

УДК 621.311.22

Петряков Виталий Александрович, аспирант кафедры Инженерные системы и сооружения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКОВ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ГАЗОВЫХ МИКРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛО ГЕНЕРАЦИИ

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы создания цифровых двойников малых энергетических систем, работающих в режиме когенерации. Проанализирована существующая нормативная база для создания информационных цифровых моделей в рамках импортозамещения. Предложен алгоритм работы цифровой информационной модели для определения технического состояния (диагностики) малых энергетических систем.

Abstract

The article discusses the issues of creating digital twins of small energy systems operating in cogeneration mode. The existing regulatory framework for creating information digital models within the framework of import substitution is analyzed. An algorithm for the operation of a digital information model for determining the technical condition of small energy systems is proposed.

Ключевые слова: микротурбинные установки, когенерация, цифровые двойники, системы предиктивной диагностики, цифровые информационные модели, системы теплогенерации.

Keywords: microturbine plants, cogeneration, digital twins, predictive diagnostics systems, and digital information models, heat generation systems.

Актуальность данной работы определяется несколькими ключевыми факторами:

Энергетическая стратегия России до 2035 года, требующая оптимизации использования ресурсов и повышения эффективности энергетических систем зачѐт внедрение современных технологий, в том числе и цифровых двойников; [1]

Вступление в действия ГОСТа Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Данный ГОСТ создал нормативную базу для разработки и применения цифровых двойников в промышленности;

Соответствие международной унифицированной информационной модели CIM (Common Information Model) позволяющую интегрировать разрозненные (локальные) энергогенерирующие системы в единую сеть для обмена данными;

ГОСТ «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы» обеспечивающий стандартизированный подход к описанию энергетических объектов в том числе информационных моделей энергогенерирующих установок. [2]

Цель исследования разработка методов и алгоритмов для диагностики когенерационных газовых микротурбинных установок с помощью цифровых информационных моделей цифровых двойников. Последовательно были рассмотрены следующие вопросы: нормативная база для создания цифровых двойников в российской федерации;

определить принципы создания цифровых двойников подходящих для малых энергетических установок когенерационного типа; предложить форму цифровой информационной модели на основе существующих стандартов; разработать алгоритм позволяющий определять (диагностировать) техническое состояние когенерационных газовых микротурбинных установок (далее КГМТУ).

Определяя, что такое цифровой двойник сегодня можно оперировать следующими положениями: в контексте ГОСТа цифровой двойник изделия — это система, включающая цифровую модель изделия, и обеспечивающая двусторонний обмен данными с реальным изделием (при его наличии) и/или его частями на всех стадиях жизненного цикла, предназначенная для анализа, контроля и оптимизации свойств и поведения изделия.[2]

Цифровой двойник создаётся и используется на всех стадиях жизненного цикла изделия, при этом его состав и функции меняются по мере жизненного цикла. Изменения обусловлено технологическими процессами и процессами модернизации системы. В ГОСТе подчёркивается, что цифровой двойник должен наполняться данными:

- от цифровых (виртуальных) испытаний и расчётов;
- от датчиков и систем мониторинга реального изделия;
- от других информационных систем (конструкторская, технологическая, эксплуатационная документация) [3]

За счёт постоянного обмена данными цифровой двойник позволяет проводить виртуальные испытания и обоснование конструкторских решений до изготовления реально физической системы. Моделирование режимов эксплуатации изделия позволяет проводить анализ поведения, выявлять критические зоны, выбирать места и количество устанавливаемых датчиков. Тем самым позволяет уменьшать так называемый «цифровой шум» от лишних информационных данных.

Такой подход позволяет проводить обслуживание, ремонт и модернизацию системы на основе реальных данных об объекте. [4]

Существует несколько типов цифровых двойников в зависимости от применения:

- бывают двойник продукта — это цифровая копия изделия
- двойник процесса в основном это моделирование производственных процессов предприятий
- двойник системы представляет из себя описание процессов логистической цепи инфраструктуры
- двойник организации или модель компании позволяющая принимать управленческие решения.

1. Для создания цифрового двойника КГМТУ нами была предложена иерархия, представленная на рисунке 1.

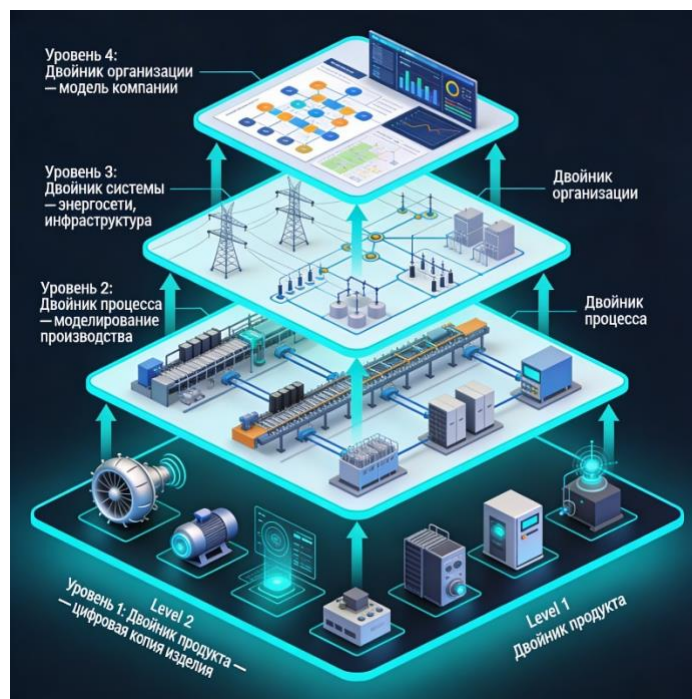


Рисунок 1. Иерархия цифрового двойника производства.

Классической жёсткой иерархии в стандартах нет, но логическая «матрёшка» между этими типами обычно прослеживается. Так двойник

продукта — это уровень один на рисунке, может входить в двойник процесса уровень два, оба уровня — в двойник системы уровень три, а все вместе поддерживают двойник компании как верхний уровень иерархии. [5]

Иерархия цифровых двойников — это сложная структура Детальной методики типа «шаг 1–2–3» по разработке цифрового двойника под конкретную задачу нет не в ГОСТ, не в отраслевых нормативах. А существующие нормативы больше формулируют рамочные требования, а подробные принципы и технологии реализации оставляют на откуп отраслевым стандартам и требованиям организаций, создающих свой Цифровой двойник.

КГМТУ представляющей из себя — комплексную систему, состоящую из газовой микротурбины и интегрированного теплообменника, который преобразует тепловую энергию отходящих выхлопных газов. КГМТУ решает две задачи, вырабатывает электрическую и тепловую энергию за один цикл, для систем отопления и горячего водоснабжения. Данные установки применяются как автономно, так и параллельно с централизованной сетью в жилых комплексах, промышленных объектах и медицинских учреждениях.

Для дальнейшей работы был выбран классический алгоритм по созданию цифрового двойника для исследуемой установки, состоящий из следующих шагов:

- Первый шаг. Постановка цели и требований. Необходимо определить назначение цифрового двойника
- Второй шаг. Формирование цифровой информационной модели (далее ЦИМ). ЦИМ является ядром двойника, описывающее установку как объект эксплуатации
- Третий шаг. Выбор программной платформы для создания цифрового двойника. На этом шаге определяют, как именно ЦИМ будет «развёрнута» в модель: через импорт

CIM-описания, ручную сборку блок-схемы, или библиотеку типовых элементов.

- Четвертый шаг. Построение математических моделей КГМТУ. Используя данные ЦИМ, строятся физико-математические модели основных узлов и процессов происходящих в них.
- Пятый шаг. Интеграция с данными и датчиками. Чтобы модель стала цифровым двойником, а не просто симулятором, её связывают с физической установкой.
- Шестой шаг. Настройка алгоритмов диагностики и аналитики. На цифровой модели реализуются алгоритмы диагностики, которые строятся на сравнении фактических и расчётных параметров
- Седьмой шаг. Верификация и валидация цифрового двойника. Тут сравнивают результаты моделирования с экспериментальными данными по разным режимам работы.
- Восьмой шаг. Это развёртывание и эксплуатация двойника. Интегрируют двойник в инфраструктуру предприятия. Определяют регламент использования: онлайн-мониторинг, периодический пересчёт режимов, анализ «что-если», планирование ремонтов и технического обслуживания.

Для создания цифрового двойника КГМТУ был составлен алгоритм, на основе вышеизложенного. При проработки данный алгоритм был сокращен до 7 шагов (или этапов):

- Первый этап. Постановка цели и требований. Необходимо определить назначение двойника, для нас это диагностика, прогноз отказов, оптимизация режимов; заданные требования к точности 95–97% по мощности и КПД, режим работы с сетью и автономный, интеграция с метрическими системами и интерфейсами SCADA и CIM.

- Второй этап. Формирование цифровой информационной модели, ЦИМ — ядро двойника, описывающее установку как объект эксплуатации. В нее входят: паспортные данные КГМТУ; нормативная база стандартов и ГОСТов; структура оборудования и соединений; ретроспективные данные диагностики. Метаданные, такие как место установки, режимы эксплуатации, график ремонтов, привязка к тепловой и электрической сети.
- Третий этап. Выбор программной платформы для создания цифрового двойника. На этом шаге определяют, как именно ЦИМ будет «развёрнута» в модель. Это один из сложнейших этапов. В работе рассматриваются несколько инструментов, позволяющих создать цифрового двойника это Python язык программирования общего назначения с обширной и открытой библиотекой. Также российская инженерная платформа для системного моделирования, математических вычислений и разработки алгоритмов Engее.
- Четвертый этап. Построение математических моделей КГМТУ. Используя данные ЦИМ, строятся физико-математические модели основных узлов: Газодинамическая часть, центробежный компрессор, турбина, камера сгорания, баланс масс и энергии, расчёт степеней сжатия и расширения, КПД ступеней; Термодинамическая модель теплообменника и контура, дифференциальные уравнения теплообмена с учётом распределения температур по каналам; Гидравлическая модель, уравнения движения жидкости, учёт перепадов давления и локальных сопротивлений, модель расчета движения теплоносителя в контурах; Электрическая часть, модель генератора, работа сетью и автономно.
- Пятый этап. Интеграция с данными и датчиками. Чтобы модель стала цифровым двойником, а не просто симулятором, её

связывают с реальными измерениями. Определяют набор датчиков: давление, температура, расход топлива, расход воздуха в камере сгорания, частота вращения, вибрацию установки и отдельных узлов, замеры напряжения. Устанавливают точки съёма данных и частоту дискретизации. Так как создаваемая модель не будет связана с реальным объектом, на этапе разработки данные для ее создания будут генериться на платформе Engage и через Python. Для генерации данных заранее прописываются эксплуатационные сценарии работы КГМТУ. Основными шагами при разработке сценариев являются диагностические признаки, эталонные характеристики работы КГМТУ, построение диагностических уравнений и таблиц, по которым определяют вклад каждой неисправности в суммарные потери мощности и КПД.

- Шестой этап. Настройка алгоритмов диагностики и аналитики. На цифровой модели реализуются алгоритмы диагностики, которые строятся на сравнении фактических и расчётных параметров.
- Седьмой этап. Верификация и валидация цифрового двойника. Тут сравниваются результаты моделирования с экспериментальными данными по разным режимам работы. Оцениваются расхождения по ключевым параметрам, добиваясь целевой точности 95–97% за счёт уточнения параметров диагностических моделей и ЦИМ в целом.

На рисунке 2 представлен алгоритм создания цифрового двойника для КГМТУ.

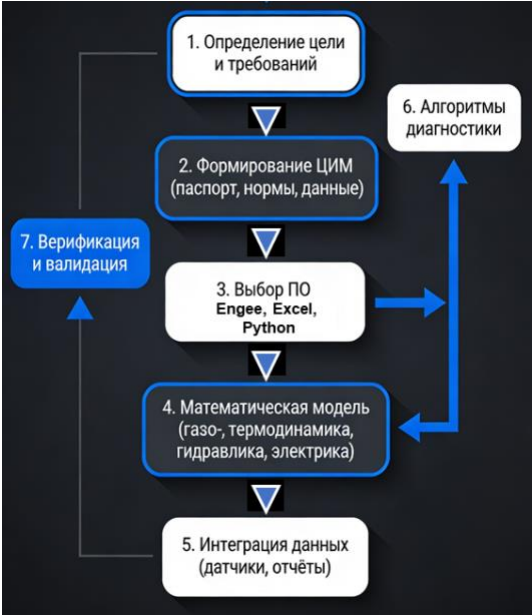


Рисунок 2. Алгоритм создания цифрового двойника для КГМТУ.

При создание цифрового двойника КГМТУ большое внимание нужно уделить именно формированию основы которая представляет из себя Цифровую информационную модель. ЦИМ формируется из нескольких ключевых блоков в соответствии с ГОСТ и CIM-моделью. ЦИМ обеспечивает интеграцию паспортных данных, исторической информации и математических описаний для диагностики.

Таблица 1. Основные параметры ЦИМ.

Блок	Содержание	Источники данных	Применение в диагностике
Паспорт	Номинальные параметры (Ne0=65 кВт, η0=0,29, P1/P2, Z, T и тд)	Техдокументация/ Нормативная документация	Сравнения с базовыми нормами и требованиями
История	Таблицы измерений (Excel: Ne1-Ne4, η1-η4, суммарные потери)	Датчики, SCADA (данные сценарной генерации)	Обнаружение трендов неисправностей
Модели	Физико-математические уравнения описывающие процессы работы установки (гидравлика, термодинамика, электрика)	Engel, Excel, Python	Прогноз и верификация (точность 95-97%)
Интеграция	IoT/SCADA, CIM	Реальные данные (данные сценарной генерации)	Алгоритмы диагностики компрессора/турбины

Для разработки ЦИМ была создана форма в экселе описывающая паспортные и эксплуатационные показатели и значения в которых должна работать установка. Работа установки предполагается в двух режимах с сетью и автономно. На основании данной таблицы были построены имитационные графики с показателя эксплуатационных режимов. Ниже представлены основные диаграммы зависимостей.



Рисунок 3. Суммарное искажение гармоник напряжения.

На диаграмме представлена зависимость искажение гармоник от нагрузки.

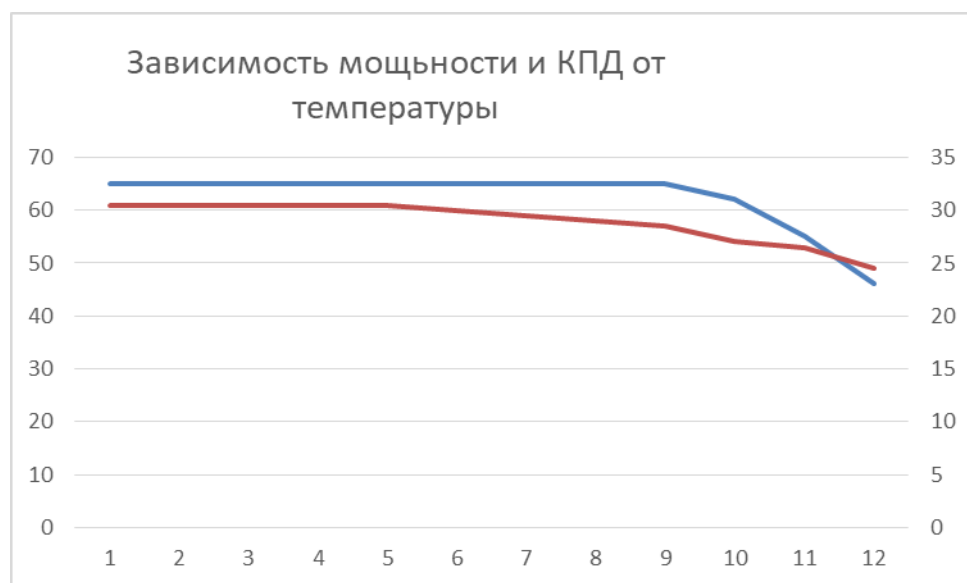


Рисунок 4. Зависимость мощности, КПД и температуры.

На диаграмме 4 представлена зависимость мощности на выходах генератора и КПД установки от температуры окружающей среды.

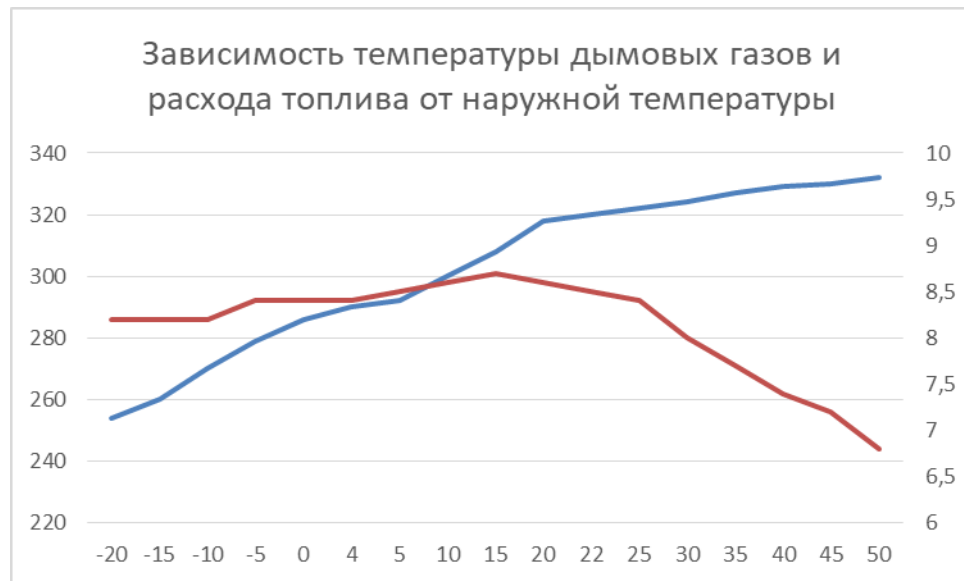


Рисунок 5. Влияние температуры на расход топлива и выхлопных газов.

На диаграмме 5 представлена зависимость температуры уходящих выхлопных газов и расхода топлива от температуры наружного воздуха.

В статье представлена часть диаграмм рассчитанных на ЦИМ КГМТУ, показывающие эксплуатационные характеристики для сравнительной работы цифрового двойника установки.

В ЦИМ также создан журнал событий для фиксации данных о запусках и остановов установки, продувки камеры сгорания, обнаружение повышения давления на входе и аварийные остановки.

Для описания сценариев были созданы Шаблоны работы установки, которые позволяют моделировать различные эксплуатационные ситуации такие как:

- проверка готовности системы к запуску (температура топливного газа, температура окружающей среды, давление газа на входе, давление атм.)
- последовательность действий для запуска КГМТУ (продувка камеры сгорания 30 сек, подача топлива, розжиг, выход на номинальные обороты, подключение нагрузки)

- контроль параметров, поддержание оптимальных режимов, реакция на измерения нагрузки (частота вращения, температура выхлопных газов, вибрация вала)
- диагностика нештатных ситуаций (вибрация, перегрев генератора, утечка в теплообменнике).
- Плановая или аварийная остановка с соблюдением норм безопасности (плановая остановка, аварийная остановка). [6]

Заключение.

Ключевыми стандартами для создания цифровых двойников являются ГОСТ Р 57700.37-2021 (определение цифрового двойника как системы с двусторонними связями), ISO 23247-1-2021 (структура цифровых реплик), ГОСТ Р 58651.12-2025 (информационная модель электроэнергетики) и CIM (Common Information Model) как унифицированная модель данных для энергосистем. Эти документы обеспечивают совместимость данных через CIMXML и стандартизируют обмен информацией между SCADA, ERP и моделями. Они применяются к КГМТУ для интеграции паспортных данных, нормативов и реальных измерений. Принцип создания ЦИМ включает определение целей диагностики (паспорт + нормы + исторические данные), математическое моделирование процессов (газодинамика, гидравлика, термодинамика) и верификацию с точностью 95-97% по сравнению с CFD. Процесс использует итеративную интеграцию IoT-данных с уровня 1 (SCADA) и уровня 2 (математические модели) для реального времени обновления. Важны двусторонние связи и алгоритмы диагностики неисправностей. Предлагаемая ЦИМ для КГМТУ — иерархическая структура на базе CIM с классами генератор, агрегат и оборудование, будет интегрированная с Python, для обработки данных и библиотеки Engage для моделирования и запуска цифрового двойника. Предложенный формат ЦИМ для создания цифрового двойника КГМТУ обеспечивает экспорт в формат

предоставления данных CIMXML для совместимости с единой энергосистемой российской федерации.

Список используемой литературы.

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 года №908-р
2. ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»
3. ГОСТ Р 58651.12-2025 «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Информационная модель электроэнергетики. Профиль информационного обмена и требования к цифровым информационным моделям электроэнергетических систем».
4. ISO 23247-1:2021 «Системы автоматизации и интеграция. Структура цифрового двойника производства. Часть 1. Обзор и общие принципы».
5. Чекардовский М.Н., Чекардовский С.М., Чекардовская И.А., Шалагин И.Ю. Метод и алгоритм определения эффективных показателей обслуживания систем ТГВ в условиях цифровизации с помощью «золотого квадрата» // Приволжский научный журнал. — 2023. — №4.
6. Чекардовский М.Н., Илюхин К.Н., Чекардовский С.М., Шаповал А.Ф. Алгоритм диагностирования когенерационной газовой микротурбинной установки // Приволжский научный журнал. — 2022. — №2. — С. 113–119.