

## ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Бояринов Александр Петрович [boyarinov\\_sasha2000@mail.ru](mailto:boyarinov_sasha2000@mail.ru).

### **Аннотация:**

В данной статье представлен анализ существующих концепции построения интеллектуальных систем электроснабжения и также выявлены узлы системы, оказывающее наибольшее влияние на работу системы. Согласно проведённому анализу данным узлом является силовой трансформатор. С целью повышения надёжности функционирования системы была представлена методика синтеза цифрового двойника силового трансформатора, описаны необходимые компоненты системы, необходимый набор входных и выходных координат системы и способы формирования моделей объекта. Полученный цифровой двойник позволит повысить надёжность функционирования системы и улучшить управляемость объектом для обеспечения наиболее эффективных режимов перетоков мощности в системе электроснабжения.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, силовой трансформатор, диагностика, идентификация, smartgrid, microgrid.

Современные тенденции развития электроэнергетики поднимают вопросы о надёжном и эффективном энергоснабжении потребителя. В современной «зеленой» энергетике ответом на выше озвученные вопросы являются использование распределённой генерации и системы smartgrid. Использование данной концепции позволяет обеспечить надёжное функционирование системы позволяет повысить надёжность системы электроснабжения, так как источники электрической энергии находятся в непосредственной близости к потребителю, что снижает потери при передаче энергии. Использование интеллектуальных систем контроля и мониторинга узлов и подсистем системы электроснабжения обеспечивает оптимальные режимы работы системы.

На основании существующих тенденций развития систем электроснабжения наиболее перспективными являются системы электроснабжения, построенные по принципу microgrid. Существуют три базовых архитектуры системы microgrid:

- 1) система электроснабжения без промежуточной шины;
- 2) система электроснабжения промежуточной шиной постоянного тока;
- 3) система электроснабжения с промежуточной шиной постоянного тока [1].

Все вышеперечисленные архитектуры направлены на обеспечения надёжного электроснабжения потребителя. Не смотря на разнообразные варианты архитектуры электроснабжения потребителя одним из важных узлов системы электроснабжения потребителя является силовой трансформатор. Силовой трансформатор в зависимости от типа архитектуры microgrid выполняет функции объединения различных участков microgrid между собой, а также подключение потребителя к системе электроснабжения [2].

Как видно из описанного функционала силовой трансформатор является одним из ключевых узлов системы электроснабжения. Следовательно, от надёжного его функционирования зависит и надёжное функционирование всей системы электроснабжения [3].

Поэтому необходимо разработать интеллектуальную систему идентификации состояния силового трансформатора.

В современной промышленности имеют распространение системы сигнализирующего типа. Данные устройства предупреждают оператора о предаварийных и аварийных режимах работы. Но в рамках промышленности «Индустрии 4.0» данные системы являются архаичными, так как не подразумевают и не могут реализовать адекватные каналы обмена данными с верхним уровнем системы управления в автоматическом режиме [5].

Современным решением, советуящим принципам «Индустрии 4.0» является использование цифровых двойников.

Цифровой двойник – это набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический реальный произведенный продукт от микроскопического уровня для геометрического макроскопического уровня. Цифровой двойник – это не просто математическая модель, описывающая интересующие разработчика процессы, это система существующая одновременно с самим объектом и является его полным аналогом в цифровом пространстве, и способная оказывать воздействие на реальный объект с целью достижения заданных показателей [6].

Таким образом цифровой двойник – это система, состоящая из датчиков, информационных каналов, вычислительной машины и устройств управления объектом.

Для построения цифрового двойника трансформатора в начале необходимо выделить возможные режимы работы: режим холостого хода, режим нагрузки, режим короткого замыкания.

На поведение работы трансформатора, или другим словами на его состояние, в любом из этих режимов будут влиять: мощность потребителя, напряжение, ток, температур трансформаторного масла, температура обмоток трансформатора и внешние климатические условия, если их влияние невозможно исключить.

Так как цифровой двойник — это система, идентифицирующая состояния объекта, то необходимо задаться данными состояниями: дефектность межливостовой изоляции, пожар в стали, ненормальное гудение, дребезжание, жужжание и т.п. у шихтованного магнитопровода, недопустимое гудение у стыкового магнитопровода, недопустимо большие потери холостого хода у броневых трехфазных трансформаторов, обрыв заземления, витковое замыкание, обрыв в обмотках, пробой на корпус, междуфазное короткое замыкание обмоток, оплавление или выгорание контактных поверхностей, перекрытия между фазами или между отдельными ответвлениями, пробой на корпус, перекрытие между вводами, течь масла в местах уплотнений, течь масла в армировке ввода, ненормальное повышение температуры масла и ненормальный нагрев, ухудшение качества масла [7].

Следовательно, для организации сбора данных, описывающих поведение объекта, т.е. получение цифровой тени объекта, необходимо обеспечить наличие в системе датчиков мощности, напряжения и тока в электрических контурах системы, и наличие датчиков температуры на обмотках трансформатора и в емкости трансформаторного масла, а также наличие датчика уровня в жидкости или датчика давления. При отсутствии возможности измерения некоторых из вышеперечисленных параметров можно произвести организацию подсистем наблюдателей для вычисления отсевающих параметров системы, но использование данных систем потребует дополнительных вычислительных мощностей со стороны ЭВМ.

Для получения адекватного цифрового двойника желательно получить все вышеописанные данные для каждого из режимов, если это допустимо условиями функционирования силового трансформатора, это позволит получить big data описывающие цифровую тень объекта. Данный этап разработки цифрового двойника является самым время затратным, так как от качества обработки и объема полученных данных зависит точность работы цифрового двойника [4].

Так как неотъемлемой частью цифрового двойника является детальная математическая модель поведения системы то необходимо произвести ее разработку. Одним из самых простых способов является использование систем машинного обучения. Данный способ позволяет обучить систему идентификации параметров с высокой точностью, но для проверки ее эффективности требуется наличие большого дополнительного объема данных, на котором будет проверяться точность обученной модели. Более сложным является построение математических моделей, данный способ более сложный и дорогостоящий, так как требует наличие специального программного обеспечения. Отличием первого метода от второго является то, что в первом методе система описывает объект как «Черная коробка», в которую разработчик не может вносить изменения или правки в оперативном режиме без переобучения системы. В результате использования второго метода получается математическая или имитационная модель объекта, в которой возможны правки в оперативном режиме. Использование математической/имитационной модели позволяет дополнить отсутствующие данные о состоянии объекта. Получение модели по первому способу быстрый и малозатратный способ, в отличие от второго, но второй позволяет обеспечить высокую гибкость при оперативных изменениях и непосредственный доступ к самой модели объекта.

Последней и самой сложной компонентой цифрового двойника как продукта является интеграция полученной математической модели в ЭВМ или микро-ЭВМ. Так как цифровой двойник должен функционировать параллельно с самим физическим объектом, то полученные данные с датчиком, расположенные в объекте, должны обрабатываться в реальном времени и обчитываться на полученным первым или вторым способом модели в реальном времени. Это вынуждает обращаться к специфическим операционным системам и предъявлять высокие требования к вычислительной мощности ЭВМ [8].

На основании вышеописанного алгоритма синтез цифрового двойника можно разработать цифровой двойник силового трансформатора.

Данный цифровой двойник позволит обеспечить идентификация режимов работы силового трансформатора в режиме реального времени, а также производить диагностики компонентов трансформатора с целью определения поломки. На основе полученных с цифрового двойника информации система управления системой электроснабжения сможет обеспечивать надёжное и эффективное перераспределение мощности в системе электроснабжения. На рисунке 1 изображен алгоритм разработки системы.

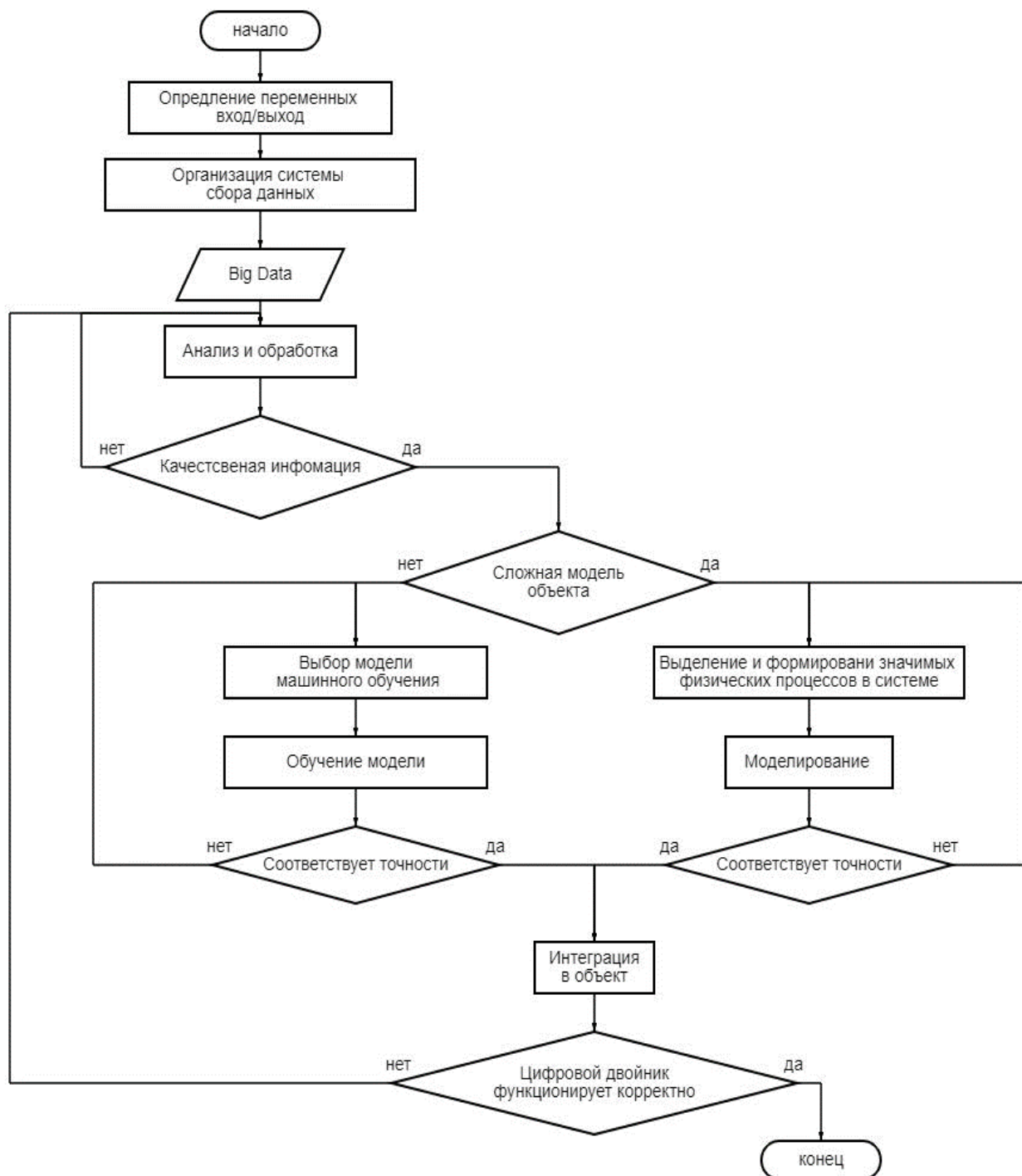


Рисунок 1 – Алгоритм разработки системы.

## Список используемой литературы

1. Разработка технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов на основе цепных моделей и 2D-моделей магнитного поля / А. И. Тихонов, А. В. Стулов, И. В. Еремин [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 1(29). – С. 76-82. – EDN PSWEPY.
2. Бутырин, П. А. Цифровизация и аналитика в электротехнике. Цифровые двойники трансформаторов / П. А. Бутырин, М. Е. Алпатов // Электричество. – 2021. – № 10. – С. 4-10. – DOI 10.24160/0013-5380-2021-10-4-10. – EDN FGJJUH.
3. Иванов, И. А. Исследование и анализ устойчивой работы системы электроснабжения автономного потребителя / И. А. Иванов // Наука и молодежь : Материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. Часть 1. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2022. – С. 312-314. – EDN MSOWIW.
4. Kotin, D. A. Investigation of the Stability and Frequency Properties of a Generating Complex when Operating on an Autonomous Load / D. A. Kotin, I. A. Ivanov // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021 : 15, Novosibirsk, 19–21 ноября 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 190-195. – DOI 10.1109/APEIE52976.2021.9647494. – EDN YCVYZE.
5. Колесников, И. Е. Единая модель цифровой диагностики состояния силового трансформатора / И. Е. Колесников, А. В. Коржов, К. Е. Горшков // Приборы. – 2021. – № 3(249). – С. 51-56. – EDN BDWVHS.
6. Хальясмаа, А. И. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования / А. И. Хальясмаа, И. С. Ревенков, А. В. Сидорова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 3(55). – С. 99-113. – EDN WEXWZR.
7. Имитационная модель силового трехфазного трансформатора броне-стержневой конструкции с витым магнитопроводом / А. И. Тихонов, А. А. Каржевин, А. Н. Голубев, А. В. Стулов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 4. – С. 46-52. – DOI 10.17588/2072-2672.2022.4.046-052. – EDN VIRHVN.
8. Ahmad K. Sleiti, Jayanta S. Kapat, Ladislav Vesely, Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capitalintensive large engineering systems, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 3704-3726, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2022.02.305>.

## Информация об авторах

Бояринов А. П. – студент группы 8Э(з)-11, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», РФ, Алтайский край, г. Барнаул.

## Ссылка для цитирования

Бояринов, А. П. Принцип построения интеллектуальной системы диагностики силового трансформатора / А. П. Бояринов // Энерджинет. 2023. № 1. URL: <http://nopak.ru/231-601> (дата обращения: 18.11.2023).

