

УДК 681.323

DOI:10.25729/ESI.2026.42.2.010

Методика построения цифровых двойников установок распределенной генерации с использованием нечетких моделей

Короткова Ксения Евгеньевна, Говорков Алексей Сергеевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, kseniakorotkovs@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные компоненты цифровых двойников и схема их взаимосвязи, особенности установок распределенной генерации и проблем, возникающих при их использовании. На сегодняшний день технология цифровых двойников активно используется в сфере промышленного производства. Цифровые двойники выступают в роли виртуальных аналогов физических объектов, групп объектов или процессов. Они представляют собой сложные программные решения, основанные на большом объеме данных и синтезе технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и специализированного ПО, что позволяет создавать динамичные цифровые модели, способные к "живому" взаимодействию и адаптации. В статье представлена методика построения цифровых двойников установок распределенной генерации, применение которых способствует оптимизации процессов проектирования, эксплуатации и мониторинга электроэнергетических систем. Методика излагается на примере турбогенераторной установки и включает этапы: сбор данных о физическом объекте, моделирование турбогенераторной установки, сравнение экспериментальных данных и отклика нечеткой модели. Научная новизна исследования заключается в разработке гибридного подхода, сочетающего нейронные сети, систему нечеткого логического вывода и генетический алгоритм; в выявлении минимального среднеквадратичного отклонения (СКО) отклика модели от экспериментальных данных; определении оптимального количества правил в нечеткой системе (144 правила), а также в установлении зависимости между точностью модели и вычислительными затратами. Практическая значимость результатов состоит в возможности применения разработанной методики для оптимизации работы установок распределенной генерации, повышения надежности электроснабжения и эффективности управления электроэнергетическими системами. Предложенный подход позволяет создавать точные цифровые модели, способные адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых энергетических систем, модернизации существующих объектов и внедрении технологий Smart Grids. Предложенный подход открывает новые перспективы для развития энергоэффективных и надежных систем электроснабжения.

Ключевые слова: цифровые двойники, установки распределенной генерации, Smart Grids

Цитирование: Короткова К.Е. Методика построения цифровых двойников установок распределенной генерации с использованием нечетких моделей / К.Е. Короткова, А.С. Говорков // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 2(42). – С. 128-142. – DOI:10.25729/ESI.2026.42.2.010.

Введение. Цифровые двойники (ЦД) – инновационная технологическая концепция, созданная для улучшения работы физических прототипов, производственного оборудования, сложных систем и отдельных процессов [1]. Концепция была впервые представлена в 2003 году и получила широкое признание благодаря работе профессора и заместителя директора Центра управления жизненным циклом и инновациями Технологического института Флориды Майкла Гривса «Цифровые двойники: превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода» ЦД представляет собой гибридную модель, которая сочетает физические и цифровые компоненты, разрабатывается с учетом уникальных потребностей производства и служит для предсказания неисправностей оборудования, подготовки графиков ремонта, снижения затрат на обслуживание и предотвращение неожиданных простоев.

Надежность электроснабжения достигается за счет использования установок распределенной генерации (УРГ), включая установки, основанные на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Разработка методик создания ЦД для УРГ является актуальной, так как это позволит получить полные математические (цифровые) модели систем

электроснабжения, которые помогут решать задачи оптимального управления УРГ, их размещения, планирования ремонтов, диагностики электрооборудования и многое другое.

Одной из ведущих отраслей экономики является энергетика. Стремительное внедрение новейших технологий в эту отрасль усложняет обеспечение устойчивой работы энергосистем. В связи с большими объемами обрабатываемой и хранящейся информации, быстрым протеканием процессов и комплексным анализом данных оперативно-диспетчерское управление необходимо постоянно совершенствовать [2], учитывая цифровизацию структуры электроэнергетики и внедрение Интернета вещей с целью реализации концепции виртуальных электростанций при управлении множеством УРГ.

1. Теоретические основы цифровых двойников.

1.1. Основные компоненты цифрового двойника. Основными компонентами цифрового двойника являются:

1. Физическая модель с точным описанием ее структуры и компонентов, а также физических процессов, происходящих внутри объекта.
2. Данные, полученные от систем сбора данных. Они обеспечивают мониторинг состояния установки и показывают данные о производительности, состоянии оборудования и окружающей среде.
3. Алгоритмы для обработки и анализа собранных данных и математические (цифровые) модели для симуляции работы установки в различных условиях и сценариях.
4. Интерфейс визуализации данных и результатов анализа, обеспечивающий удобный доступ к информации для операторов и инженеров, а также возможность управлять цифровым двойником и получать необходимые графики и отчеты.
5. Системы управления установками, позволяющие использовать данные цифрового двойника для оптимизации работы и принятия решений и автоматизации процессов управления.
6. История объекта, позволяющая оценить и показать работу объекта в прошлом, и на основании этих данных улучшить модели и алгоритмы.
7. Симуляционные модели, позволяющие проводить виртуальные испытания и симуляции различных сценариев работы установки и оценивать влияние изменений в конфигурации или условиях эксплуатации на производительность.
8. Обратная связь и обучение, используемые для обновления и улучшения цифрового двойника на основе новых данных и результатов анализа, при непрерывном обучении и адаптации модели к изменяющимся условиям.

Эти компоненты работают в совокупности, создавая динамическую и адаптивную модель, которая помогает в управлении, оптимизации и прогнозировании работы установок распределенной генерации. Графическое представление и взаимосвязи компонентов цифрового двойника иллюстрируются рис. 1.

2. Распределенная генерация: особенности и вызовы. Установки распределенной генерации представляют собой системы, которые производят электроэнергию вблизи места потребления, а не на крупных централизованных электростанциях. Эти установки могут использовать различные источники энергии, включая возобновляемые (солнечные панели, ветряные турбины и др.) и традиционные (дизель-генераторные установки).

Необходимость использования УРГ обусловлена несколькими ключевыми факторами, которые становятся все более актуальными. Во-первых, УРГ позволяют значительно сократить потери электроэнергии, так как производство происходит вблизи мест потребления. Это минимизирует расстояние, на которое энергия должна быть передана, что особенно важно

в условиях растущего спроса на электроэнергию и необходимости повышения эффективности систем.

Во-вторых, распределенная генерация способствует интеграции возобновляемых источников энергии, таких, как солнечные и ветровые установки, что позволяет снизить углеродный след и поддерживать устойчивое развитие, поэтому становится критически важным в условиях глобальных климатических изменений.

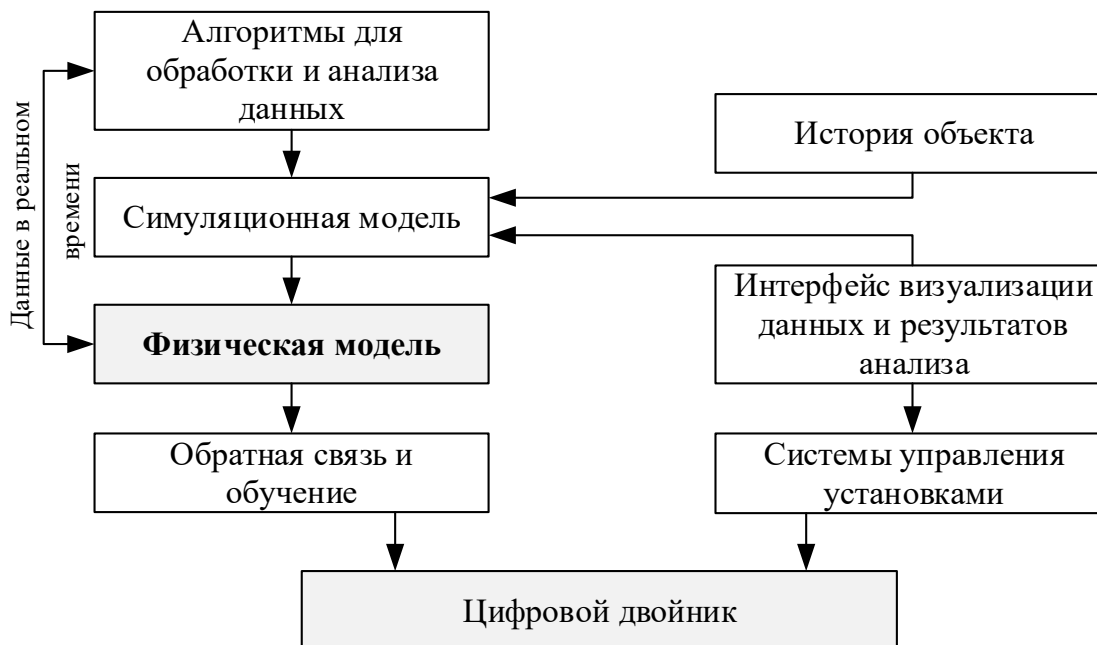


Рис. 1. Графическое представление компонентов цифрового двойника

Кроме того, УРГ обеспечивают гибкость и модульность энергетических систем, позволяя адаптироваться к изменяющимся потребностям и условиям рынка. Это особенно важно для регионов с различными уровнями потребления и доступностью ресурсов. УРГ также помогают разгружать централизованные электросети в пиковые часы, повышая надежность и стабильность электроснабжения.

Не менее важным является и экономический аспект: УРГ могут снижать затраты на электроэнергию для потребителей, а также создавать новые рабочие места в сфере возобновляемой энергетики. Однако, несмотря на все преимущества, использование УРГ связано с определенными вызовами, такими, как необходимость интеграции в существующие сети, управление непредсказуемым производством энергии и соблюдение нормативных требований. Тем не менее, преодоление этих трудностей открывает новые горизонты для устойчивого и эффективного энергетического будущего, делая установки распределенной генерации важным элементом в трансформации энергетической системы.

Ниже рассмотрим более подробно особенности и проблемы использования установок распределенной генерации.

2.1. Особенности УРГ:

2.1.1. Близость установок распределенной генерации к местам потребления электроэнергии играет ключевую роль в повышении эффективности энергетических систем. Когда УРГ находятся рядом с потребителями, это позволяет значительно снизить потери энергии, которые неизбежно возникают при передаче электроэнергии на большие расстояния. В традиционных централизованных системах, где электростанции расположены далеко от потребителей, происходит значительное количество потерь из-за сопротивления проводников и других факторов, связанных с транспортировкой электроэнергии. Эти потери могут достигать значительных значений, особенно в условиях высоких нагрузок.

Расположение УРГ рядом с потребителями не только снижает потери при передаче электроэнергии, но и способствует повышению общей эффективности энергетической системы. Это создает условия для более устойчивого и надежного энергоснабжения, что особенно важно в условиях растущего спроса на электроэнергию и необходимости перехода на экологически чистые источники энергии. В конечном итоге, такая близость не только улучшает качество энергоснабжения, но и способствует более рациональному использованию ресурсов и снижению воздействия на окружающую среду.

2.1.2. Гибкость и модульность УРГ являются одними из их наиболее значительных преимуществ, позволяя им адаптироваться к изменяющимся условиям рынка и потребностям пользователей. УРГ могут быть спроектированы и установлены в компактных масштабах, то есть легче наращивать или уменьшать их мощность в зависимости от текущих потребностей в энергии, что делает их идеальными для динамично развивающихся регионов или для мест с переменным спросом на электроэнергию.

Когда спрос на электроэнергию увеличивается, УРГ могут быть быстро расширены за счет добавления новых модулей или установки дополнительных единиц генерации. Это позволяет обеспечить необходимый уровень энергоснабжения без значительных затрат на инфраструктуру и без необходимости ждать завершения строительства крупных электростанций.

Кроме того, модульность УРГ создает возможность комбинировать разные технологии в зависимости от доступных ресурсов и предпочтений потребителей. Такой подход не только повышает общую эффективность системы, но и способствует более рациональному использованию природных ресурсов.

Таким образом, гибкость и модульность установок распределенной генерации обеспечивают их способность эффективно функционировать в условиях неопределенности и динамичности современного энергетического рынка. Возможность быстро масштабировать и адаптировать установку в зависимости от потребностей пользователей и изменения рыночной ситуации делает УРГ важным инструментом для достижения устойчивого и надежного энергоснабжения в будущем.

2.1.3. Использование возобновляемых источников энергии. Многие УРГ основаны на ВИЭ, что значительно способствует снижению углеродного следа, поскольку ВИЭ производят электроэнергию без выбросов углекислого газа и других парниковых газов, которые способствуют глобальному потеплению. Переход на УРГ, использующие ВИЭ, поддерживает устойчивое развитие, позволяя странам и регионам уменьшать свою зависимость от ископаемых видов топлива, которые истощаются и наносят вред окружающей среде.

Использование ВИЭ в УРГ также способствует диверсификации энергетических источников, что повышает энергетическую безопасность. Это особенно важно в условиях изменения климата и нестабильности на глобальных энергетических рынках.

Кроме того, развитие УРГ на основе ВИЭ способствует внедрению инновационных технологий и повышению уровня осведомленности о важности устойчивого развития среди населения. Люди становятся более вовлеченными в процессы, связанные с энергетикой, и начинают осознавать свою роль в сохранении окружающей среды. Это может привести к росту интереса к энергосбережению, использованию чистых технологий и внедрению новых практик, направленных на снижение потребления энергии.

2.1.4. Снижение нагрузки на централизованные сети. Установки распределенной генерации играют важную роль в разгрузке основных электросетей, особенно в периоды пикового потребления электроэнергии. Так же УРГ могут использоваться для хранения избыточной энергии, например, в период низкого потребления. Ветровые или солнечные

установки могут генерировать больше энергии, чем требуется в данный момент, и эта избыточная энергия может быть сохранена для использования в будущем. Таким образом, УРГ не только способствуют разгрузке сетей в пиковые часы, но и помогают оптимизировать использование ресурсов, что, в свою очередь, делает энергетическую систему более устойчивой и эффективной.

Внедрение УРГ способствует развитию умных сетей, которые могут управлять потоками энергии более гибко и эффективно. Умные сети используют современные технологии для мониторинга и управления потреблением, что позволяет интегрировать УРГ в общую энергетическую систему. Это создает возможности для более рационального распределения ресурсов и повышения общей эффективности, что в конечном итоге приводит к снижению затрат для потребителей и улучшению качества электроснабжения.

УРГ играют ключевую роль в обеспечении надежности и устойчивости электроснабжения, особенно в периоды пикового потребления, разгружая основные электросети и способствуя более эффективному использованию энергетических ресурсов. Это делает их важным элементом и необходимым шагом к созданию более устойчивой и безопасной энергетической системы.

2.1.5 Доступ к новым технологиям. Внедрение современных технологий, таких, как системы хранения энергии и интеллектуальные сети (Smart Grid), значительно улучшает управление распределенной генерацией и способствует созданию более эффективной и надежной энергетической системы [3].

Интеллектуальные сети, в свою очередь, представляют собой интегрированную систему, которая использует современные информационные и коммуникационные технологии для мониторинга и управления распределением электроэнергии. Они позволяют более точно отслеживать потребление и генерируемую энергию в реальном времени, что обеспечивает более эффективное распределение ресурсов. Интеллектуальные сети способны автоматически регулировать потоки энергии, оптимизируя работу УРГ и снижая вероятность перегрузок. Благодаря этому потребители могут получать информацию о своем потреблении и, при необходимости, адаптировать его, что способствует более рациональному использованию ресурсов.

2.2. Проблемы, возникающие при использовании УРГ:

2.2.1 Интеграция УРГ в существующую инфраструктуру электросетей представляет собой сложную задачу, обусловленную множеством факторов, включая различия в стандартах и технологиях. Одной из основных проблем является несовместимость различных систем, которые могут использоваться для управления и распределения электроэнергии.

Разнообразие технологий, применяемых в УРГ, также создает проблемы. Разные типы генераторов имеют различные характеристики и требования к подключению. Это требует разработки унифицированных стандартов и протоколов, чтобы обеспечить совместимость и эффективное взаимодействие всех компонентов системы.

Еще одной важной задачей является необходимость модернизации существующей инфраструктуры. Многие электросети были построены десятилетия назад и не предназначены для работы с распределенными источниками энергии, которые могут генерировать электроэнергию в разных точках сети, что требует значительных инвестиций в их модернизацию.

Различные страны и регионы могут иметь свои собственные правила и нормы, касающиеся подключения УРГ к электросетям. Это может усложнить процесс интеграции и потребовать от операторов сетей учета множества различных требований и стандартов.

Несмотря на эти проблемы, интеграция УРГ в существующую инфраструктуру электросетей является необходимым шагом для создания более устойчивой и эффективной энергетической системы. Разработка новых технологий, унификация стандартов и активное сотрудничество между государственными органами, энергетическими компаниями и производителями оборудования могут значительно облегчить этот процесс. В конечном итоге, успешная интеграция УРГ не только повысит надежность электроснабжения, но и будет способствовать более широкому использованию возобновляемых источников энергии, что имеет критическое значение для достижения целей по снижению углеродных выбросов и борьбе с изменением климата.

2.2.2. Непредсказуемость производства. Производство электроэнергии из возобновляемых источников, таких, как солнечная и ветровая энергия, подвержено значительным колебаниям, зависящим от погодных условий. Это создает определенные проблемы для управления спросом и предложением в энергетической системе, так как потребление электроэнергии часто не совпадает с периодами ее генерации.

Одним из ключевых решений для управления этими колебаниями является использование систем хранения энергии, таких, как аккумуляторы, которые позволяют накапливать избыточную электроэнергию в периоды ее высокого производства и использовать ее в моменты, когда генерация снижается. Кроме того, современные интеллектуальные сети (Smart Grids) помогают оптимизировать распределение энергии, обеспечивая более точное управление потоками в реальном времени. Программы управления спросом играют важную роль, позволяя потребителям адаптировать свое потребление в зависимости от доступности энергии и ценовых сигналов. Все эти меры способствуют созданию более устойчивой и адаптивной энергетической системы, способной эффективно интегрировать возобновляемые источники энергии и минимизировать влияние их колебаний на стабильность электроснабжения.

2.2.3. Необходимость соответствия различным нормативным актам и стандартам может стать серьезным препятствием для внедрения УРГ. Компании и организации, стремящиеся интегрировать новые технологии, часто сталкиваются с высокими требованиями, которые варьируются в зависимости от региона и типа энергетической системы. Эти нормативные акты могут касаться не только технических аспектов, таких, как безопасность и эффективность оборудования, но и экологических норм, которые регулируют воздействие на окружающую среду. Процесс получения необходимых разрешений и лицензий может быть длительным и затратным, что замедляет темпы внедрения инновационных решений. Более того, отсутствие четких и унифицированных стандартов может привести к неопределенности и рискам для инвесторов, что также сдерживает развитие УРГ и их интеграцию в существующие энергетические системы. Для успешного внедрения УРГ необходимо не только разработать эффективные технологии, но и создать благоприятные условия, включая упрощение нормативного регулирования и поддержку со стороны государственных органов.

2.2.4. Экономическая целесообразность: Первоначальные инвестиции в установку и обслуживание УРГ могут быть значительными, что требует тщательного анализа рентабельности перед принятием решения о внедрении таких систем. Поэтому важно проводить детальный анализ, учитывающий не только первоначальные расходы, но и потенциальные долгосрочные выгоды, такие, как экономия на операционных затратах, снижение зависимости от традиционных источников энергии и потенциальные налоговые льготы или субсидии. Также следует учитывать возможные изменения в ценах на энергоресурсы и экологические преимущества, которые могут повысить

конкурентоспособность бизнеса. Только взвешенная оценка всех этих факторов поможет определить целесообразность инвестиций в УРГ и их влияние на финансовую устойчивость компании в будущем.

2.2.5 Технологические риски. Быстрое развитие технологий в сфере УРГ может привести к тому, что существующие установки становятся устаревшими всего за несколько лет после их внедрения. Это явление требует от компаний постоянного обновления и модернизации своих систем для поддержания конкурентоспособности, и эффективности. Новые разработки часто предлагают более высокую производительность, улучшенную эффективность и сниженные эксплуатационные расходы, что делает старые установки менее привлекательными в долгосрочной перспективе. В результате организации, которые не успевают адаптироваться к быстро меняющимся условиям рынка, могут столкнуться с риском утраты конкурентных преимуществ и снижения прибыльности. Кроме того, необходимость регулярного обновления технологий может потребовать значительных финансовых вложений, что создает дополнительную нагрузку на бюджеты компаний. Важно также учитывать, что внедрение новых технологий может потребовать дополнительных затрат на обучение персонала и изменение бизнес-процессов, что также усложняет задачу. Таким образом, для успешного функционирования в условиях стремительных технологических изменений компаниям необходимо не только инвестировать в новые системы, но и разрабатывать стратегию управления инновациями, которая позволит эффективно интегрировать новые решения и минимизировать риски, связанные с устареванием оборудования

2.2.6. Проблемы с хранением энергии: Эффективное хранение энергии, произведенной УРГ, представляет собой одну из ключевых задач в сфере энергетики, особенно для возобновляемых источников энергии, эти источники энергии обладают природным непостоянством. Поэтому для обеспечения стабильного и надежного электроснабжения необходимо разработать эффективные решения для хранения избыточной энергии, которая может быть использована в периоды низкой выработки.

Эффективное хранение энергии также связано с необходимостью интеграции современных технологий управления и распределения энергии. Умные сети способны оптимизировать потребление и распределение энергии, позволяя более эффективно использовать накопленную энергию. Это не только улучшает надежность электроснабжения, но и способствует снижению углеродного следа, что важно для достижения целей устойчивого развития. Таким образом, дальнейшие инвестиции и исследования в области хранения энергии и управления энергосистемами являются ключевыми для успешной интеграции ВИЭ в общую энергетическую инфраструктуру

Установки распределенной генерации имеют потенциал значительно изменить ландшафт энергетической отрасли, способствуя более устойчивому и эффективному производству электроэнергии. Однако для достижения этого потенциала необходимо решить ряд проблем, связанных с интеграцией, экономикой и технологическими аспектами.

3. Методика построения цифровых двойников для установок распределенной генерации. Методика построения цифровых двойников для УРГ представляет собой комплексный процесс, который включает в себя несколько ключевых этапов. Цифровой двойник – это виртуальная модель физического объекта или системы, которая позволяет отслеживать его состояние, производительность и поведение в реальном времени [4]. Для создания цифрового двойника УРГ необходимо учитывать, как физические, так и функциональные характеристики системы.

Цифровой двойник УРГ можно описать формулой:

$$\text{УРГ} = \{P, F, n\}, \quad (1)$$

где P – ключевые параметры нечеткой модели УРГ; F – оптимальные настройки нечеткой модели УРГ, n – КПД УРГ.

3.1. Сбор данных о физическом объекте. Первым этапом построения ЦД УРГ является сбор данных о физическом объекте.

Физическая модель УРГ представлена на рисунке 2 [5].

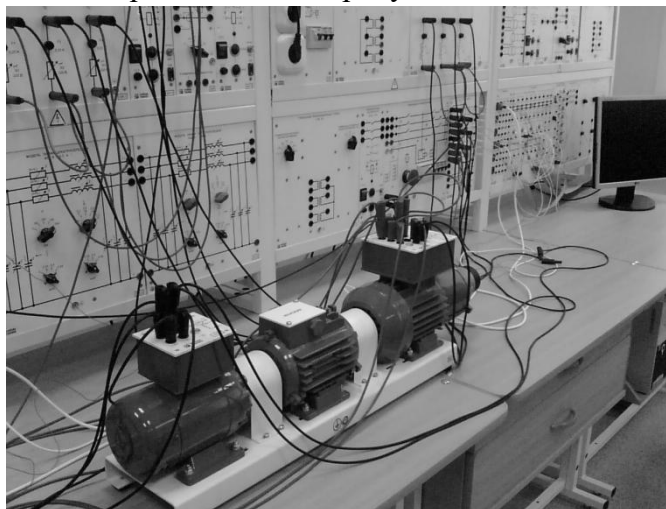


Рис. 2. Фото физической модели УРГ: Т – турбина; ОВ – обмотка возбуждения; BR – датчик угловых перемещений

Нечеткие модели строились парами, по данным, указанным в Таблице 1.

Таблица 1. Данные «вход-выход» нечеткой модели УРГ

№	Вход	Выход
1	P_m - механическая мощность	ω_m – скорость вращения ротора
2	U_f – напряжение возбуждения	U_g – напряжение генератора
3	P_m - механическая мощность	P_g - активная мощность генератора
4	U_f – напряжение возбуждения	Q_g - реактивная мощность генератора
5	V_{asr} – регулятор скорости	P_m – механическая мощность
6	V_{avr} – регулятор возбуждения	U_f – напряжение возбуждения
7	P_m - механическая мощность U_f – напряжение возбуждения	I_g - ток генератора

Установкой распределенной генерации в работе является синхронный генератор малой мощности, ротор которого приводится во вращение с помощью тепловой турбины [6-10].

3.2. Моделирование турбогенераторной установки. На втором этапе осуществляется моделирование системы с использованием подходящих программных инструментов и алгоритмов. Этот этап может включать в себя математическое моделирование, которое позволяет описать динамику процессов в установке, а также использование методов машинного обучения для анализа больших объемов данных и предсказания поведения системы. В результате создается виртуальная модель, которая отражает реальное состояние установки и может быть использована для мониторинга, анализа и оптимизации работы установки распределенной генерации.

Для изучения реакции УРГ была построена модель и выполнено сравнение ключевых параметров исходной системы и полученной модели [11-13].

Моделирование осуществлялось применительно к турбогенераторной установке, работающей на выделенную нагрузку. Схема модели исследуемой системы в MatLab, выполненной с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems, представлена на рис. 3 [14].

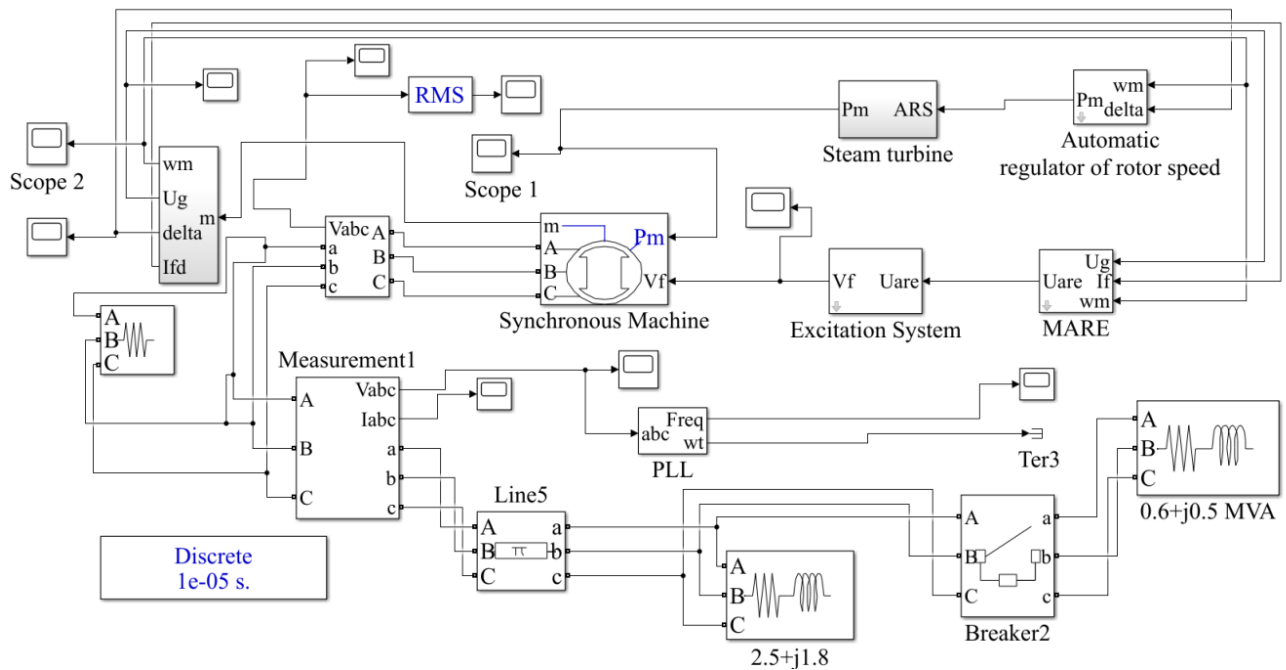


Рис. 3. Схема исследуемой модели УРГ в MatLab

Экспериментальные данные получены в результате работы УРГ в режиме, который может быть описан следующим алгоритмом:

1. Работа турбогенератора на номинальную нагрузку $2,5+j1,8$ МВ·А;
2. Подключение через 10 секунд дополнительной нагрузки на $0,6+j0,3$ МВ·А;
3. Подключаемый потребитель подключается через линию электропередачи длиной 1,8 км (блок Line на рис.4).

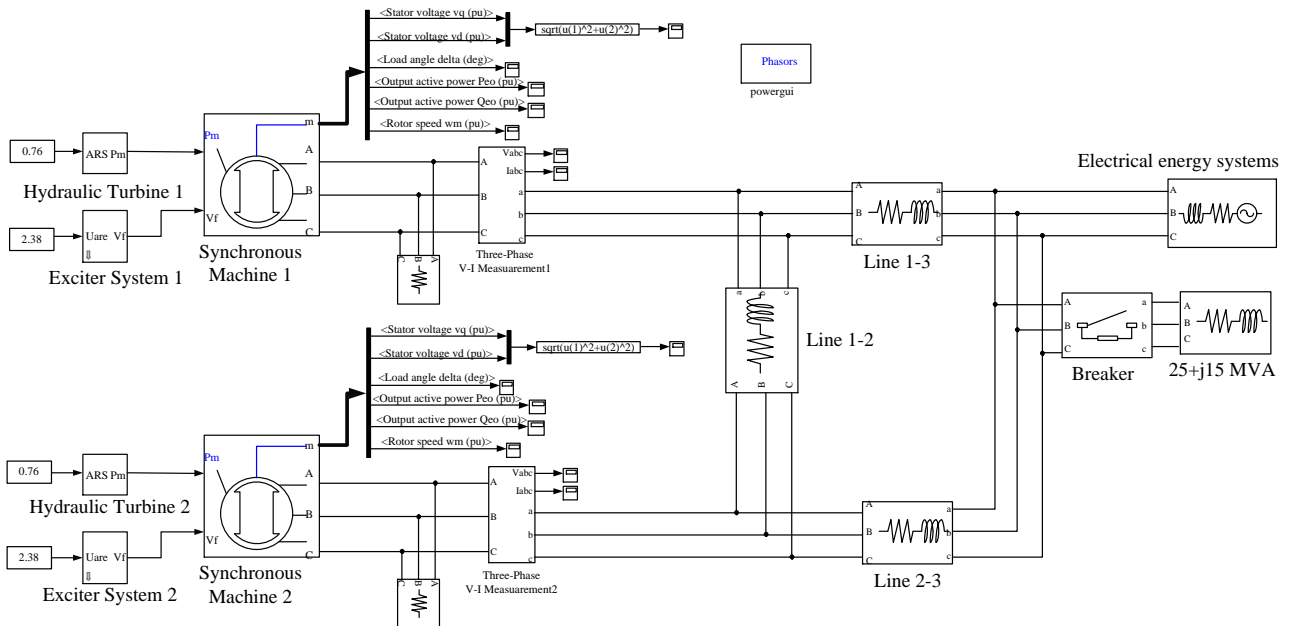


Рис. 4. Схема модели исследуемой сети в MATLAB

3.3. Сравнение экспериментальных данных и отклика нечеткой модели.

Заключительным этапом является сравнение экспериментальных данных и отклика нечеткой модели внедрения системы мониторинга и управления, которая позволит в реальном времени отслеживать состояние установки и вносить коррективы в ее работу на основе данных, получаемых от цифрового двойника. Это обеспечит более высокую эффективность, надежность и устойчивость работы установок распределенной генерации.

Моделирование выполнялось применительно к схеме электроснабжения, в двух узлах которой подключены мини-ГЭС номинальной мощностью по 24 МВт, работающие на базе синхронных генераторов, а третий узел имеет связь с электроэнергетической системой большой мощности. Полная схема модели исследуемой сети в MATLAB, в которой учитываются описываемые выше УРГ с автоматическим регулятором возбуждения (АРВ), автоматическим регулятором скорости (АРС) и нечеткими контроллерами, изменяющими настройки регуляторов, представлена на рис. 4.

На рис. 5 представлены результаты сравнения экспериментальных данных «вход-выход» турбины с обученной оптимизированной нечеткой моделью, построенной с помощью 144 правил типа ЕСЛИ-ТО. Однако для обучения и оптимизации такой продукционной модели требуется мощный вычислительный ресурс. В дальнейшем, используя полученные нечеткие модели для различных режимов работы, можно будет оптимизировать количество нечетких правил. Таким образом, предлагаемый метод построения оптимизированной нечеткой модели отдельного элемента цифрового двойника УРГ дает приемлемые результаты при сравнении с экспериментальными данными.

В качестве средства оценки близости нечеткой модели с экспериментальными данными было принято среднеквадратичное отклонение (СКО), которое в идеальных условиях должно быть близко к нулю.

В данной работе расчет СКО был выполнен при помощи MatLab и применительно к паре переменных «вход-выход» Среднеквадратичное отклонение отклика нечеткой модели от экспериментальных данных, используемых при обучении, составило 0,0126 [15].

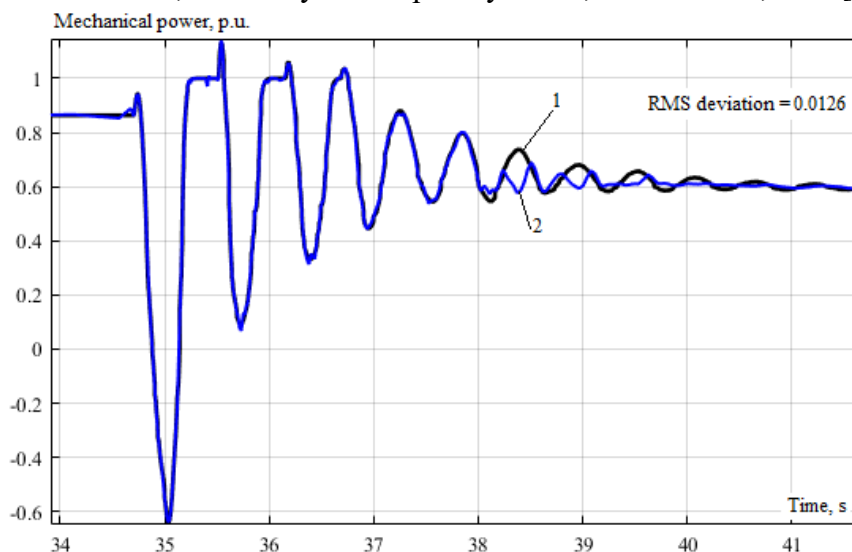


Рис. 5. Результаты сравнения экспериментальных данных и отклика нечеткой модели:
1 – экспериментальные данные; 2 – оптимизированная обученная нечеткая модель (144 правила)

При построении нечеткой модели использовался пакет Fuzzy Logic Toolbox программной среды MatLab, включающий различные алгоритмы нечеткого логического вывода типа Сугено и Мамдани. При использовании алгоритма Сугено применялись два метода дефаззификации: wtaver (weighted average) – метод взвешенного среднего; wtsun – взвешенное суммарное значение [11].

Применение алгоритма типа Сугено было реализовано с помощью функции genfis2, которая генерирует систему нечеткого логического вывода с использованием субтрактивной кластеризации даны. По результатам экспериментов с использованием алгоритма нечеткого логического вывода типа Сугено (or – prod, and – max, метод дефаззификации – wtsun) была

получена модель «вход-выход», определяющая скорость вращения ротора генератора ω_m , и дающая наименьшее среднеквадратичное отклонение (СКО) от экспериментальных данных 0,11%. Результаты сравнения экспериментальных данных и полученной нечеткой модели показаны на рис. 6.

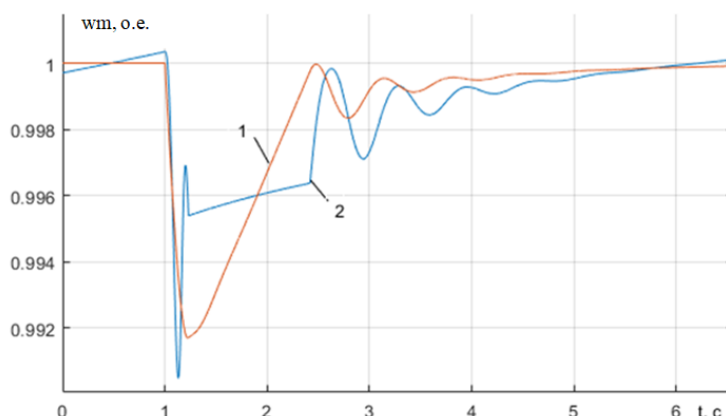


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных (1) и отклика нечеткой модели (2)

Также было проведено сравнение данных при изменении радиуса кластеров в функции *genfis2*, генерирующей систему нечеткого логического вывода (тип Сугено: *or* – *probor*, *and* – *prod*, метод дефаззификации – *wtaver*, значение радиуса кластеров 0,8). Полученная модель давала СКО от экспериментальных данных 0,12%. Результаты сравнения показаны на рис.7.

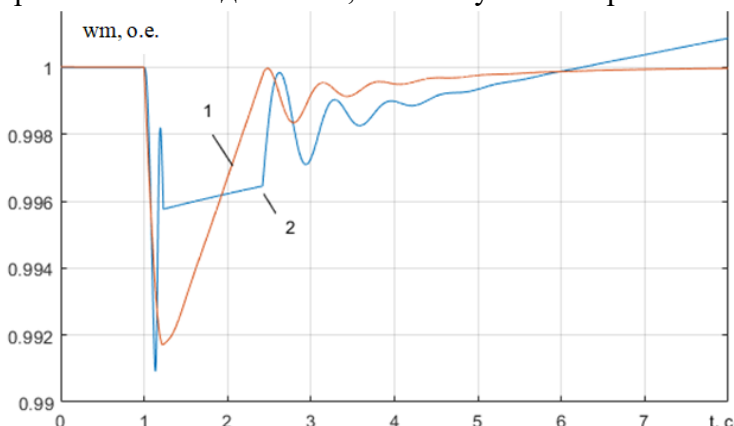


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных (1) и отклика нечеткой модели (2) при радиусе кластеров 0,8

Эксперименты показали, что уменьшение значения радиуса кластеров в функции *genfis2* увеличивает СКО отклика нечеткой модели от экспериментальных данных. Таким образом, оптимальным в данном случае является значение радиуса кластеров, близкое к 1.

Для исследования работы алгоритма нечеткого вывода типа Мамдани была использована функция *genfis3*, применяющая кластеризацию нечетких *s*-средних. Данная функция имеет пять встроенных методов дефаззификации; формулы для расчетов представленных методов дефаззификации приведены в специальной литературе, например, в [16].

В процессе построения модели ЦД турбогенераторной УРГ использовался метод формирования нечеткой модели, основанный на экспериментальных данных в следующих режимах:

- подключение дополнительного потребителя с заданной нагрузкой;
- возникновение трёхфазного КЗ на шинах потребителя и его отключение релейной защитой через 0,5 с.

Для нахождения оптимальных настроек ЦД и получения параметров построения нечеткой модели, были рассмотрены различные комбинации моделей:

Функция реализации алгоритма нечеткого логического вывода:

Anfis – позволяет получить нечеткую систему вывода Сугено одного выхода и определить системные параметры при помощи данных ввода/вывода. Для автоматической генерации НСВ используется метод разделения сетки. Алгоритм работы метода обучения набора данных может быть описан как комбинация методов наименьших квадратов и методов градиентного спуска.

Genfis3 – для получения нечеткой системы вывода используется принцип нечетких средних значений, извлекающий некоторые ряды правил. Для работы данной функции необходим отдельный набор входных и выходных данных, что может послужить существенным ограничением.

Объединение нечетких систем вывода данных, полученных при моделировании работы УРГ в различных режимах работы:

- в переходном режиме, вызванном подключением дополнительной нагрузки;
- в режиме трехфазного КЗ.
- Изменение диапазона входных и выходных переменных нечетких систем вывода, построенных на данных при подключении нагрузки, на диапазон данных режима КЗ и наоборот.

Методология эксперимента включала варьирование количества правил в нечеткой системе вывода в интервале от 10 до 400. Конфигурация с 1000 правил, несмотря на предварительное тестирование, была исключена из дальнейшего рассмотрения вследствие чрезмерной длительности процесса моделирования. Для генерации систем нечеткого вывода применялась функция **genfis3**. Исходные данные для обучения были получены путем моделирования режима короткого замыкания (КЗ) в УРГ. Целью построения модели был нечеткий вывод параметров, характеризующих подключение дополнительной нагрузки. Для максимальной исследуемой базы (400 правил) были заданы диапазоны изменения соответствующих входных (КЗ) и выходных (нагрузка) переменных.

СКО отклика нечеткой модели от экспериментальных данных составило $7,08 \cdot 10^{-5}$. Результаты сравнения экспериментальных данных и полученной нечеткой модели показаны на рис. 8.

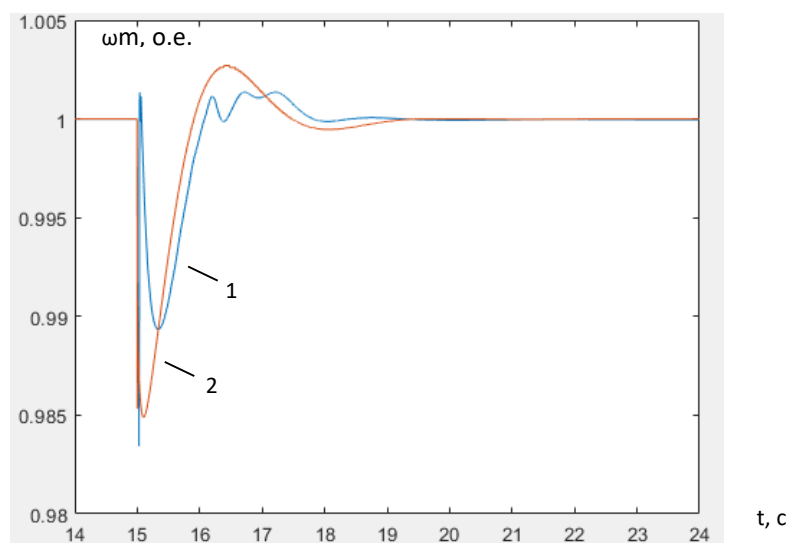


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных (1) и данных, полученных в результате моделирования (2)

Заключение. В ходе исследования подтверждена высокая эффективность применения гибридного подхода, основанного на использовании нейронных сетей, системы нечеткого логического вывода и генетического алгоритма для построения цифровых моделей по экспериментальным данным. Установлено, что для сложных переходных процессов формирование и оптимизация нечетких моделей с обширными базами правил (144 и более) сопряжены со значительными вычислительными затратами. Результаты экспериментов демонстрируют компромиссный характер зависимости: увеличение числа правил снижает среднеквадратичное отклонение (СКО) модели от экспериментальных данных, но пропорционально увеличивает время ее построения. Таким образом, перспективным направлением дальнейших исследований является разработка методов оптимизации размера базы правил для достижения приемлемого баланса между точностью модели (СКО) и вычислительной эффективностью.

Список источников

1. Grieves M.W. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. LLC, 2014, 7 p.
2. Мухлина Е.С. Будущее цифровых двойников в энергетике / Е.С. Мухлина, А.Г. Логачева // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: материалы XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. – Казань: КГЭУ, 2020. – С. 354-356.
3. Jia L., Li Z., Hu Z. Applications of the internet of things in renewable power systems: a survey. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 16, p. 4160, DOI: 10.3390/en17164160.
4. Boháčik A., Fudjak R. The problem of integrating digital twins into electro-energetic control systems. *Smart Cities*, 2024, vol. 7, no. 5, pp. 2702-2740, DOI: 10.3390/smartcities7050105.
5. Bulatov Yu., Kryukov A., Batuhtin A. et al. Digital twin formation method for distributed generation plants of cyber–physical power supply systems. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 16, p. 2886, DOI: 10.3390/math10162886.
6. Bulatov Yu.N., Korotkova K.E. Application of digital twin technologies in the energy sector. *Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*, 2012, vol. 1, pp. 103-112.
7. Kryukov A.V., Kargapol'tsev S.K., Bulatov Yu.N. et al. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation. *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1127-1140, DOI: 10.17654/EC017051127.
8. Нгуен В.Х. Применение прогностических регуляторов для управления установками распределенной генерации в системах электроснабжения железных дорог: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нгуен Ван Хуан, 2021. – 197 с.
9. Булатов Ю.Н. Алгоритмы построения цифрового двойника установки распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2020. – Т. 13. – № 6. – С. 677-689. – DOI: 10.17516/1999-494X-0256.
10. Bulatov Yu., Kryukov A., Batuhtin A. et al. Digital twin formation method for distributed generation plants of cyber–physical power supply systems. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 16, p. 2886, DOI: 10.3390/math10162886.
11. Короткова К.Е. Определение влияния параметров системы нечеткого логического вывода на точность построения модели установки распределенной генерации / К.Е. Короткова, А.Д. Ульянов // Системы. Методы. Технологии, 2023. – № 4(60). – С. 89-93. – DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-89-93.
12. Ульянов А.Д. Применение цифровых двойников для решения задач электронегетики, оптимизации и автоматического управления / А.Д. Ульянов, К.Е. Короткова // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки, 2024. – Т. 1. – С. 22-26.
13. Ульянов А.Д. Понятие «Цифровой двойник» в промышленности / А.Д. Ульянов, К.Е. Короткова // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки, 2024. – Т. 1. – С. 71-73.
14. Булатов Ю.Н. Распределенная генерация и энергетические роутеры в системах электроснабжения железных дорог / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, Г.О. Арсентьев. – Москва-Берлин: ООО "Директмедиа Паблишинг", 2020. – 172 с.
15. Булатов Ю.Н. Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов, А.В. Черепанов // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2021. – Т. 25, № 1(156). – С. 31-43. – DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-31-43.
16. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

Короткова Ксения Евгеньевна. Соискатель, Институт информационных технологий и анализа данных им. Е.И. Попова ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет. AuthorID: 1123771, SPIN: 1893-6701, kseniakorotkovs@yandex.ru. 664074 Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Говорков Алексей Сергеевич. К.т.н., директор, Институт информационных технологий и анализа данных им. Е.И. Попова ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет. AuthorID: 667979, SPIN: 4791-7021, ORCID: 0000-0001-9684-8572, govorkov_as@ex.istu.edu. 664074 Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

UDC 681.323

DOI:10.25729/ESI.2026.42.2.010

Methodology for building digital twins of distributed generation systems using fuzzy models

Kseniya E. Korotkova, Aleksey S. Govorkov

National Research Irkutsk State Technical University, Russia, Irkutsk, kseniakorotkovs@yandex.ru

Abstract. The article discusses the main components of digital twins and their interconnections, the specific features of distributed generation units, and the challenges that arise during their use. Digital twin technology is currently widely used in industrial production. Digital twins act as virtual analogues of physical objects, groups of objects, or processes. They are complex software solutions based on large volumes of data and the synthesis of artificial intelligence, machine learning, and specialized software, enabling the creation of dynamic digital models capable of live interaction and adaptation. The article presents a methodology for constructing digital twins of distributed generation units, the use of which helps optimize the design, operation, and monitoring of electric power systems. The methodology is presented using a turbogenerator unit as an example and includes the following stages: collecting data on the physical object, modeling the turbogenerator unit, and comparing experimental data and the response of a fuzzy model. The scientific novelty of the study lies in the development of a hybrid approach combining neural networks, a fuzzy inference system, and a genetic algorithm. The study identified the minimum root-mean-square deviation (RMS) of the model's response to experimental data, determined the optimal number of rules in a fuzzy system (144 rules), and established the relationship between model accuracy and computational costs. The practical significance of the results lies in the potential application of the developed method to optimize the operation of distributed generation units, improve power supply reliability, and enhance the management efficiency of electric power systems. The proposed approach enables the creation of accurate digital models capable of adapting to changing operating conditions. The research findings can be used in the development of new energy systems, the modernization of existing facilities, and the implementation of Smart Grid technologies. The proposed approach opens new prospects for the development of energy-efficient and reliable power supply systems.

Keywords: digital twins, distributed generation installations, Smart Grids

References

1. Grieves M.W. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. LLC, 2014, 7 p.
2. Mukhlina E.S., Logacheva A.G. Budushcheye tsifrovyykh dvoynikov v energetike [The future of digital twins in energy]. Dispetcherizatsiya i upravleniye v elektroenergetike: materialy XV Vserossiyskoy otkrytoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Dispatch and Control in Electric Power Industry: Proceedings of the XV All-Russian Open Youth Scientific and Practical Conference]. Kazan, KSEU Publ., 2020, pp. 354-356.
3. Jia L., Li Z., Hu Z. Applications of the internet of things in renewable power systems: a survey. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 16, p. 4160, DOI: 10.3390/en17164160.
4. Boháčik A., Fujdiak R. The problem of integrating digital twins into electro-energetic control systems. *Smart Cities*, 2024, vol. 7, no. 5, pp. 2702-2740, DOI: 10.3390/smartcities7050105.
5. Bulatov Yu., Kryukov A., Batuhtin A. et al. Digital twin formation method for distributed generation plants of cyber-physical power supply systems. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 16, p. 2886, DOI: 10.3390/math10162886.

6. Bulatov Yu.N., Korotkova K.E. Application of digital twin technologies in the energy sector. Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences, 2012, vol. 1, pp. 103-112.
7. Kryukov A.V., Kargapol'tsev S.K., Bulatov Yu.N. et al. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation. Far East Journal of Electronics and Communications, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1127-1140, DOI: 10.17654/EC017051127.
8. Nguyen V.H. Primeneniye prognosticheskikh regulyatorov dlya upravleniya ustanovkami raspredelennoy generatsii v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Application of predictive controllers for controlling distributed generation installations in railway power supply systems]. PhD dissertation. 2021, 197 p.
9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Algoritmy postroyeniya tsifrovogo dvoynika ustanovki raspredelennoy generatsii [Algorithms for constructing a digital twin of a distributed generation installation]. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii [Journal of Siberian federal university. Series: Engineering and technologies], 2020, vol. 13, no. 6, pp. 677-689, DOI: 10.17516/1999-494X-0256.
10. Bulatov Yu., Kryukov A., Batuhtin A. et al. Digital twin formation method for distributed generation plants of cyber-physical power supply systems. Mathematics, 2022, vol. 10, no. 16, p. 2886, DOI: 10.3390/math10162886.
11. Korotkova K.E., Ulyanov A.D. Opredeleniye vliyaniya parametrov sistemy nechetkogo logicheskogo vyvoda na tochnost' postroyeniya modeli ustanovki raspredelennoy generatsii [Determining the influence of fuzzy inference system parameters on the accuracy of building a distributed generation installation model]. Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies], 2023, no. 4(60), pp. 89-93, DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-89-93.
12. Ulyanov A.D., Korotkova K.E. Primeneniye tsifrovyykh dvoynikov dlya resheniya zadach elektroenergetiki, optimizatsii i avtomaticheskogo upravleniya [Application of digital twins for solving problems of electric power industry, optimization and automatic control]. Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i inzhenernyye nauki [Proceedings of Bratsk state university. Series: Natural and engineering sciences], 2024, vol. 1, pp. 22-26.
13. Ulyanov A.D., Korotkova K.E. Ponyatiye "Tsifrovoy dvoynik" v promyshlennosti [The concept of "digital twin" in industry]. Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i inzhenernyye nauki [Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences], 2024, vol. 1, pp. 71-73.
14. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Raspredelennaya generatsiya i energeticheskiye routing v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Distributed generation and energy routers in railway power supply systems]. Moscow; Berlin, Directmedia Publishing, 2020, 172 p. ISBN: 978-5-4499-0083-8.
15. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V. Operativnoye opredeleniye zapasov staticheskoy ustoychivosti v sistemakh elektrosnabzheniya s ustanovkami raspredelennoy generatsii [Operational determination of static stability margins in power supply systems with distributed generation installations]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Irkutsk state technical university], 2021, vol. 25, no. 1(156), pp. 31-43, DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-31-43.
16. Shtovba S.D. Proyektirovaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [Design of fuzzy systems using MATLAB]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2007, 288 p.

Korotkova Kseniya Evgen'evna. *Scientific degree applicant of the Institute of Information Technologies and Data Analysis named after. E.I. Popova, Irkutsk National Research Technical University. AuthorID: 1123771, SPIN: 1893-6701, kseniakorotkovs@yandex.ru. 664074 Irkutsk, Lermontov street 83.*

Govorkov Aleksey Sergeevich. *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Information Technologies and Data Analysis named after. E.I. Popova, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University. AuthorID: 667979, SPIN: 4791-7021, ORCID: 0000-0001-9684-8572, govorkov_as@ex.istu.edu. 664074, Irkutsk, Lermontov street 83.*

Статья поступила в редакцию 21.05.2025; одобрена после рецензирования 04.10.2025; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 05/21/2025; approved after reviewing 10/04/2025; accepted for publication 02/10/2026.