

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНЫХ ПРОВОДОВ И ТОКОВЕДУЩЕЙ ЧАСТИ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Иванова Вера Павловна  
Цыпкина Виктория Вячеславовна  
Пирназарова Сарбиназ Сарсенбаевна  
Аминов Руслан Дмитриевич

**Аннотация.** В статье выполнен анализ современных способов повышения эксплуатационных характеристик контактных проводов и токоведущих элементов кабельно-проводниковой продукции. Рассмотрены основные механизмы деградации проводников при длительной эксплуатации, включая термомеханические нагрузки, электромиграцию, окислительные процессы и усталостное разрушение. Систематизированы методы повышения надежности и долговечности токоведущих систем, включающие совершенствование материалов, оптимизацию конструкции, применение защитных покрытий и внедрение интеллектуальных методов контроля состояния. Показано, что комплексный подход, основанный на сочетании материаловедения, конструктивной оптимизации и цифрового мониторинга, позволяет существенно повысить эксплуатационные параметры проводниковых систем.

**Ключевые слова:** контактный провод, токоведущая часть, кабельно-проводниковая продукция, эксплуатационные параметры, электропроводность, деградация материалов, износ, термомеханические нагрузки, надежность, цифровой мониторинг.

**Введение.** Контактные провода и токоведущие элементы кабельно-проводниковой продукции являются ключевыми компонентами систем передачи и распределения электрической энергии. Их эксплуатационные характеристики напрямую определяют надежность энергетических, транспортных и промышленных систем.

В процессе эксплуатации данные элементы подвергаются комплексному воздействию электрических, тепловых, механических и климатических факторов, что приводит к постепенной деградации их структуры и ухудшению электрических параметров. Особенно критичными являются условия высоких токовых нагрузок, циклические температурные изменения и механический износ, характерный для контактных сетей транспорта.

В связи с этим актуальной задачей является анализ и систематизация методов повышения эксплуатационных параметров контактных проводов и токоведущих элементов кабельно-проводниковой продукции.

#### Анализ объекта исследования.

Основным сырьем для производства токоведущей части кабельно-проводниковой продукции является медь. Качество передачи электрического сигнала во многом определяется чистотой исходного металла. В структуре обычной меди присутствует минимальное наличие металлов-примесей, а остаточная их концентрация оказывает пагубное влияние на проводимость токоведущей жилы (рис.1). Таким образом, исследования в данной области сводятся в проведении качественной оценки влияния металлов-примесей на температуру плавления и электропроводность сверхчистой меди.

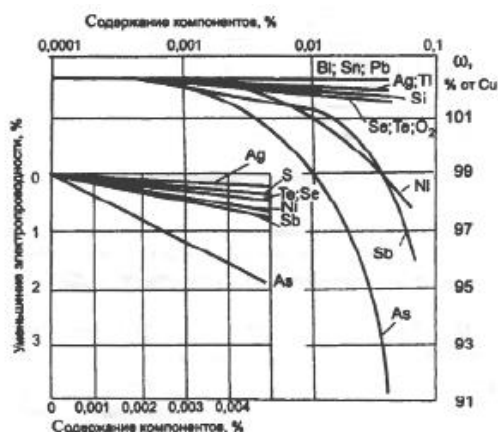


Рис. 1. Влияние примесей на электропроводность меди

Так во всем мире, а также и в нашей Республике существует проблема: создания конкурентоспособной продукции для разных отраслей промышленности на основе ресурсосберегающих технологий и оборудования. Контактные провода, которые используются в работе железнодорожного и городского транспорта, а также и сварочного оборудования имеют большой уровень износа, а значит увеличение эксплуатационных характеристик данной кабельно-проводниковой продукции позволит повысить рентабельность и обеспечить ресурсосбережение стратегического сырья – меди. Получение электропроводящей меди связан с большими производственными энергозатратами. При этом электроконтактный материал должен обладать высокими механическими свойствами как при повышенных температурах, так и в нормальных условиях.

*Основные факторы, влияющие на эксплуатационные параметры кабельной продукции.* Эксплуатационные характеристики проводниковых систем определяются совокупностью взаимосвязанных процессов:

- *Электрические факторы:* рост сопротивления вследствие окисления и структурных изменений материала;
- *Тепловые факторы:* локальный перегрев и термоциклирование;
- *Механические факторы:* вибрации, растягивающие нагрузки, контактный износ;
- *Химические факторы:* коррозионные процессы и воздействие агрессивных сред;
- *Электромеханические явления:* усталость материала под действием переменного тока и механических нагрузок.

**Факторы, влияющие на эксплуатационные параметры контактных проводов и токоведущих элементов**

Таблица 1

№	Группа факторов	Физическая природа воздействия	Основные последствия	Примеры проявления
1	Электрические	Протекание тока высокой плотности, эффект Джоуля–Ленца	Повышение сопротивления, локальный перегрев, электромиграция	Рост потерь мощности, снижение проводимости
2	Тепловые	Циклический нагрев и охлаждение, тепловые градиенты	Термическая усталость, изменение микроструктуры	Разупрочнение материала, потеря механической прочности
3	Механические	Растягивающие усилия, вибрации, контактное трение	Износ, пластическая деформация, обрыв волокон	Износ контактной поверхности, провисание проводов
4	Химические	Воздействие кислорода, влаги,	Окисление, коррозия,	Увеличение переходного сопротивления

		агрессивных сред	образование пленок	
5	Электромеханическое	Совместное действие тока и механической нагрузки	Усталостное разрушение, микротрещины	Повреждение структуры проводника в контактной зоне
6	Климатические	Температура окружающей среды, осадки, ультрафиолет	Ускоренное старение материалов	Деградация изоляции и защитных покрытий

Особое значение имеет явление **электротермической деградации**, приводящее к изменению микроструктуры проводника и снижению его проводимости.

**Методы улучшения эксплуатационных параметров.** Анализ действующих технологии позволил выделить пять основных направлений, которые отражают современные тенденции кабельного производства.

1. *Совершенствование материалов проводников* - одним из наиболее эффективных направлений повышения эксплуатационных характеристик является применение современных материалов и сплавов: медь высокой чистоты (OFE, OFC), медь с легирующими добавками (Ag, Mg, Sn), алюминиевые сплавы повышенной прочности, композиционные проводники (Cu–steel, Cu–carbon composites).

Легирование позволяет повысить механическую прочность без существенного ухудшения электрической проводимости.

2. *Конструктивная оптимизация.* Повышение надежности достигается за счет изменения геометрии и структуры проводников: многожильные конструкции с увеличенной гибкостью. профилированные контактные поверхности, оптимизация сечения для снижения плотности тока, применение полых или композитных структур.

Конструктивная оптимизация позволяет снизить концентрацию механических напряжений и уменьшить износ контактной поверхности.

3. *Защитные покрытия и модификация поверхности.* Важным направлением является применение защитных и функциональных покрытий серебрение и оловянирование контактных поверхностей, антифрикционные покрытия, наноструктурированные защитные слои, лазерное и лазерное упрочнение поверхности.

Данные методы позволяют существенно снизить коэффициент трения и интенсивность окислительных процессов.

4. *Технологические методы повышения ресурса.* К технологическим методам относятся термомеханическая обработка, холодная пластическая деформация, рекристаллизационный отжиг, управление зеренной структурой материала. Эти методы позволяют формировать оптимальную микроструктуру с повышенной устойчивостью к усталостным нагрузкам.

**Реализация технического решения.**

Данный этап работы строился на цифровом мониторинге и предиктивной диагностики, где современным направлением повышения эксплуатационных параметров является внедрение цифровых технологий: мониторинг температуры и тока в реальном времени, анализ деградации по цифровым моделям, прогнозирование остаточного ресурса, использование цифровых двойников проводниковых систем. Применение цифровых двойников позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания к предиктивному управлению состоянием оборудования.

*Цифровой двойник индукционной печи* должен решать задачу оценки эффективности разработанного ЦД ИП линии «Up Cast» является важным этапом исследования, позволяющим определить степень его практической применимости и целесообразность внедрения в промышленную эксплуатацию. Основной задачей проведения исследовательских работ является формирование методического подхода к количественной и качественной оценке результатов функционирования цифрового двойника (рис. 1).

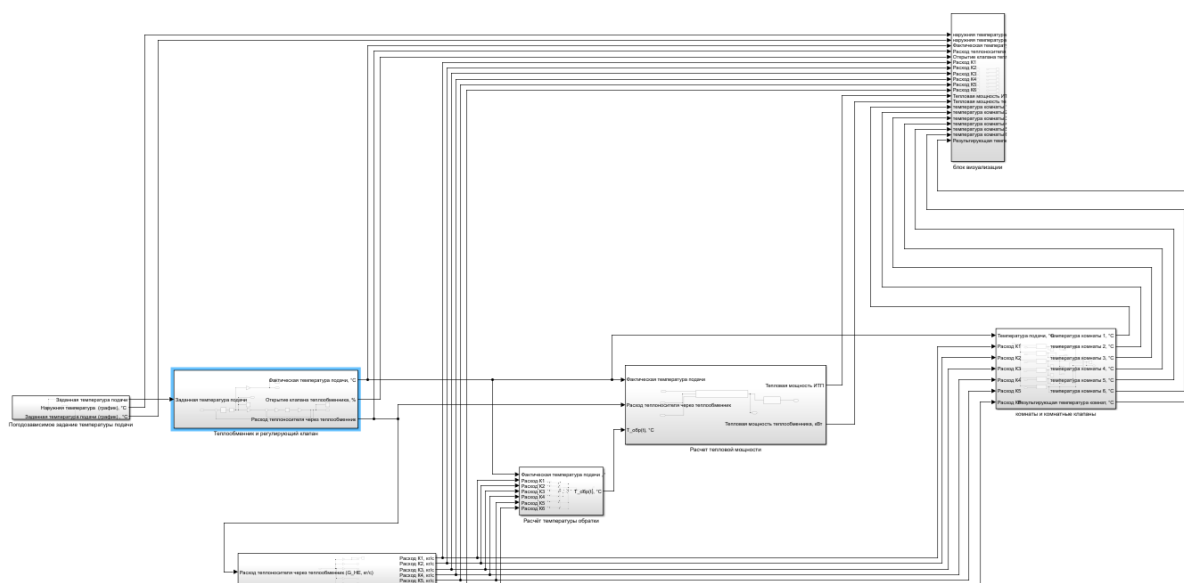


Рис. 1. Цифровой двойник ИП

Блок-схема цифрового двойника индукционной печи линии Up Cast (рис.2) отражает структурную организацию системы, а также последовательность обработки информации от реального объекта до формирования управляющих и диагностических решений. Она иллюстрирует взаимодействие физических, вычислительных и аналитических компонентов цифрового двойника.

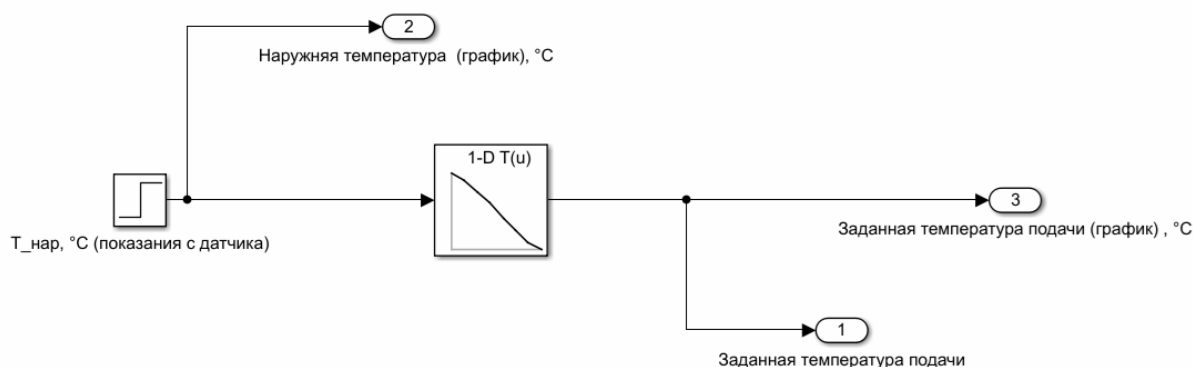


Рис. 2 Блок схема задания температуры работы печи

В основе блок-схемы (рис.2) лежит принцип замкнутого информационного контура, обеспечивающего двусторонний обмен данными между реальным технологическим объектом и его виртуальной моделью.

Структура ЦД включает следующие основные функциональные блоки: физический объект (индукционная печь Up Cast), система датчиков и измерительных устройств, модуль сбора и предварительной обработки данных, математическая модель ЦД, модуль анализа и диагностики состояния, модуль прогнозирования, база данных, пользовательский интерфейс (SCADA/HMI).

### Полученные результаты.

Функционирование ЦД реализуется по следующей последовательности: система датчиков фиксирует параметры работы индукционной печи в режиме реального времени, полученные данные передаются в модуль сбора информации, где выполняется их предварительная обработка, очищенные данные поступают в математическую модель, где производится расчет состояния объекта, результаты моделирования сравниваются с фактическими значениями в модуле анализа, в случае выявления отклонений формируются диагностические сообщения, модуль прогнозирования оценивает дальнейшее поведение системы, результаты отображаются оператору через интерфейс и сохраняются в базе данных.

Ключевой особенностью блок-схемы (рис.2) является наличие замкнутого контура управления с обратной связью. Это означает, что результаты моделирования

не только анализируются, но и могут использоваться для корректировки режимов работы оборудования. Такой подход обеспечивает реализацию принципов:

- непрерывного мониторинга;
- предиктивной диагностики;
- адаптивного управления технологическим процессом

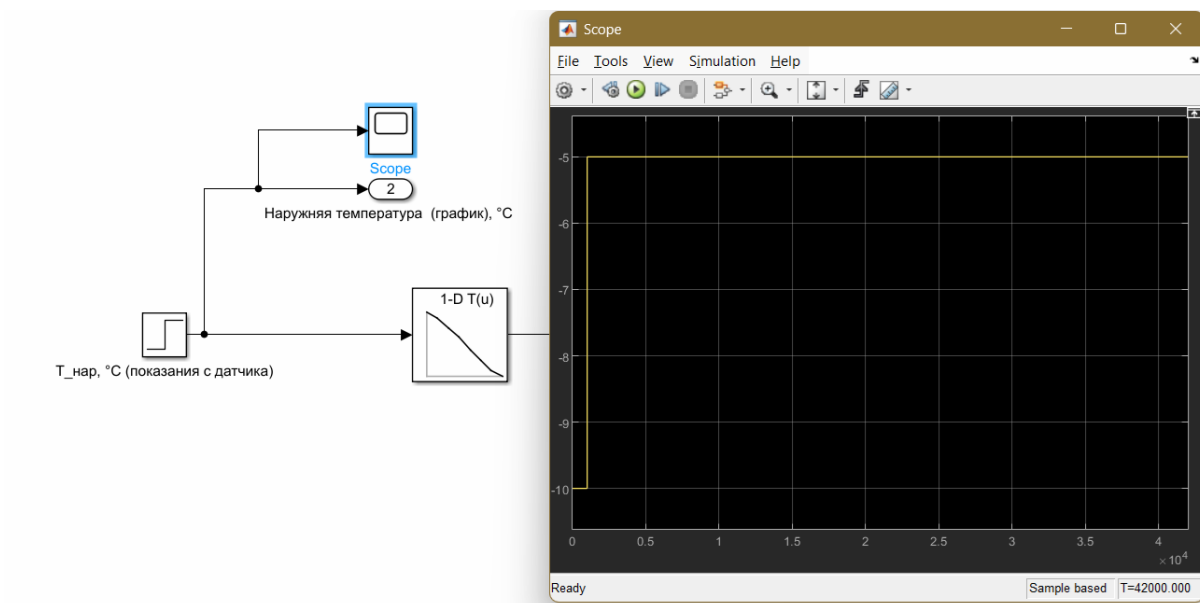


Рис. 3 Результаты работы ЦД ИП

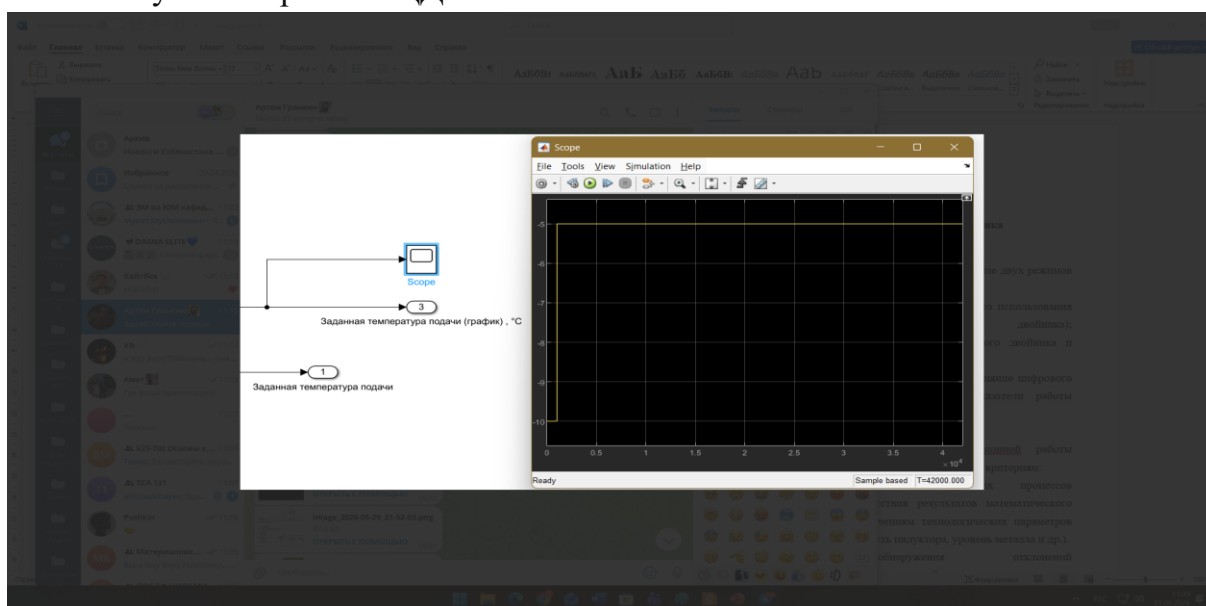


Рис. 4 Результаты работы ЦД ИП при изменении температуры

Представленная блок-схема ЦД ИП (рис.2) отражает полную структуру системы и демонстрирует взаимодействие всех ключевых компонентов. Она подтверждает, что разработанный цифровой двойник представляет собой комплексную информационно-аналитическую систему, обеспечивающую мониторинг, моделирование и прогнозирование состояния технологического оборудования в режиме реального времени.

Методика оценки основана на сравнительном анализе двух режимов эксплуатации оборудования: базовый режим (традиционная система управления без использования цифрового двойника), интеллектуальный режим (с применением цифрового двойника и прогнозной аналитики).

Сравнение указанных режимов позволяет определить влияние цифрового двойника на основные технико-экономические показатели работы индукционной печи.

Основные критерии оценки эффективности ЦД оцениваются следующим основным критериям:

1. Точность воспроизведения технологических процессов

Оценивается степень соответствия результатов математического моделирования реальным значениям технологических параметров (температура расплава, мощность индуктора, уровень металла и др.).

2. Своевременность обнаружения отклонений

Определяется способность цифрового двойника выявлять отклонения от нормального режима работы оборудования на ранней стадии.

3. Снижение количества аварийных ситуаций

Анализируется уменьшение числа потенциально опасных режимов за счет прогнозирования и предупреждения критических состояний.

4. Сокращение времени диагностики

Оценивается уменьшение времени, необходимого для выявления причин неисправностей и отклонений в работе оборудования.

5. Экономическая эффективность

6. Рассчитывается снижение эксплуатационных затрат за счет уменьшения простоев, энергопотребления и затрат на ремонт.

Для количественной оценки эффективности цифрового двойника используются следующие группы показателей: статистические показатели точности модели (средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратичная ошибка (RMSE), коэффициент детерминации ( $R^2$ ); производственные показатели (длительность простоев оборудования, количество аварийных остановок, стабильность технологического режима); энергетические показатели (потребляемая мощность индуктора, удельные

энергозатраты на плавку); временные показатели (время выхода на установившийся режим, время диагностики отклонений).

Оценка эффективности осуществляется путем сопоставления результатов работы индукционной печи в базовом и интеллектуальном режимах.

Предложенная методика обладает следующими особенностями:

- комплексный характер оценки (учитываются технические, энергетические и экономические показатели);
- возможность использования как расчетных, так и экспериментальных данных;
- применимость для различных режимов работы оборудования;
- ориентация на задачи предиктивного управления и диагностики.

### Показатели точности цифрового двойника

Таблица 1

Контролируемый параметр	MAE	RMSE	Коэффициент детерминации R <sup>2</sup>
Температура расплава	3,7 °C	4,9 °C	0,96
Потребляемая мощность	4,2 кВт	5,6 кВт	0,95
Уровень металла в тигле	1,8 %	2,3 %	0,97
Скорость вытягивания заготовки	0,04 м/мин	0,06 м/мин	0,95
Среднее значение по модели	–	–	0,96

Представленные показатели (таблица-1) свидетельствуют о высокой точности разработанного цифрового двойника. Значения коэффициента детерминации, близкие к единице, подтверждают хорошее соответствие результатов моделирования реальным технологическим процессам, а низкие значения ошибок прогнозирования позволяют использовать цифровой двойник для решения задач мониторинга и предиктивной диагностики оборудования.

Таким образом были рассмотрены три основных критерия оптимизации режимов функционирования ИП: минимизация потреблённой тепловой энергии  $E$  при обеспечении нормируемой температуры воздуха в помещениях  $T_i \geq 22$  °C, минимизация отклонения фактической температуры подачи от заданной по температурному графику, обеспечение устойчивости системы регулирования (отсутствие колебательных процессов и перерегулирования).

Проведенный сравнительный анализ показал, что наибольший эффект достигается при комбинированном применении методов: сочетание «Материалы и конструкция» обеспечивают базовую надежность, покрытия повышают устойчивость

к внешним воздействиям, цифровые методы обеспечивают контроль и прогнозирование состояния.

**Вывод:**

Наибольшая эффективность работы ИП достигается при системном подходе к проектированию и эксплуатации токоведущих систем. Результаты проведенного анализа основных способов повышения эксплуатационных параметров контактных проводов и токоведущей части кабельно-проводниковой продукции. Установлено, что деградация проводников носит комплексный характер и определяется совокупностью электрических, тепловых и механических факторов. Было показано, что повышение эксплуатационных характеристик возможно за счет применения современных материалов, конструктивной оптимизации, защитных покрытий и внедрения цифровых технологий мониторинга. Наиболее перспективным направлением является интеграция цифровых двойников в систему управления эксплуатацией проводниковых систем, что обеспечивает переход к предиктивным методам обслуживания и повышению надежности электротехнических систем.

**Список литературы**

1. Жежеленко И. В. Электрические контакты и контактные материалы. – М.: Энергоатомиздат, 2015. – 368 с.
2. Кнорринг Г. М. Электротехнические материалы. – СПб.: Питер, 2018. – 352 с.
3. Барыбин Ю. Г., Чернышев В. Н. Материаловедение в электротехнике. – М.: Академия, 2019. – 416 с.
4. Сажин Б. С., Сажин В. Б. Электротехнические материалы и изделия. – М.: Издательский центр «Академия», 2020. – 384 с.
5. Китаев Б. И., Лазарев В. Г. Контактные сети электрического транспорта. – М.: Транспорт, 2017. – 496 с.
6. Braunovic M., Konchits V. V., Myshkin N. K. Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 672 p.
7. Slade P. G. Electrical Contacts: Principles and Applications. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 1312 p.
8. Holm R. Electric Contacts: Theory and Application. – Berlin: Springer, 2013. – 482 p.
9. Glaeser W. A. Tribology of Electrical Contacts. – Materials Park: ASM International, 2018. – 245 p.

10. Rao B. P., Prasad K. V. Reliability Assessment of Power Conductors under Thermal and Mechanical Loading // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – Vol. 124. – Article 105360.

11. Wang L., Zhang Y., Li H. Research on Degradation Mechanisms of Copper Conductors under Cyclic Thermal Loads // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol. 31. – Article 103414.

12. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A. Y. C. Digital Twins and Cyber-Physical Systems for Smart Manufacturing and Electrical Equipment Monitoring // *Engineering*. – 2019. – Vol. 5. – No. 4. – P. 653–661.

13. ГОСТ 2584–86. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрического транспорта. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020.

14. ГОСТ 22483–2021. Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров. Основные параметры. – М.: Стандартинформ, 2021.

15. IEC 60228:2023. Conductors of Insulated Cables. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2023.