

А.А. Яблочкин<sup>2</sup>, А.В. Черепанов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Аннотация.** В данной статье рассматривается возможность применения цифровых двойников в системах электроснабжения с фокусом на применение в железнодорожных сетях.

Цель данной статьи заключается в раскрытии основных понятий и принципов работы цифровых двойников в контексте электроснабжения.

В статье будет представлена будущая структура цифрового двойника системы электроснабжения железных дорог. Кроме того, будут рассмотрены преимущества и недостатки цифровых двойников, включая возможность более точного прогнозирования и оптимизации работы системы электроснабжения, а также потенциальные риски и сложности внедрения данной технологии. В конце статьи будет представлено обсуждение возможных способов реализации цифрового двойника в системах электроснабжения. Результаты и выводы исследования могут быть полезны для специалистов энергетической отрасли, занимающихся разработкой инновационных решений в области электроснабжения.

**Ключевые слова:** цифровые двойники, электроснабжение, железнодорожные сети.

А.А. Yablochkin<sup>2</sup>, А.В. Cherepanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

## DIGITAL TWINS IN POWER SUPPLY SYSTEMS

**Abstract.** This article discusses the possibility of using digital twins in power supply systems with a focus on application in railway networks.

The purpose of this article is to reveal the basic concepts and principles of digital twins in the context of power supply systems.

The paper will present the future structure of the digital twin of the railroad power supply system, including mode modeling and the use of phase coordinates. In addition, the advantages and disadvantages of digital twins will be discussed, including the ability to more accurately predict and optimize the power supply system, as well as the potential risks and challenges of implementing this technology. At the end of the paper there will be a discussion of possible ways to implement digital twin in power supply systems. The results and conclusions of the study can be useful for professionals involved in the energy industry and the development of innovative solutions in the field of power supply.

**Key words:** digital twins, power supply, railway networks..

### Введение

Современные системы электроснабжения сталкиваются с рядом вызовов и требований, связанных с управлением и контролем. В этом контексте концепция цифровых двойников представляет собой перспективный подход, который позволяет создать виртуальную модель реальной системы электроснабжения. Цифровые двойники обладают потенциалом для более точного мониторинга, анализа и управления энергетическими процессами.

В данной статье мы рассмотрим роль и возможности цифровых двойников в системе электроснабжения и их влияние на повышение эффективности и надежности работы системы.

### Определение цифровых двойников в контексте систем электроснабжения.

Цифровые двойники в системах электроснабжения представляют собой виртуальные модели реальных физических объектов и процессов, созданные на основе данных, собранных в реальном времени. Они являются точной копией или отражением реальных систем и позволяют получать информацию о состоянии и поведении этих систем [1-5].

Основные принципы и концепции, лежащие в основе цифровых двойников, включают сбор и анализ данных, моделирование и симуляцию, взаимодействие с реальными объектами

и обратную связь. Цифровые двойники используются для мониторинга, прогнозирования, оптимизации и управления системами электроснабжения.

Характеристики и свойства цифровых двойников обеспечивают их функциональность. Это включает точность и достоверность моделирования, возможность работы в реальном времени, поддержку множества данных и переменных, а также гибкость и масштабируемость системы. Цифровые двойники позволяют оперативно отслеживать изменения в системе, прогнозировать ее поведение и принимать обоснованные решения на основе анализа данных.

### **Принципы и методы создания цифровых двойников в системах электроснабжения.**

Создание цифровых двойников в системах электроснабжения основано на ряде принципов и методов, которые обеспечивают достоверное моделирование реальных объектов и процессов. Вот некоторые из них:

1) Сбор и анализ данных: Цифровые двойники требуют непрерывного сбора данных о состоянии и поведении реальных систем. Для этого используются различные сенсоры, измерительные устройства и системы мониторинга. Собранные данные анализируются с помощью алгоритмов обработки информации, статистических методов и машинного обучения.

2) Моделирование и симуляция: На основе собранных данных разрабатываются математические модели и алгоритмы, которые отражают поведение реальных систем. Эти модели включают физические, электрические и управляющие аспекты системы электроснабжения. С помощью симуляции и численных методов проводятся эксперименты, позволяющие проверить работоспособность и эффективность цифровых двойников.

3) Интеграция данных и обратная связь: Цифровые двойники взаимодействуют с реальными объектами и системами электроснабжения. Они получают обратную связь от этих систем, анализируют ее и вносят соответствующие изменения в модели и алгоритмы. Таким образом, цифровые двойники обеспечивают непрерывное обновление и согласованность с реальными системами.

4) Гибкость и масштабируемость: Цифровые двойники должны быть гибкими и масштабируемыми, чтобы учитывать изменения в системе электроснабжения. Они должны быть способны адаптироваться к новым условиям, добавлению новых объектов и процессов, а также изменениям в режимах работы системы.

Применение этих принципов и методов позволяет создавать достоверные и функциональные цифровые двойники систем электроснабжения. Они становятся мощным инструментом для управления, оптимизации и анализа электрических систем, способствуя повышению их эффективности, надежности и безопасности.

### **Преимущества цифровых двойников:**

Цифровые двойники в системах электроснабжения предоставляют ряд значительных преимуществ, которые способствуют улучшению работы и эффективности энергетической системы. Ниже перечислены основные преимущества цифровых двойников:

- Улучшение мониторинга и анализа энергетических процессов: Цифровые двойники предоставляют возможность непрерывного мониторинга и сбора данных о состоянии системы электроснабжения. Это позволяет операторам системы получать реально-временную информацию о работе системы, анализировать процессы и выявлять потенциальные проблемы или неисправности. Благодаря цифровым двойникам улучшается понимание энергетических процессов и повышается точность прогнозирования.

- Оптимизация управления и контроля в системе электроснабжения: Цифровые двойники предоставляют операторам системы возможность осуществлять виртуальное управление и контроль над системой электроснабжения. Это позволяет проводить эксперименты, симуляции и анализ различных сценариев работы системы, оптимизировать процессы управления и принимать обоснованные решения. Цифровые двойники также позволяют прогнозировать и предотвращать возможные сбои и аварии в системе.

-Повышение эффективности и надежности работы системы: Цифровые двойники позволяют оптимизировать работу системы электроснабжения с целью повышения энергоэффективности и надежности. Операторы могут анализировать данные цифровых двойников, определять оптимальные режимы работы и ресурсное планирование, что позволяет снизить энергопотребление, улучшить управление нагрузками и повысить общую эффективность системы. Также цифровые двойники обеспечивают быструю диагностику и реагирование на возникающие проблемы, что способствует улучшению надежности работы системы электроснабжения.

Цифровые двойники в системах электроснабжения представляют собой мощный инструмент, который способствует оптимизации работы системы, повышению эффективности и обеспечению стабильного и надежного электроснабжения.

### **Недостатки и ограничения цифровых двойников**

Помимо многочисленных преимуществ, связанных с применением цифровых двойников в системах электроснабжения, существуют и некоторые недостатки и ограничения, которые следует учитывать. Ниже перечислены основные из них:

-Технические и методологические проблемы: Создание и поддержка цифровых двойников требует значительных усилий и ресурсов. Необходимо обеспечить точность и достоверность данных, а также непрерывную синхронизацию между реальной системой и ее цифровым представлением. Также возникают технические проблемы, связанные с обработкой больших объемов данных, обеспечением высокой производительности и защитой информации.

-Риски и сложности внедрения и эксплуатации: Внедрение цифровых двойников в системы электроснабжения может столкнуться с рядом рисков и сложностей. Это включает в себя необходимость адаптации существующих систем к новым технологиям, обучение персонала и преодоление сопротивления изменениям. Кроме того, существуют вопросы, связанные с защитой информации и конфиденциальностью, а также правовыми и регуляторными аспектами внедрения и использования цифровых двойников.

Важно учитывать эти недостатки и ограничения при планировании и реализации системы цифровых двойников в электроснабжении. Необходимо проводить тщательный анализ и оценку рисков, разрабатывать соответствующие методологии и стратегии управления, а также обеспечивать надлежащую поддержку и обучение персонала для эффективного использования цифровых двойников.

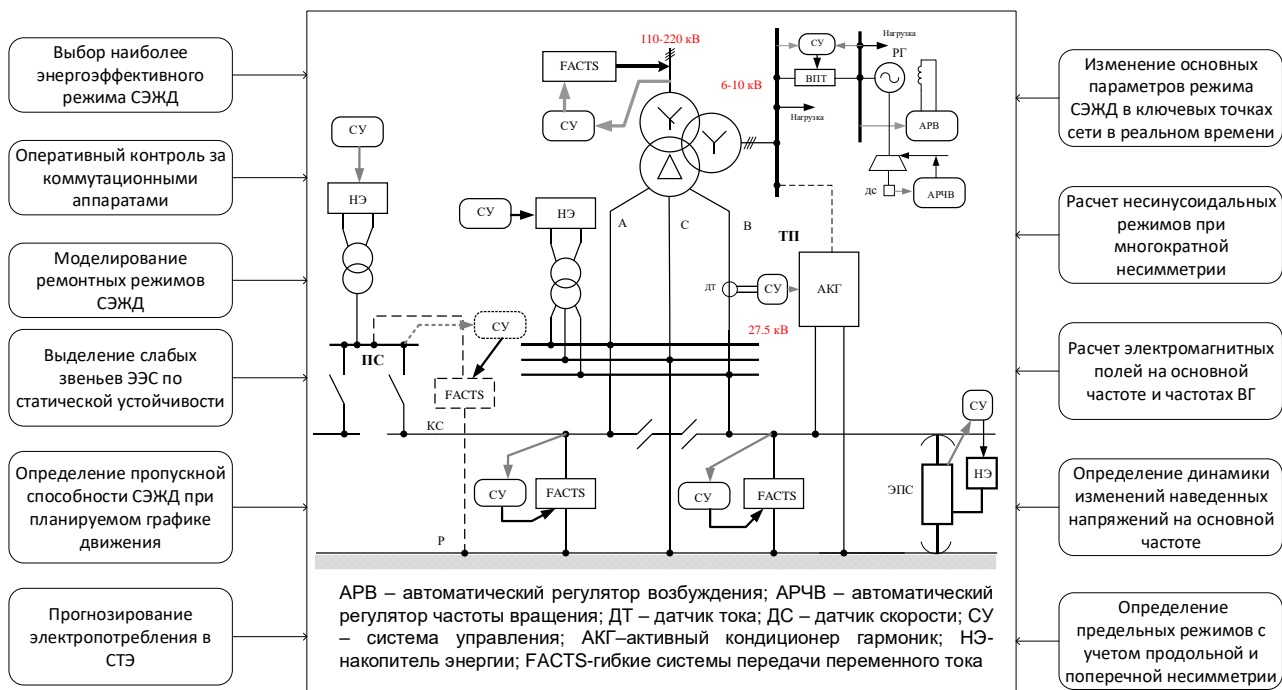
### **Технологии и инструменты для реализации цифровых двойников**

Для успешной реализации цифровых двойников в системах электроснабжения необходимо использовать современные технологии и инструменты. Ниже представлены основные из них:

Современные методы моделирования и симуляции: Для создания цифровых двойников в системах электроснабжения широко применяются современные методы моделирования и симуляции. Это включает использование компьютерных программ и специализированных инструментов для разработки математических моделей, которые отражают работу реальных систем электроснабжения. Методы моделирования и симуляции позволяют проводить различные эксперименты и анализировать поведение системы в различных условиях.

Программные и аппаратные решения для создания цифровых двойников: Существует широкий спектр программных и аппаратных решений, специально разработанных для создания и поддержки цифровых двойников. Это включает специализированные платформы и инструменты для сбора данных, обработки информации, визуализации и анализа. Программное обеспечение может предоставлять возможности по взаимодействию с реальной системой электроснабжения, синхронизации данных и обновлению цифрового представления в реальном времени.

Для создания будущей структуры двойника необходимо воспользоваться методами, приведенными выше, будущая структура цифрового двойника электроснабжения представлена на рис.1.



**Рис.1. Структура цифрового двойника системы электроснабжения железных дорог**

У будущей структуры цифрового двойника системы электроснабжения железных дорог помимо существующих сейчас устройств, будут присутствовать активные элементы, которые будут благоприятно влиять на работу всей системы, а для мониторинга и корректной работы предлагается использовать программный комплекс Fazonord-APC [6], поскольку с его помощью удастся произвести :

- моделирование трехфазных, трехфазно-однофазных, многофазных ЭЭС и СЭЖД с многопроводными линиями электропередачи и многообмоточными трансформаторами любого конструктивного исполнения;
- имитационное моделирование работы СЭЖД совместно с ЭЭС при движении поездов с контролем загрузки трансформаторов и нагрева проводов контактной сети;
- расчеты нормальных и аварийных режимов электроэнергетической системы, составленной подсистемой внешнего электроснабжения и подсистемой тягового электроснабжения железной дороги;
- корректное моделирование режимов систем с однофазными тяговыми нагрузками, что особенно важно для ЭЭС Восточной Сибири и Дальнего Востока (магистральные сети БАМ, сети западного участка трубопровода Восточная Сибирь – Тихий океан, система электроснабжения Забайкальской железной дороги и т.д.), где доля таких нагрузок велика;
- определить несинусоидальные режимы при учете стационарных и перемещающихся в пространстве поездных источников гармонических искажений;
- расчеты одновременно с определением режима напряженностей электромагнитного поля, создаваемого многопроводными линиями, включая линии электропередачи и тяговые сети железной дороги;
- расчеты наведенных напряжений на смежные линии одновременно с расчетом режима системы.

### **Заключение**

Цифровые двойники в системах электроснабжения представляют собой современный подход, который способен преобразовать и оптимизировать процессы управления и контроля в энергетической отрасли. Они предлагают новые возможности для мониторинга, анализа и моделирования энергетических процессов, а также улучшают эффективность и надежность работы системы.

Преимущества цифровых двойников включают улучшенный мониторинг и анализ энергетических процессов, оптимизацию управления и контроля, а также повышение эффективности и надежности работы системы.

Однако, следует отметить, что у цифровых двойников существуют и некоторые недостатки и ограничения. Технические и методологические проблемы могут возникнуть при их внедрении и эксплуатации. Также важно учитывать риски и сложности, связанные с безопасностью и конфиденциальностью данных.

Для создания цифровых двойников в системах электроснабжения используются различные технологии и инструменты, такие как современные методы моделирования и симуляции, программные и аппаратные решения. Эти инструменты позволяют разрабатывать точные и реалистичные модели системы, а также реализовывать анимации и интерактивные элементы.

В целом, цифровые двойники представляют большой потенциал для развития и оптимизации систем электроснабжения. Их применение может значительно повысить эффективность работы и обеспечить более стабильное и надежное электроснабжение.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. QiangGao, XuebinLi. Research on the Application of Modern Power System Based on Automatic Control Technology. 2015. 4th International Conference on Modeling and Simulation (MAS), IEEE, 2015.
2. C. Li, L. Zhang, J. Sheng and D. Chen, "Research on intelligent load transfer strategy based on distribution automation", 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Xi'an, pp. 13, 2016.
3. Джамалова З.И., Отуншиева А.Е., Обычайко Д.С., Шихин В.А. Анализ эксплуатационной надежности кибер-физических систем // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2018. № 1 (104). С. 215-227.
4. Иванов А.В., Кучеров Ю.Н., Самков В.М., Корев Д.А. Развитие стандартизации интеллектуальных систем электроснабжения будущего // Энергия единой сети. 2018. № 3 (38). С. 70-84.
5. Холкин Д.В., Чаусов И.С. Цифровой переход в энергетике России: в поисках смысла // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 7-16.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613909 Российская Федерация. Fazonord-APC : № 2018611216 : заявл. 25.01.2018 : опублик. 27.03.2018 / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Смарт грид». – EDN NNLHHX.

### REFERENCES

1. QiangGao, XuebinLi. Research on the Application of Modern Power System Based on Automatic Control Technology. 2015. 4th International Conference on Modeling and Simulation (MAS), IEEE, 2015.
2. C. Li, L. Zhang, J. Sheng and D. Chen, "Research on intelligent load transfer strategy based on distribution automation", 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Xi'an, pp. 13, 2016.
3. Dzhamalova Z.I., Otunshieva A.E., Obychayko D.S., Shikhin V.A. Analysis of operational reliability of cyber-physical systems // Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tyshpaev. M. Tynyshpayev. 2018. № 1 (104). С. 215-227.
4. Ivanov A.V., Kucherov Y.N., Samkov V.M., Korev D.A. Development of standardization of intelligent power supply systems of the future // Unified grid energy. 2018. № 3 (38). С. 70-84.
5. Kholkin D.V., Chausov I.S. Digital transition in the Russian energy sector: in search of meaning // Energy Policy. 2018. № 5. С. 7-16.
6. Certificate of state registration of the computer program No. 2018613909 Russian Federation. Fazonord-APC : No. 2018611216 : application 25.01.2018 : publ. 27.03.2018 / V. P. Zakaryukin, A. V. Kryukov ; applicant Limited Liability Company "Smart Grid". – EDN NNLHHX.

### **Информация об авторах**

*Яблочкин Алексей Андреевич* - студент гр. СОД.1-19-1, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: [lesha02020202@mail.ru](mailto:lesha02020202@mail.ru)

*Черепанов Александр Валерьевич* – к. т. н., доцент, доцент кафедры Электроэнергетика транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [smart\\_grid@mail.ru](mailto:smart_grid@mail.ru)

### **Authors**

*Yablochkin Alexey Andreevich* - student of gr.SOD.1-19-1, specialty "Train Traffic Support Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Irkutsk e-mail: [lesha02020202@mail.ru](mailto:lesha02020202@mail.ru)

*Cherepanov Aleksandr Valeryevich* - Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor , Associate Professor of Transport Electric Power Engineering Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [smart\\_grid@mail.ru](mailto:smart_grid@mail.ru)