяется током намагничивания), при подключении нагрузки возрастает до ~ 90 А (при нагрузке $20 \text{ МВт} + j5 \text{ Мвар}$), что соответствует расчётным значениям.

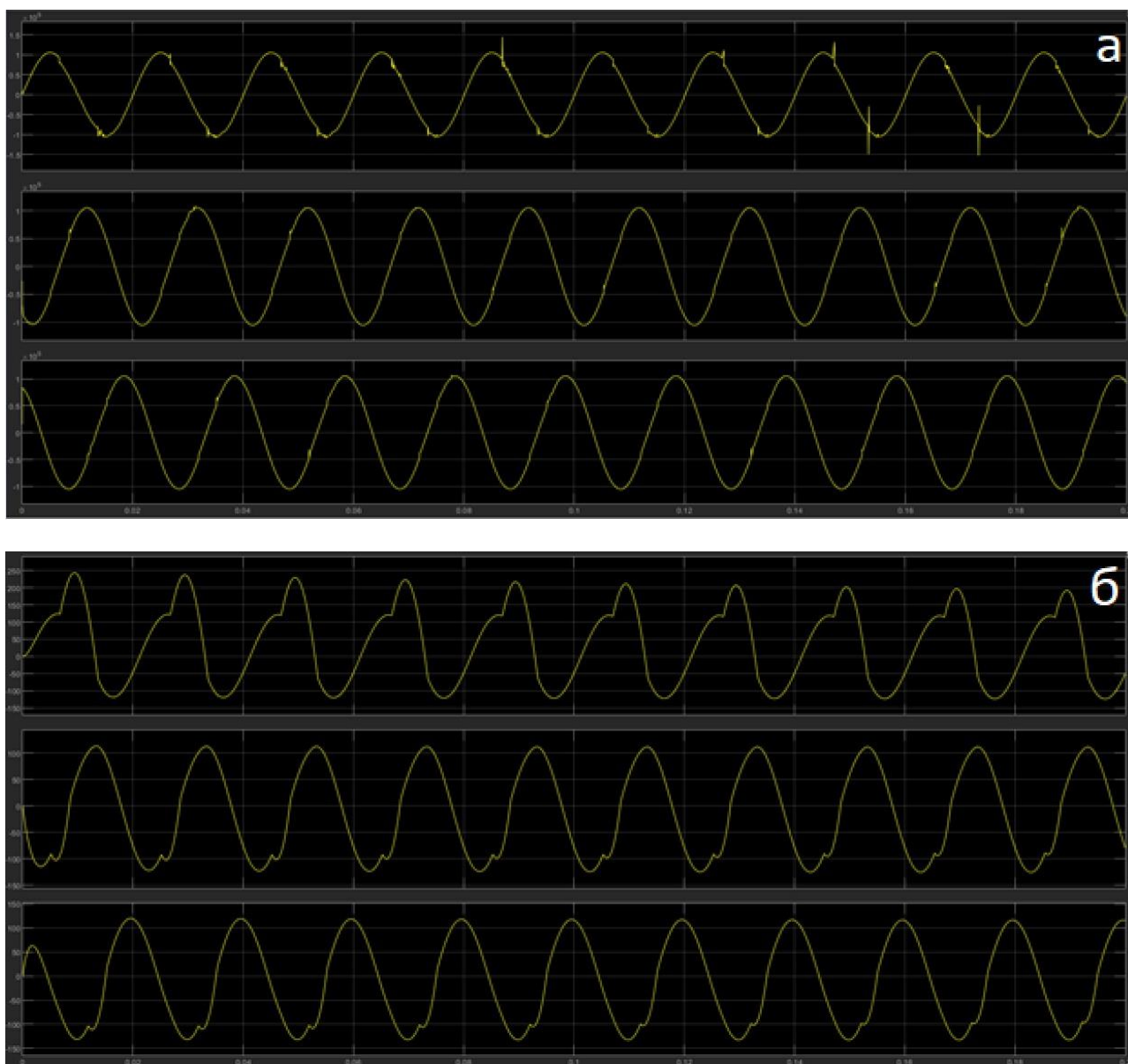


Рис. 3. Сигналы до обработки: а – напряжение; б – ток

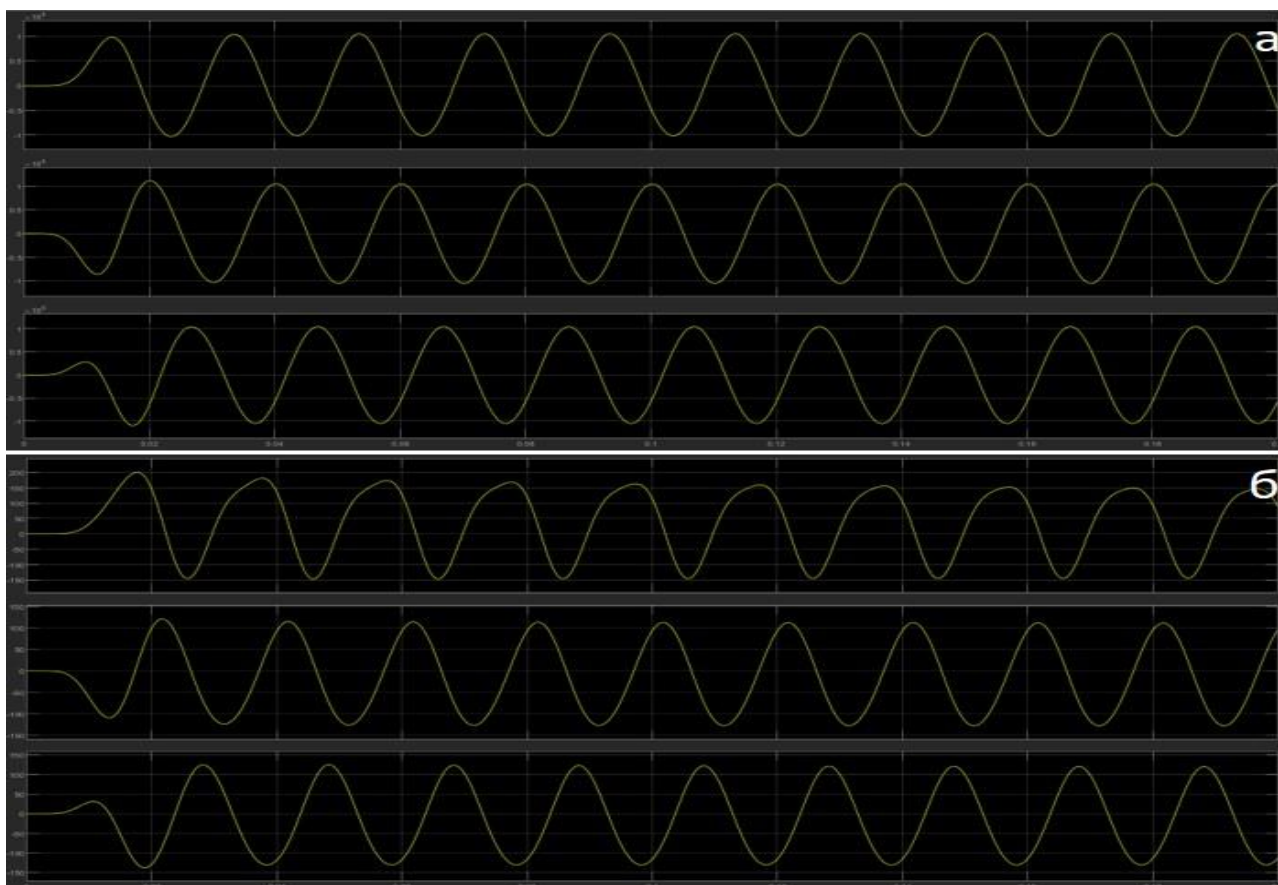


Рис. 4. Сигналы после аналогового фильтра: а – напряжение; б – ток

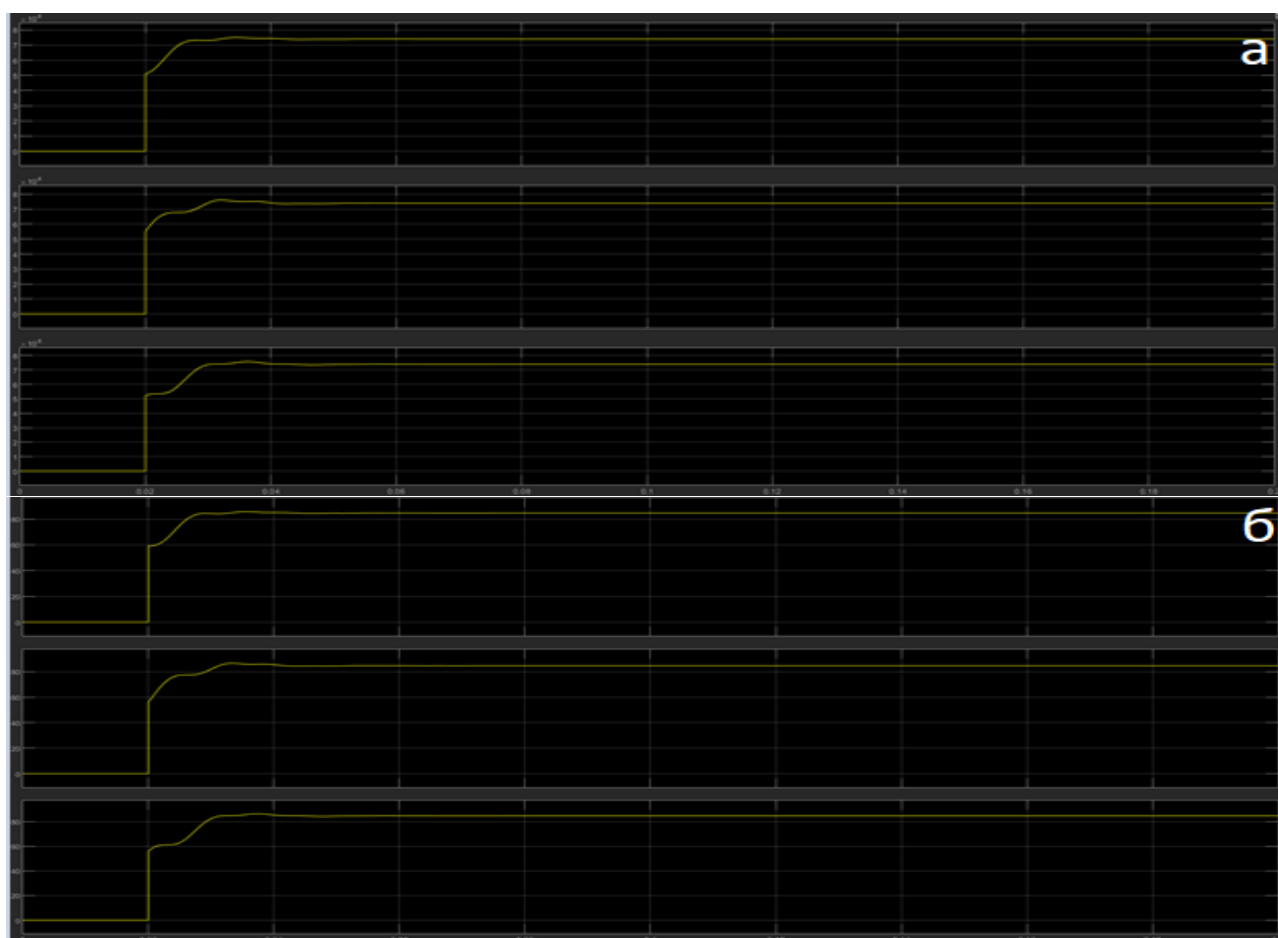


Рис. 5. Сигналы после RMS-преобразования: а – напряжение; б – ток

Выводы

Разработан прототип цифрового двойника силового трансформатора в среде MATLAB/Simulink, воспроизводящий полный тракт передачи электроэнергии и включающий подсистему обработки измерительных сигналов с фильтрацией и вычислением действующих значений.

Основные результаты работы:

Создана имитационная модель системы электроснабжения с трансформатором 30 МВА, 132/11 кВ с использованием библиотеки Simscape Electrical.

Реализована трёхканальная подсистема обработки измерительных сигналов на основе фильтра Баттерворта 8-го порядка и вычислителя True RMS.

Экспериментально подтверждена работоспособность модели в режимах холостого хода и под нагрузкой. Установлено, что RMS-значения первичного тока корректно отражают изменение режима работы трансформатора.

Разработанный прототип имеет открытую архитектуру и может быть доработан в направлениях: добавление нелинейной характеристики насыщения магнитопровода, интеграция тепловой подсистемы, подключение реальных датчиков через промышленные протоколы IIoT (MQTT, OPC UA), разработка алгоритмов предиктивной диагностики

Список литературы:

1. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы: справочная книга. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.
2. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. – Минск: Межгоссовет, 1997.
3. IEC 60076-7:2018. Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers.
4. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication // White Paper. – 2014.
5. Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. – Academic Press, 2019.
6. MathWorks. Simscape Electrical User's Guide. – The MathWorks Inc., 2025

