

О Т З Ы В

официального оппонента кандидата технических наук

Кобелева Андрея Степановича

**на диссертационную работу Подобного Александра Викторовича
«Методика создания цифровых двойников трансформаторов на основе
корректируемых по результатам эксперимента имитационных моделей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.13.12. – Системы автоматизации проектирования
(электротехника, энергетика).**

Актуальность темы диссертации

Одно из актуальных направлений цифровизации экономики в России и в мире, на которое в настоящее время обращено пристальное внимание, связано с понятием цифровых двойников (ЦД). В приложении к САПР речь здесь, в первую очередь, идет о частном случае реализации технологии ЦД, получившем название цифровых прототипов проектируемых технических устройств, а также о ЦД экземпляров изготовленного устройства, которые могут быть использованы уже на стадии эксплуатации для оценки возможных повреждений данного конкретного устройства и возможных последствий выбранных режимов его эксплуатации. В Диссертации Подобного А.В. в качестве таких устройств рассматривается силовой трансформатор, являющийся одним из наиболее востребованных элементов систем электроснабжения. Затрагиваются также и трансформаторы малой мощности, являющиеся необходимым устройством всех систем автоматики и телемеханики.

Использование ЦД на стадии проектирования позволяет существенно снизить затраты на НИОКР, а также повысить точность поверочных расчетов за счет проведения расширенной программы численных исследований проектируемого устройства в различных режимах работы, в том числе переходных и аварийных. Использование ЦД на стадии эксплуатации позволяет своевременно оценить риски, связанные с режимами его работы. Также в последнее время развивается направление, связанное с диагностикой внутренних повреждений трансформаторов, путем анализа его характерных параметров. Здесь также автор предлагает оригинальный подход к решению проблемы.

Таким образом, актуальной является проблема разработки новых подходов к созданию ЦД трансформаторов, основанных, как предлагает автор, на использовании имитационных моделей трансформаторов, корректируемых по результатам экспериментальных измерений на реальном объекте.

Новизна, достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

К научной новизне приведенных в диссертации исследований можно отнести следующие положения:

1. Разработаны методики создания и использования цифровых двойников на стадиях НИОКР и поверочного расчета в САПР однофазных и трехфазных трансформаторов. Данные методики включают в качестве необходимого элемента исследование ЦД трансформаторов, выполненных в виде уточненных имитационных моделей проектируемого устройства, корректируемых по экспериментальным осциллограммам токов и напряжений реального устройства.

2. Разработан ряд имитационных моделей однофазных и трехфазных трансформаторов, построенных на основе теории цепей, как основы ЦД. Их отличительной особенностью является то, что они адаптированы к возможности их коррекции с использованием экспериментальных осциллограмм токов и напряжений реального устройства.

3. Разработана методика коррекции имитационной модели однофазного трансформатора, основанная на оригинальном алгоритме построения характеристики намагничивания трансформатора по осциллограммам токов и напряжений, снимаемым с реального устройства с использованием разработанного автором регистратора. Разработанная методика позволяет достичь высокой степени совпадения расчета с экспериментом.

4. Разработана методика коррекции имитационной модели трехфазного трансформатора. Здесь наибольший интерес представляет разработанный автором алгоритм решения нелинейной системы уравнений, построенной по экспериментальным осциллограммам реального устройства. Данный алгоритм позволяет рассчитать характеристики намагничивания отдельных ветвей

магнитной цепи трансформатора, внедряемые в его имитационную модель в целях коррекционной настройки на реальное устройство.

Практическое значение диссертационной работы

Полученные автором результаты могут быть использованы в теории проектирования не только трансформаторов, но и всех типов электромеханических преобразователей энергии. Автор предлагает оригинальный подход к созданию ЦД электромеханических устройств, основанный не на диагностических, а на имитационных моделях, построенных на имитации физических явлений в исследуемом устройстве. При этом в отличие от традиционного подхода к решению данной проблемы предлагается, в большинстве случаев, избавиться от необходимости использования 3D- и 2D-моделей магнитного поля, заменив их уточненными цепными моделями, что обеспечивает повышенное быстродействие моделей, и их применение в режиме имитации реальных режимов работы устройства.

Полученные результаты, включая доработанную САПР трансформаторов, целесообразно использовать на предприятиях трансформаторостроения в дополнение к уже имеющимся системам проектирования.

Практическая значимость работы подтверждена актами внедрения результатов исследований на производственные предприятия, занимающиеся серийным выпуском трансформаторов.

Общая характеристика диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 144 наименования, и приложений. Основная часть работы изложена на 140 страницах и содержит 66 иллюстраций.

В первой главе выполнен обзор по теме исследования. Дан анализ проблемы разработки и использования в промышленности цифровых двойников силовых трансформаторов на различных этапах их жизненного цикла. Поставлена задача разработки методики создания и использования цифровых двойников на основе имитационных моделей трансформаторов, корректируемых по результатам эксперимента. Дан анализ состояния проблемы имитационного моделирования

трансформаторов и проблемы мониторинга и диагностики трансформаторов. Принято решение использовать в качестве основы имитационных моделей трансформаторов модели, построенные на основе теории цепей. В качестве инструментальной основы для имитационного моделирования выбран пакет MatLab Simulink SimPowerSystems. В качестве инструментальной основы САПР выбран пакет MSExcel, с внедренной в него системой программирования VBA и связанной с MatLab посредством интерфейса ExLink. Для моделирования магнитных полей в трансформаторе использована библиотека EMLib (разработка ИГЭУ). Для проведения экспериментальных исследований принято решение разработать собственный многоканальный регистратор с повышенным быстродействием.

Во *второй главе* приведены результаты разработки моделей для реализации методики создания цифровых двойников трансформаторов. Сначала дано обоснование принципиальной возможности использования цепных моделей для создания имитационных моделей трансформатора без потери точности. Определено место полевых моделей в данной технологии. Обосновано использование 3D-моделей магнитного поля для решения поставленной задачи. Далее приведен разработанный автором математический аппарат, лежащий в основе имитационных моделей однофазного и трехфазного трансформаторов. Приведены результаты расчета включения трансформаторов на этих моделях. Основной акцент сделан на режиме холостого хода, который определяется конструкцией и свойствами магнитопровода. Показано, что данные модели можно использовать не только для имитации режимов работы трансформатора, но и для анализа возможных неисправностей магнитной системы без разборки трансформатора.

Третья глава посвящена разработке методики коррекции имитационных моделей трансформаторов на основе экспериментально регистрируемых осциллограмм токов и напряжений. Сначала рассмотрена методика коррекции модели однофазного трансформатора. При этом получено практически идеальное совпадение расчетной кривой тока холостого трансформатора, полученной на модели, с реальной осциллограммой. Для построения методики коррекции модели

трехфазного трансформатора был разработан оригинальный алгоритм, в основе которого лежит построение и решение системы нелинейных уравнений на основе реальных осциллограмм трансформатора. Данный алгоритм позволяет получить реальные кривые намагничивания отдельных ветвей магнитной цепи трансформатора, которые поставляются непосредственно в имитационную модель трансформатора. Сравнение расчетных кривых токов холостого хода в фазных обмотках трансформатора с реальными осциллограммами говорят о неплохом совпадении результатов, которые, тем не менее, нельзя назвать точным совпадением. В то же время, полученный результат и предложенная методика коррекции модели, говорят о формулировке перспективного направления, которое следует развивать до получения такой же степени совпадения с экспериментов, которое получено в случае однофазного трансформатора.

Для экспериментального подтверждения полученных результатов автором был разработан 12-канальный регистратор с частотой выборки до 100 кГц. Данный регистратор также достоин особого внимания, так как реализован в бюджетном варианте и доступен для предприятий из сферы малого и среднего бизнеса.

Четвертая глава посвящена разработке методик создания и использования цифровых двойников при проектировании и эксплуатации трансформаторов. Данные методики могут быть использованы на таких стадиях жизненного цикла трансформаторов, как НИОКР, проектирование, приемо-сдаточные испытания изготовленного устройства, эксплуатация, включая диагностику внутренних неисправностей. С точки зрения САПР особый интерес вызывает методика построения цифрового прототипа проектируемого устройства, основанная на имитационных моделях, корректируемых по результатам приемо-сдаточных испытаний партий однотипных устройств. Данная модель может быть использована в качестве расширения к подсистеме поверочного расчета. Модель позволяет оценить работу проектируемого устройства в нормальных, переходных и аварийных режимах в составе электросети.

Похвально, что диссертант не только разрабатывает наукоемкую подсистему САПР трансформаторов, но и имеет профессиональную компетенцию

разработчика физических устройств по сбору электрических данных, о чем свидетельствует создание оригинальных измерительных регистраторов. Регистратор – важный компонент ЦД, без которого калибровка ЦД является проблематичной. Однако вызывает сожаление, что регистратор, по меньшей мере, не защищен полезной моделью.

Достоинство созданной диссертантом методики создания и использования ЦД – в ее инвариантности. Проектировщику предоставляется инструмент для уточнения методики проектирования путем ее настройки на условия конкретного производства.

В заключении отмечено, что поставленная цель достигнута и поставленные задачи решены в полном объеме.

Замечания по работе.

1. В работе отмечено, что использование цифровых двойников предполагается на всех стадиях жизненного цикла трансформаторов. Это ненужное преувеличение, так как есть конкретные стадии, на которых действительно требуется использование ЦД, а есть стадии, где этого не требуется.

2. Диссертанту некорректно делать ссылку на собственную работу, упоминая концепцию четвертой промышленной революции. Здесь была бы уместной ссылка на одноименную базовую работу Клауса Шваба.

3. Калибровка ЦД требуется не только ввиду разброса свойств электротехнических материалов, но и из-за технологических погрешностей изготовления физического объекта.

4. Нет прямой зависимости срока службы трансформатора от «технологии» его расчета (к стр. 5 диссертации).

5. В виду повышения точности математических моделей следует сопоставлять их погрешность и с погрешностью измерительного оборудования.

6. Из рис. 4.5 неясно, предусмотрен ли в принципе в подсистеме САПР диссертанта модуль оценки надежности трансформатора.

7. Поскольку автор занимается, в том числе, проблемой обработки зашумленных данных, получаемых с регистратора, интересна его позиция о внедрении в подсистему САПР технологий машинного обучения.

8. При описании генетического алгоритма, стр. 89 работы, отсутствуют его атрибуты (селекция, кроссинговер и т.п.). Возникает вопрос, о генетическом ли алгоритме идет речь?

9. Несколько наивно выглядят рассуждения диссертанта об отсутствии надежных аналогов трансформаторов в КБ, которые предполагают проводить соответствующие НИОКР (к стр. 102 диссертации). Разумеется, наличие аналогов/прототипов не умаляет значимости ЦД.

10. Оппонент выступает против тезиса, что следует сокращать число высококвалифицированных экспертов за счет внедрения ЦД (см. стр. 21 диссертации).

11. Нет пояснений, почему в моделях не учитывается анизотропия стали.

12. Использование активного сопротивления с постоянным номиналом в ветви намагничивания схемы замещения трансформатора для моделирования гистерезисных явлений оправдано только в установившемся режиме и при заданной частоте. В переходных режимах это повышает погрешность вычислений.

13. В модели трехфазного трансформатора использованы кривые намагничивания ветвей магнитной системы, построенные на основе кривой статической магнитной проницаемости стали. В то же время для анализа переходных режимов следует пользоваться дифференциальной магнитной проницаемостью. Возможно, именно этим вызвано несовпадение расчетных кривых с экспериментальными осциллограммами при моделировании трехфазного трансформатора.

14. Недостаточно детально прописано, какие конкретные эксперименты и мероприятия должны быть выполнены на стадии приемосдаточных испытаний для построения цифрового прототипа проектируемого устройства.

15. Предлагаемый автором подход к созданию ЦД трансформаторов абсолютно не затрагивает таких вопросов, связанных с надежностью трансформаторов, как контроль трансформаторного масла, контроль изоляции, контроль целостности обмоток и т.п. В будущем, вероятно, именно в этом направлении следует развивать данную работу.

Выводы.

Отмеченные замечания не снижают научной ценности работы и могут быть устранены в дальнейшей работе соискателя. Диссертация Подобного А.В. является оригинальной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и практической значимостью.

Диссертационная работа Подобного А.В. отвечает требованиям пп 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г. Соискатель Подобный Александр Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика)».

Официальный оппонент

Начальник расчетно-теоретического сектора

ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром»

(представительство г. Владимир)

Специальность кандидатской диссертационной

работы 05.09.01 – Электромеханика и

электрические аппараты

Кобелев

Андрей Степанович

29.07.2022г.

Адрес организации: 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 5, корп. 30. (ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром», представительство г. Владимир).

Сайт организации: www.ruselprom.ru

Тф организации: 8 (800) 301-35-31

Адрес электронной почты организации: mail@ruselprom.ru

Подпись к.т.н. Кобелева А.С. заверяю:

Исполнительный директор ООО «Инжиниринговый Центр «РУСЭЛПРОМ»

Бедкер Антон Александрович

11.08.2022

(дата)

Печать организации

