



Elektr energiya tizimlarining rejimlarini baholash va hisoblash uchun raqamli egizaklardan foydalanish

Olga V. Radionova^{1, a)}, Rashid A. Sitdikov^{1, a)}

^{1, a)} DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; tstu_energy@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0761-0787>

¹ PhD, dots. Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; tstu_energy@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

Dolzarbli: ish elektr energetika tizimlarining (EET) operativ boshqarish samaradorligini oshirish uchun rejimlarni hisoblash va zamonaviy holatini baholashning aniqligi va samaradorligini oshirish zarurati bilan bog'liq. Hisob-kitoblarning aniqligi va samaradorligini oshirishga EETning raqamli egizaklaridan foydalanish orqali erishish mumkin, ular turli rejimlarni (stabil holat, simmetrik, murakkab-nosimmetrik va boshqalar) to'liq taqlid qilish va EETni operativ boshqarish uchun zarur bo'lgan parametrlarni aniqlash imkonini beradi. Raqamli egizaklardan foydalanish tahlili ulami energetika sohasida va iqtisodiyotning boshqa sohalarida ham qo'llashning katta istiqbollari ko'rsatmoqda.

Maqsad: ish rejimlarini hisoblash va EET holatini baholashda raqamli egizaklardan foydalanish hisob-kitoblarning samaradorligini, aniqligini va dispetcherlik nazorati samaradorligini oshirishini ko'rsatish; raqamli egizaklarni va ularning murakkab assimetrik EET rejimlarini hisoblash uchun qo'llanilishini ko'rib chiqish.

Usullari: EETning har xil turdagi rejimlarini matematik modellashirish uchun raqamli egizaklar (RE) conceptsiysi qo'llaniladi; rejimlarni hisoblash simmetrik komponentlar usuli asosida amalga oshiriladi; murakkab nosimmetrik rejimlarni hisoblashda matritsa usullari va ideal transformatorlar conceptsiysi qo'llaniladi.

Natijalar: raqamli egizaklarning qisqacha ontologiyasi taqdim etildi; murakkab nosimmetrik rejimlarning matematik modeli misolidan foydalanib, har xil turdagi rejimlarni hisoblashda va EET holatini baholashda raqamli egizaklardan foydalanishning samaradorligi va ko'p qirraliligi ko'rsatilgan.

Kalit so'zlar: EET, raqamli egizak, matematik model, algoritim, barqaror holat, holatni baholash, murakkab assimetrik rejim, hisoblash samaradorligi va aniqligi, samarali boshqaruv.

Использование цифровых двойников для оценивания состояния и расчета режимов электроэнергетических систем

Ольга В. Радионовна^{1, a)}, Рашид А. Ситдиқов^{1, a)}

^{1, a)} DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; tstu_energy@mail.ru <https://orcid.org/0009-0002-0761-0787>

¹ PhD, доц. Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; tstu_energy@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

For citation: Radionova O.V., Sitdikov R.A. Using digital twins to estimate and calculate of electric power systems modes. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2024, no. 3, pp. 11–21.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14030562>

Received: 10.09.2024

Revised: 20.09.2024

Accepted: 21.10.2024

Published: 02.11.2024

Copyright: © Olga V. Radionova, Rashid A. Sitdikov, 2024. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Актуальность: работа обусловлена необходимостью повышения точности и оперативности расчетов режимов и оценивания состояния современных электроэнергетических систем (ЭЭС) для повышения эффективности оперативного управления ЭЭС. Повышение точности и оперативности расчетов можно добиться использованием цифровых двойников ЭЭС, которые могут полностью моделировать различные режимы (установившиеся, симметричные, сложносимметричные и др.) и определять параметры, необходимые для оперативного управления ЭЭС и её элементов. Анализ использования цифровых двойников показывает большие перспективы их использования, как в энергетике, так и в других сферах экономики.

Цель: в условиях цифровизации электроэнергетики показать, что использование цифровых двойников применительно к расчётам оперативных режимов и оцениванию состояния ЭЭС увеличивает оперативность, точность расчетов и в целом повышает эффективность диспетчерского управления и решение эксплуатационных задач; сделать обзор цифровых двойников и их применение для расчетов сложносимметричных режимов ЭЭС.

Методы: для цифрового моделирования различных видов режимов ЭЭС используется концепция цифровых двойников (ЦД); расчёты режимов проводятся на основе метода симметричных составляющих; при расчёте сложносимметричных режимов используются матричные методы, а также концепция идеальных трансформаторов.

Результаты: представлена краткая онтология цифровых двойников; на примере математической модели сложносимметричных режимов показана эффективность и универсальность применения цифровых двойников при проведении расчетов различных видов режимов и оценивании состояния ЭЭС.

Ключевые слова: ЭЭС, цифровой двойник, математическая модель, алгоритм, установившийся режим, оценивание состояния, сложносимметричный режим, оперативность и точность расчета, эффективное управление.



Using digital twins to estimate and calculate of electric power systems modes

Olga V. Radionova¹, Rashid A. Sitdikov^{1, a)}

^{1, a)} DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tstu_energy@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0761-0787>

¹ PhD., Assoc., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tstu_energy@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

Relevance: the work is related to the need to improve the accuracy and efficiency of the calculation of modes and the assessment of the state of the art in order to increase the efficiency of operational management of electric power systems (EPS). Increasing the accuracy and efficiency of calculations can be achieved by using digital twins of EPS, which allow to fully simulate various modes (steady-state, symmetric, complex-nonsymmetrical, etc.) and determine the parameters necessary for operational control of EPS. Analysis of the use of digital twins shows great prospects for their use in the energy sector and other sectors of the economy.

Aim: to show that the use of digital twins in the calculation of operating modes and the estimation of the state of EPS increases the efficiency of calculations, accuracy and efficiency of dispatch control; review digital twins and their application to the computation of complex nonsymmetrical modes of EPS.

Methods: for digital modeling of various types of EPS modes, the concept of digital twins (DT) is used; calculations of modes are carried out based on the method of symmetrical components; when calculating complex nonsymmetrical modes, matrix methods are used, as well as the concept of ideal transformers.

Results: a brief ontology of digital twins is presented; the efficiency and versatility of using digital twins in calculating various types of modes and assessing the state of the EPS is shown using the example of a mathematical model of complex nonsymmetrical modes.

Key words: EPS, digital twin, mathematical model, algorithm, steady state, state assessment, complex nonsymmetrical mode, efficiency and accuracy of calculation, effective management.

1. Введение (Introduction)

Значение электроэнергетики и её инновационное развитие в мире и Республике Узбекистан отражено и регламентировано многими документами [1- 5], описано в трудах известных учёных-энергетиков [6-8]. Современные электроэнергетические системы (ЭЭС), представляя собой активную часть электроэнергетики, являются сложными многосвязными, пространственно разнесенными иерархическими и гетерархическими объектами, включающими множество различных видов генерирующего, передающего, аккумулирующего, распределяющего и потребляющего оборудования, а также информационно-измерительные, защитные и другие системы. ЭЭС функционируют в условиях изменений параметров и режимов работы, структуры, появления множеств внутренних и внешних возмущающих воздействий различного характера.

Основная цель управления электроэнергетическими системами (ЭЭС) – обеспечение требуемого уровня надежности электроснабжения потребителей и живучести энергосистемы наряду с оптимальностью режимов. Усложнение схем электрических сетей, разнообразие режимов их работы, значительное количество находящегося в эксплуатации старого и изношенного оборудования, применение однофазных видов релейной защиты и автоматики (РЗА) приводят к появлению несимметричных и сложносимметричных режимов (СНР). Диспетчерскими службами ЭЭС производятся постоянные расчеты режимов ЭЭС и оценивание их состояния, которые необходимы для эффективного управления, что является достаточно сложной задачей, так как требуются точность и высокая оперативность расчётов [9-11].

Анализ мирового опыта показывает, что использование концепции «цифровых двойников» позволяет значительно повысить точность и оперативность соответствующих расчётов, а вместе с ними повысить эффективность управления ЭЭС и их объектов [12-18].

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Расчеты различных видов режимов ЭЭС принадлежат к числу задач, решение которых имеет важное значение как при проектировании, так и при оперативном управлении. Для решения данной задачи обычно используются итерационные методы, что предьявляет повышенные требования в плане быстродействия и надежности получения результатов, поэтому необходимо применение цифровых двойников [19-22].

Цифровые двойники и их использование для расчетов режимов ЭЭС. У понятия "цифровой двойник" есть много разных определений. Согласно международному стандарту ISO 23247-1-2021 [23], цифровой двойник (ЦД) — это цифровое представление производственного элемента с взаимной синхронизацией между ними (элементом и представлением). Иначе говоря, цифровой двойник — это динамическая виртуальная копия физического объекта, процесса, системы или среды, которая обладает видом и свойствами реального аналога. Цифровой двойник принимает данные и воспроизводит процессы, чтобы можно было спрогнозировать результаты работы реального продукта и возможные проблемы [24].

Цифровые двойники объединяют физические объекты с данными реального мира, чтобы пользователи могли лучше их визуализировать. Благодаря цифровым двойникам межфункциональные команды могут совместно планировать, разрабатывать, тестировать, развертывать и обслуживать сложные системы с помощью интерактивных технологий. Цифровые двойники помогают анализировать данные за прошедшее время, изучать текущее положение дел, прогнозировать и предотвращать будущие проблемы. Они позволяют принимать взвешенные решения на основе статистики эксплуатации, аналитики, симуляций и прогнозов.

На рис.1 показаны основные стадии эволюции цифровых двойников.



Рис.1. Эволюция концепции цифровых двойников (источник: www.seebo.com)

Fig.1. Evolution of the concept of digital twins (source: www.seebo.com)

В схеме (рис.1) первая стадия соответствует периоду, когда физические объекты создавались без цифрового прототипа. Вторая стадия относится к периоду, когда искусственные объекты проектировались с помощью цифровой модели, которая использовалась только на стадии создания объекта. На третьей стадии начинается взаимодействие (обмен информацией) между физическим и цифровым двойниками. И, наконец, четвертая – характеризует сближение и «пересечение» физического и цифрового двойников, когда информационный обмен и обновление цифрового и физического двойников идет практически в реальном времени.

В физический объект встраиваются датчики, которые собирают данные о состоянии этого объекта в реальном времени, которые отправляются цифровому двойнику; на базе полученных данных цифровая модель постоянно уточняется. Модель учитывает все изменения, происходящие с физическим объектом, накапливает информацию о его поведении, и по мере уточнения может более адекватно симулировать и прогнозировать поведение физического объекта.

Концепция ЦД возникла не на пустом месте, а сформировалась на достижениях целого ряда технологий. К моменту появления этой концепции уже существовала практика проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа на цифровой основе (CAD/CAM/CAE-систем), которая формировалась с 60-х гг. К этому времени уже широко применялась практика использования цифровых датчиков для измерения параметров физических объектов, необходимая для верификации (верификация (verification) - доказанное объективными результатами исследования подтверждение того, что определенные требования были выполнены -ISO 9000) и валидации (валидация — это проверка продукта, оборудования или процесса на соответствие ожиданиям пользователя) соответствующих цифровых моделей (например, использование цифровых интеллектуальных счетчиков).

В электроэнергетике цифровой двойник — это виртуальная модель физического объекта, процесса или системы, которая использует данные в реальном времени для мониторинга, анализа и управления. С помощью такой цифровой модели можно имитировать различные режимы ЭЭС, определять их параметры, проводить анализ необходимости соответствующих управляющих воздействий. Технология цифрового двойника дает возможность получить точное представление о том, что происходит в ЭЭС и её объектах. На основе этой информации можно не только предотвратить сбои и аварии, но также выявить и ликвидировать узкие места, повысить качество электроэнергии и безопасность персонала. Имея полную информацию о ситуации,

можно прогнозировать, разработать и внедрять оптимальные режимные решения с наилучшим комплексным эффектом (надежность, безопасность, качество, экологичность, экономичность и др.).



Рис.2. Структура цифрового двойника энергетической системы

Fig. 2. Structure of the digital twin of the energy system

На рис.2 показана общая структура ЦД, являющаяся примером разрабатываемых цифровых решений для ЭЭС [25] на основе которой формируется параметрический виртуальный прототип реального объекта или режима ЭЭС, позволяющий эффективно решать поставленные задачи управления.

Таким образом, одним из ключевых решений для цифровизации в сфере электроэнергетики становится разработка цифровых двойников. Например, в МЭИ (Россия) создан цифровой двойник энергосистемы – российский программно-аппаратный комплекс (ПАК) моделирования энергосистем в реальном времени и облачная платформа предоставления цифровых сервисов на всех стадиях жизненного цикла энергообъектов.

О расчётах режимов и оценивании состояния ЭЭС. Расчёты установившихся режимов работы электроэнергетических систем, электростанций и сетей принадлежат к числу задач, решение которых имеет важное значение как в ходе их проектирования и исследования, так и при оперативном управлении ЭЭС и их элементов.

Решение задачи оценивания состояния (ОС) электроэнергетических систем заключается в определении параметров режима, удовлетворяющих уравнениям установившегося режима (УУР) и близких к телеизмерениям (ТИ) параметров режима, получаемым от систем сбора и передачи информации (ССПИ). ОС может производиться по параметрам режима, соответствующим либо одному временному срезу - статическое ОС, либо по нескольким временным срезам с прогнозом режимных параметров - динамическое ОС.

Расчет установившихся режимов (УР) представляет собой определение всех параметров режима при известных параметрах системы (схемы соединения элементов, сопротивления линий, трансформаторов и т.д.). При расчете УР решается задача построения соответствующей математической модели [26-28], описывающей все физические процессы, происходящие в электрической сети с заданными допущениями, которая представляется системой нелинейных алгебраических уравнений. Модели реальных электрических систем описываются системой нелинейных алгебраических уравнений высокого порядка, что вызывает определенные трудности, связанные с точностью расчета.

Наиболее распространенными являются итерационные методы расчета [26]. В последнее время стали применяться методы расчета, основанные на идеях искусственного интеллекта и нейронных сетей [29,30].

Оценивание состояния электроэнергетической системы – это расчет установившегося режима, который выполняется по телеизмерениям (ТИ) и оперативной информации, полученной с помощью SCADA – систем и регистраторов комплексных электрических величин (PMU – Phasor Measurement Units).

Оценивание состояния необходимо для решения диспетчерских задач [6-8,12]:

- получение информации о потреблении электроэнергии и мощности в процессе выявления «узких мест» в энергосистеме (энергорайоне);
- рассмотрение диспетчерских заявок;
- определение объема мероприятий по регулированию напряжения на этапе управления режимом;



- расчёты перетоков активной и реактивной мощностей перед производством переключений с целью проверки последствий принимаемых решений;
- расчёты максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков мощности;
- экспертный анализ аварийных ситуаций.

3. Результаты (Results)

Рассмотрим процессы моделирования и проведения расчётов режимов оперативного управления ЭЭС на примере расчётов сложносимметричных режимов [31-32] с применением цифровых двойников.

Расчёты сложносимметричных режимов ЭЭС при использовании ЦД. При оперативном управлении ЭЭС необходимо использование моделей и алгоритмов решения нормальных, аварийных и послеаварийных режимов электроэнергетических систем, допускающие учет нелинейности характеристик элементов систем, реализованные в комплексе алгоритмов и программ, построенных на единой основе узлового метода, и отличающихся адаптацией как к схемно-режимным изменениям, так и к изменению моделей элементов (линейных и нелинейных, симметричных, несимметричных и др.) [26-28,31-32].

Поэтому расчёты несимметричных и сложносимметричных режимов, полностью соответствуют решению режимных задач. Появление таких режимов, как кратковременных, так и длительных обусловлено работой автоматики пофазного управления выключателями, использованием неполнофазных режимов, подключением несимметричных нагрузок и другими причинами.

По мере развития автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ) путём применения цифровых двойников, изменяются требования к математическим моделям и алгоритмам решения задач расчета различных электрических режимов. Кроме требований надежности, быстродействия и удобства представления исходной и выходной информации, к расчетным моделям и алгоритмам предъявляются высокие требования в отношении адекватности отображения реальных режимов и видов возмущений. Представление частных моделей в виде пакетов прикладных программ не решает полностью проблему комплексного моделирования режимов ЭЭС, поэтому решение следует искать путём использования цифровых двойников.

Применение узловых уравнений на базе симметричных составляющих универсально и позволяет отказаться от создания частных моделей для каждого особого случая СНР.

Прямые методы расчета СНР, основанные на совместном решении узловых уравнений для симметричных составляющих и граничных условий, приводят к смешанным системам уравнений с гибридными и коагулированными матрицами:

$$\begin{aligned} Y^{(1)} \dot{V}^{(1)} &= \dot{I}^{(1)} + J^{(1)}; \\ Y^{(2)} \dot{V}^{(2)} &= \dot{I}^{(2)}; \\ Y^{(0)} \dot{V}^{(0)} &= \dot{I}^{(0)}; \\ K^{(1)} \dot{V}^{(1)} + K^{(2)} \dot{V}^{(2)} + K^{(0)} \dot{V}^{(0)} + H^{(1)} \dot{I}^{(1)} + H^{(2)} \dot{I}^{(2)} + H^{(0)} \dot{I}^{(0)} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $Y^{(1)}, Y^{(2)}, Y^{(0)}$ – матрицы узловых проводимостей, соответственно, схем прямой (ПП), обратной (ОП) и нулевой (НП) последовательностей;

$\dot{V}^{(1)}, \dot{V}^{(2)}, \dot{V}^{(0)}$ – векторы узловых напряжений, соответственно, схем ПП, ОП и НП;

$\dot{I}^{(1)}, \dot{I}^{(2)}, \dot{I}^{(0)}$ – векторы токов мест несимметрий, соответственно, схем ПП, ОП и НП;

$J^{(1)}$ – вектор задающих токов в узлах ПП;

$K^{(\eta)}, H^{(\eta)}$, ($\eta = 1, 2, 0$) – матрицы-строки коэффициентов уравнений ГУ при напряжениях и токах соответствующих последовательностей, определяемые видом несимметрий (множеством продольных и поперечных несимметрий).

Для приведения этих уравнений к однородному базису узлового метода (узловым напряжениям) требуются эквивалентные преобразования с исключением векторов аварийных токов.

Использование принципа идеальных трансформаторов (ИТ) [31-33] для связи между схемами ПП, ОП и НП позволяет обеспечить единый принцип моделирования элементов сети в рамках КСЗ. Кроме того, если нумерацию узлов КСЗ осуществить так, чтобы узлы ИТ получили последние номера, то матрица узловых проводимостей КСЗ будет иметь блочно-диагональную структуру с окаймляющей частью, в которой расположены проводимости связей ИТ с узлами несимметрии. Блочно-диагональная структура матрицы КСЗ позволяет при расчете СНР избежать процедуры сквозной оптимальной перенумерации комплексной схемы и максимально использовать результаты вычислений предшествующего режима.

Комплексная схема замещения, составленная для расчета СНР ЭЭС, описывается системой узловых уравнений:



$$Y_{KCЗ} \dot{v}_{KCЗ} = 'J_{KCЗ}; \quad (2)$$

Структуру этой системы можно представить следующим образом:

$$\begin{pmatrix} H^{(1)} & 0 & 0 & H^{(1-B)} \\ 0 & H^{(2)} & 0 & H^{(2-B)} \\ 0 & 0 & H^{(0)} & H^{(0-B)} \\ H^{(B-1)} & H^{(B-2)} & H^{(B-0)} & H^{(B)} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \dot{v}^{(1)} \\ \dot{v}^{(2)} \\ \dot{v}^{(0)} \\ \dot{v}^{(B)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 'J^{(1)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

где $Y_{(i-D)}$, $Y_{(D-i)}$ – матрицы проводимостей связей ИТ с узлами несимметрии ПП, ОП и НП ($i = 1, 2, 0$);

$Y_{(D)}$ – матрица узловых проводимостей ИТ.

Значительного снижения порядка систем уравнений для расчета СНР можно достичь путем применения расширенных схем прямой последовательности (ПП) с эквивалентным представлением в них параметров пассивных схем обратной и нулевой последовательностей:

$$Y^{(1)} \dot{v}^{(1)} = 'J^{(1)}; \quad (4)$$

где $Y^{(1)}$ – матрица узловых проводимостей расширенной схемы ПП. Для этой цели могут быть использованы методы оптимального исключения с учетом слабой заполненности матриц $Y^{(2)}$ и $Y^{(0)}$.

Для определения токов и напряжений в начальный момент короткого замыкания (при расчете сложносимметричных аварийных режимов) необходимо учитывать параметры генерирующих и нагрузочных узлов в предшествующем установившемся (симметричном или несимметричном) режиме.

Узловая методика на основе симметричных составляющих позволяет использовать при расчете неполнофазных (НФР) и несимметричных установившихся режимов нелинейные узловые уравнения симметричного установившегося режима. Таким образом, обеспечивается формальный переход от линейной – к нелинейной модели, от симметричного режима – к несимметричному, на основе изменения вектора правых частей узловых уравнений. При использовании узловых уравнений расширенной схемы ПП для нелинейной модели НФР имеем [31]:

$$Y^{(1)} \dot{v}^{(1)} = \hat{U}^{-1} I_{(diag)} \hat{S}; \quad (5)$$

где $\hat{U}^{-1} I_{(diag)}$ – обратная диагональная матрица сопряженных напряжений ПП;

\hat{S} – вектор сопряженных мощностей узлов.

Для анализа сложносимметричных переходных процессов необходимы модели аварийных возмущений и коммутаций произвольного характера с учетом каскадного их возникновения. Сложные переходные процессы обусловлены многократными действиями самих устройств противоаварийной автоматики. Например, для анализа переходных процессов в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ), повреждений в сетях, содержащих неполнофазные участки (при пофазном ремонте элементов), на практике часто используются упрощенные модели расчета, точность которых не всегда возможно оценить. Использование ЦД и обобщение узлового метода на случай общей несимметрии и многофазных систем позволяют упростить моделирование и расчет несимметричных режимов электрических систем произвольной структуры.

Таким образом, постановка и решение задачи комплексного моделирования нормальных и аварийных режимов ЭЭС на основе узлового метода позволяет максимально формализовать переход от линейной задачи к нелинейной, и от модели для симметричного режима – к модели несимметричного и наоборот. А использование ЦД даёт возможность получать решение задачи в режиме реального времени.

4. Обсуждение (Discussion)

Расчеты различных режимов и оценивание состояния ЭЭС регулярно проводятся диспетчерскими и другими соответствующими службами. Такие расчеты являются рутинными, проводимыми согласно соответствующим правилам и документам. Их недостаток заключается в том, что трудно учитывать динамику режимов, сбоев и ошибки систем ТИ, в них часто отсутствует комплексность и учет различных внешних факторов: метеоусловий, экологии, кибербезопасности, экономичности, системности и др.

Это подтверждает необходимость повышения точности и оперативности расчётов режимов и оценивания состояния ЭЭС, что возможно использованием технологий цифровых двойников.

Понятие цифрового двойника, кроме приведённого в [23], имеет много определений [17-



19,24,34-35]. Наиболее подходящие означают, что цифровой двойник создает виртуальный прототип реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом.

По мнению многих специалистов, цифровые двойники можно разделить на три вида:

1. Двойник-прототип (Digital Twin Prototype). Это виртуальный аналог реально существующего элемента. Он содержит информацию, которая описывает определенный элемент на всех стадиях - начиная от требований к производству и технологических процессов при эксплуатации, заканчивая требованиями к утилизации элемента.

2. Двойник-экземпляр (Digital Twin Instance). Содержит в себе информацию по описанию элемента (оборудования), то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования.

3. Агрегированный двойник (Digital Twin Aggregate). Объединяет прототип и экземпляр, то есть собирает всю доступную информацию об оборудовании или системе.

Считается, например, что для организаций и компаний, которые эксплуатируют электрические сети, в настоящее время наиболее актуален двойник-экземпляр. Он основывается на математической модели сети. В таком цифровом двойнике может находиться информация о технических параметрах используемого оборудования (кабели, трансформаторы, выключатели и др.), дате ввода в эксплуатацию, географические координаты, данные с измерительных устройств и пр. Эту информацию используют для проведения расчетов по коммутации новых потребителей, а также различных расчетов электрических сетей.

Как правило, расчеты проводятся различными подразделениями, и в каждом из них существует своя математическая модель одной и той же физической сети. Использование разных моделей часто приводит к ошибкам, снижению точности. Применение одного цифрового двойника всеми подразделениями организации/компании решает проблему единообразия.

Для электрических сетей цифровой двойник — это база данных с информацией о сети, которая интегрирована с другими ИТ-системами энергокомпании (SCADA, геоинформационная система - ГИС, АСДУ, система управления активами и пр.). Цифровой двойник должен синхронизировать данные, полученные из разных источников, таким образом, чтобы они точно соответствовали текущему состоянию электрической сети.

Концепцию цифрового двойника можно применять для каждого типа компаний, но реализация будет отличаться. Например, в магистральных сетях меньшее количество элементов, которые более широко распределены в пространстве (более протяженные линии с меньшим количеством подстанций). У распределительных сетей, особенно городских, больше оборудования — много кабелей, большое количество трансформаторных пунктов. Из-за этого сложнее внедрять различные ИТ-решения и интегрировать их между собой. Оптимальный способ в этом случае — создание цифрового двойника с использованием геоинформационной системы (ГИС) и расчетного комплекса, который содержит математическую модель электрической сети [36].

Переход от решения одной режимной задачи к другой не должен сопровождаться принципиальным изменением метода формирования математической модели системы. Анализ показывает, что такой основой для моделирования и расчетов режимов ЭЭС является узловой метод. Применение узловых уравнений на базе симметричных составляющих универсально, и наряду с использованием ЦД, позволяет отказаться от создания множества частных моделей для каждого особого случая.

Допущение о фазной симметрии элементов ЭЭС и ЭДС источников позволяет положить в основу анализа режимов расчетные схемы, приведенные к одной фазе, а для моделирования несимметричных режимов и повреждений — метод симметричных составляющих и комплексные схемы замещения (КСЗ) для расчетной фазы. В сложных случаях использования схем замещения трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации для однофазных схем замещения применяется концепция идеальных трансформаторов (ИТ), позволяющая определить параметры схемы замещения любого многообмоточного трансформатора с различными схемами соединения обмоток [31,33]. Таким образом, имеются достаточно простые возможности цифрового моделирования и проведения расчетов по единой методологии расчетов нормальных и аварийных режимов с использованием ЦД.

5. Заключение (Conclusion)

На основании вышеприведенных материалов можно сделать следующие выводы:

1. Использование концепции ЦД при расчете режимов и оценивании состояния ЭЭС даёт возможность рассчитывать показатели различных режимов с высокой точностью и оперативностью. Анализ показывает, что использование цифровых двойников позволяет решать старые



задачи по-новому, а также ставить и решать совершенно новые задачи. Это обеспечивается тем, что ЦД имеют возможность адаптации и следования динамическому режимному процессу ЭЭС. Использование ЦД для расчётов режимов ЭЭС – наиболее приемлемый и эффективный метод верификации состояния ЭЭС.

2. Использование ЦД совместно с классическим методом узловых напряжений, даёт возможность оперативно производить расчёты различных видов режимов: симметричных, несимметричных, сложносимметричных и других с необходимой точностью.

3. Описанный вектор развития технологий цифровой в виде ЦД позволяет эффективно решать задачи расчетов режимов и оценивания состояния ЭЭС, имеет большие перспективы развития и полностью отражает имеющиеся в сфере электроэнергетики инициативы.

4. В условиях четвертой промышленной революции наличие компетенций и передового опыта в области цифровизации, автоматизации и промышленного интернета вещей становится основой конкурентоспособности компаний и государств в сфере энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон Республики Узбекистан «Об электроэнергетике». 07.08.2024 г. № ЗРУ-939.
2. Закон Республики Узбекистан «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Узбекистан «О рациональном использовании энергии»», 14.07. 2020, № ЗРУ-628.
3. Указ Президента РУз № УП-6079 от 05.10.2020 «Об утверждении стратегии "Цифровой Узбекистан-2030" и мерах по её эффективной реализации».
4. Указ Президента Республики Узбекистан от 1 февраля 2019 г. № УП-5646 «О мерах по коренному совершенствованию системы управления топливно-энергетической отраслью Республики Узбекистан».
5. Постановление Президента Республики Узбекистан от 22 августа 2019 г. № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии».
6. Насиров Т.Х., Ситдиқов Р.А. и др. Методы повышения эффективности режимов электрических сетей энергосистем. –Т.:Иновацион ривожланиш нашриёт-матбаа уйи, 2020. –276 с.
7. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития /под ред. Салимова А.У. – Т.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 с.
8. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1986, -220 с.
9. Насиров Т.Х., Радионова О.В. Моделирование режимов электрических систем. – Т.: Fan va texnoIjgiya, 2016. – 336 с.
10. Кочкин В.И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП. // Новости Электротехники. 2021, №2(128)-3(129).
11. Радионова О.В. Специальные вопросы релейной защиты и автоматики электрических станций и систем. – Т.: Иновацион ривожланиш нашриёт-матбаа уйи, 2024. – 284 с.
12. Бухгольц Б.М., Стычински З.Ф. Smart Grids - основы технологии энергосистем будущего. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 461 с.
13. Папков Б.В., Осокин В.Л. и др. Особенности управления объектами современной электроэнергетической системы // Вестник НГИЭИ, 2021. № 7 (122). – С. 26-37.
14. Сытдыков Р.А. Управление спросом на электроэнергию и режимы электроэнергетических систем //Энергия ва ресурс тежаш муаммолари, 2009, № 3-4. – С. 42-47.
15. Мисриханов М.Ш., Хамидов Ш.В. Технологии управляемых гибких электропередач переменного тока и их применение в электроэнергетических системах. – Ташкент: Изд-во “Navgo’z”, 2019.
16. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 815-827. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827.
17. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // IFAC-PapersOnLine. 2015. V. 48. N 3. P. 567–572. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
18. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // Procedia CIRP. 2018. V. 82. P. 243–248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139.
19. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication //White paper. 2014. V. 1. P.1–7.



20. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer, 2017. P. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
21. Xiang F., Zhi Z. Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle // *Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361293.
22. Söderberg R., Wärnefjord K., Carlson J.S., Lindkvist L. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2017. V. 66. P. 137–140. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.038.
23. ISO 23247-1-2021 «Системы автоматизации и интеграция. Цифровой двойник для производства».
24. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий» [Электронный ресурс] – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/758/75810.pdf> (дата обращения 10.03.2023).
25. Massel L, Massel A. Development of Digital Twins and Digital Shadows of Energy Objects and Systems Using Scientific Tools for Energy Research // *ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: proceedings. E3S Web of Conferences, 2020. Volume 209*. DOI:10.1051/e3sconf/202020902019
26. Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х. Установившиеся режимы электроэнергетических систем и их оптимизация. – Т.: Молия, 1999. – 370 с.
27. Насыров Т.Х., Радионова О.В. Расчет неполнофазных установившихся режимов электрических систем. // *Изв. АН УзССР, серия техн. наук, 1989, № 4*. -С. 14–18.
28. Радионова О.В. Моделирование граничных условий несимметрии при расчете неполнофазных установившихся режимов электроэнергетических систем. // *Проблемы энерго- и ресурсосбережения, № 3–4, Ташкент, 2009*. -С. 60–63.
29. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. О применении нейронных сетей при расчетах установившихся режимов электрических сетей // *Проблемы энергетики. 2009. № 1*. -С. 21 – 31.
30. Солопов Р.В., Самульченков А.С. Применение генетического алгоритма для расчета установившегося режима электрической сети // *Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2*. -С.131-141. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-131-141.
31. Насыров Т.Х., Радионова О.В. Моделирование сложносимметричных режимов для целей релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем. // *Энергоэксперт. – С.-Петербург, 2012. – №1. – С. 4-6*.
32. Радионова О.В. Математические модели и алгоритмы для комплексного анализа режимов электроэнергетических систем. / *Электротехнические системы и комплексы: Международный сборник научных трудов. – Магнитогорск: МаГГТУ, 2012. – С. 231-234*.
33. Ионов А.А. «Электрические машины. Трансформаторы» СамГУПС, 2013. – 119 с.<http://etcenter.ru/transformatory.html>.
34. Grieves MW. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication–LLC, 2014, 7 p.
35. Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen C.-Y. Lu & A. Y. C. Nee. Digital twin-driven product design framework, *International Journal of Production Research*, 2019; 57:12, pp. 1-19. DOI:10.1080/00207543.2018.1443229.
36. Никитина Е. Цифровые двойники меняют процессы управления в энергосистеме. // *Руководящие материалы по проектированию и эксплуатации электрических сетей: Журнал РУМ, 2023. №(610)2*.

REFERENCES

1. Law of the Republic of Uzbekistan “On Electric Power Industry” Tashkent. 07.08.2024. №ZRU-939 (In Russ.).
2. Law of the Republic of Uzbekistan "On Amendments and Additions to the Law of the Republic of Uzbekistan "On Rational Use of Energy", July 14, 2020, No. ZRU-628 (In Russ.).
3. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-6079 dated October 5, 2020 "On Approval of the Digital Uzbekistan -2030 Strategy and Measures for its Effective Implementation" (In Russ.).
4. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated February 1, 2019 No. UP-5646 "On Measures to Radically Improve the Management System of the Fuel and Energy Sector of the Republic of Uzbekistan" (In Russ.).
5. Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated August 22, 2019 No. PP-4422 "On Accelerated Measures to Improve Energy Efficiency of Economic Sectors and the Social Sphere, the Introduction of Energy-Saving Technologies and the Development of Renewable Energy Sources" (In Russ.).



6. Nasirov T.Kh., Sitdikov R.A. and others. Methods for increasing the efficiency of modes of electrical networks of power systems. –T.:Innovation rivozhlanish nashriyot-matbaa uyi, 2020. -276 p. (In Russ.).
7. Allaev K.R. Modern energy and prospects for its development / ed. Salimova A.U. – T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 p. (In Russ.).
8. Gamm A.Z. Statistical methods for assessing the state of electrical power systems. M.: Nauka, 1986, -220 p. (In Russ.).
9. Nasirov T.Kh., Radionova O.V. Modeling of electrical systems modes. – T.: Fan va texnologiya, 2016. – 336 p. (In Russ.).
10. Kochkin V.I. New technologies for increasing the transmission capacity of power lines. // Electrical Engineering News. 2021, No. 2 (128) - 3 (129). (In Russ.).
11. Radionova O.V. Special issues of relay protection and automation of electrical stations and systems. – T.: Innovation and Development News, 2024. – 284 p. (In Russ.).
12. Bukhgoalts B.M., Stychinsky Z.F. Smart Grids - Fundamentals of Future Energy Systems Technology. – M.: MPEI Publishing House, 2017. – 461 p. (In Russ.).
13. Papkov B.V., Osokin V.L. et al. Features of managing objects of a modern electric power system // Bulletin of NGIEI, 2021. No. 7 (122). - P. 26-37. (In Russ.).
14. Sitdikov R.A. Electricity demand management and modes of electric power systems // Energy and resource management, 2009, No. 3-4. – P. 42-47. (In Russ.).
15. Misrikhanov M.Sh., Khamidov Sh. V. Technologies of controlled flexible AC power transmission and their application in electric power systems. - Tashkent: Publishing house "Na-vro'z", 2019. (In Russ.).
16. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Application of the concept of digital twins at the stages of the life cycle of production systems // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2020. Vol. 20. No. 6. P. 815-827. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827. (In Russ.).
17. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // IFAC-PapersOnLine. 2015. V. 48. N 3. P. 567–572. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
18. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // Procedia CIRP. 2018. V. 82. P. 243–248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139.
19. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication //White paper. 2014. V. 1. P.1–7.
20. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems //Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches. Springer, 2017. P. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
21. Xiang F., Zhi Z. Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle // Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361293.
22. Söderberg R., Wärmeffjord K., Carlson J.S., Lindkvist L. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2017. V. 66. P. 137–140. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.038.
23. ISO 23247-1-2021 "Automation systems and integration. Digital twin for manufacturing".
24. GOST R 57700.37–2021 "Computer models and simulation. Digital twins of products" [Electronic resource] - URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/758/75810.pdf> (date of access 03/10/2023). (In Russ.).
25. Massel L, Massel A. Development of Digital Twins and Digital Shadows of Energy Objects and Systems Using Scientific Tools for Energy Research // ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: proceedings. E3S Web of Conferences, 2020. Volume 209. DOI:10.1051/e3sconf/202020902019.
26. Fazylov Kh.F., Nasyrov T.Kh. Steady-state modes of electric power systems and their optimization. - T.: Moliya, 1999. - 370 p. (In Russ.).
27. Nasyrov T.Kh., Radionova O.V. Calculation of uneven-phase steady-state modes of electric systems. // Bulletin of the Academy of Sciences of the Uzbek SSR, series of technical sciences, 1989, No. 4. - P. 14-18. (In Russ.).
28. Radionova O.V. Modeling of boundary conditions of asymmetry in the calculation of uneven-phase steady-state modes of electric power systems. // Problems of energy and resource saving, No. 3-4, Tashkent, 2009. - P. 60-63. (In Russ.).
29. Balametov A.B., Khalilov E.D. On the Application of Neural Networks in Calculating Steady-State Modes of Electrical Networks // Problemy Energetiki. 2009. No. 1. -P. 21 – 31. (In Russ.).



30. Solopov R.V., Samulchenkov A.S. Application of a Genetic Algorithm for Calculating Steady-State Modes of an Electrical Network // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2018. Vol. 22. No. 2. -P.131-141. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-131-141. (In Russ.).
31. Nasirov T.Kh., Radionova O.V. Modeling of Complex Asymmetric Modes for the Purposes of Relay Protection and Automation of Electric Power Systems. // *Energexpert*. – St. Petersburg, 2012. – No. 1. – P. 4-6. (In Russ.).
32. Radionova O.V. Mathematical models and algorithms for complex analysis of electric power systems modes. / *Electrical systems and complexes: International collection of scientific papers*. - Magnitogorsk: MagSTU, 2012. - P. 231-234. (In Russ.).
33. Ionov A.A. "Electrical machines. Transformers" Samara State University of Railways, 2013. - 119 p. <http://etcenter.ru/transformatory.html>. (In Russ.).
34. Grieves MW. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*—LLC, 2014, 7 p.
35. Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen C.-Y. Lu & A. Y. C. Nee. Digital twin-driven product design framework, *International Journal of Production Research*, 2019; 57:12, pp. 1-19. DOI:10.1080/00207543.2018.1443229.
36. Nikitina E. Digital twins change management processes in the power system. // *Guidelines for the design and operation of electrical networks: RUM Journal*, 2023. No. (610) 2. (In Russ.).