

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Щербатов И.А., Долгушев А.Н., Агibalов В.А., Белов М.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г.Москва

Ключевые слова: моделирование, диагностика, цифровой двойник, безопасность.

Аннотация. В данной статье проводится обзор применения цифровых двойников для повышения надёжности и эффективности работы энергетического оборудования: моделирование процессов работы оборудования, диагностика систем на наличие признаков некорректной работы оборудования и наличие скрытых дефектов, прогнозирование отказов и аварийных ситуаций. Приведён один из этапов создания цифрового двойника паровой турбины, а именно математической модели.

THE USE OF DIGITAL TWINS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF EQUIPMENT IN THE POWER INDUSTRY

Shcherbatov I.A., Dolgushev A.N., Agibalov V.A., Belov M.V.

National Research University "MPEI", Moscow

Keywords: simulation, diagnostics, digital twin, safety.

Abstract. This article provides an overview of the use of digital twins to improve the reliability and efficiency of power equipment: modeling equipment operation processes, diagnosing systems for signs of incorrect equipment operation and the presence of hidden defects, predicting failures and emergencies. One of the stages of creating a digital twin of a steam turbine, namely a mathematical model, is presented.

Впервые концепцию цифрового двойника определил Michael W. Grives [1]. В настоящее время под термином «цифровой двойник» понимается реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле объекта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними. Цифровой двойник объединяет в себе информацию о показателях функционирования объекта, параметры которой уточняются с помощью реальных данных и его детальную математическую модель.

Цифровой двойник – это виртуальный прототип реальных производственных активов – турбины, ветроэлектрической установки и т.д. Это сложный программный продукт, создается он на основе самых разнообразных данных и с помощью многочисленных датчиков. Цифровая модель помогает менять параметры работы оборудования и вносить улучшения гораздо быстрее и безопаснее, чем при экспериментах на реальных объектах.

Цифровой двойник позволяет существенно расширить возможности облачных аналитических сервисов, используемых в концепции промышленного интернета вещей [2] четвертой промышленной революции.

Основными направлениями применения цифровых двойников являются моделирование, управление, диагностика, прогнозирование и обучение.

Цифровые двойники позволяют совершать прогноз аварийных ситуаций. В статье [3] представлен обзор программных комплексов, позволяющих

визуализировать этапы вычисления рисков и минимизировать время процесса расчета на основе моделирования процесса. В нефтеперерабатывающей промышленности для симулирования в наземных условиях наиболее известных сценариев воспламенения и токсического выброса используется программный инструмент FLACS.

Применение моделирования процесса для оценки рисков дает дополнительные возможности, например, проверка гипотезы при расследовании происшествия прогнозирование рассеивания дыма, визуализация результатов в трех измерениях, определение местоположения газа, оптимизированное разделение между оборудованностями, спецификация пассивного пожара и защита, размещение оборудования для обеспечения безопасности [4].

Программный инструмент FLACS-Risk способен создать трехмерную визуализацию риска избыточных давлений взрыва [5], что предоставляет возможность сформировать величину опасного вещества, проникшего в атмосферу в результате аварийной ситуации, и наглядно представить результаты расчетов на планах окрестности, осуществить оценку количества людей, оказавшихся в зонах воздействия опасностей, пострадавших для различных сценариев аварийных ситуаций. В результате имеется возможность построения поля потенциального риска.

В статье [6] разработан алгоритм машинного обучения для решения задачи прогнозирования вибрационного состояния с целью диагностики работы подшипников и совершенствования сборочных процессов ротора турбины с использованием его цифрового двойника. Цифровой двойник ротора включает в себя специально созданную в CAD-модуле программы NX параметрическую 3D-модель и расчётный проект в системе ANSYS, в котором имитируются условия работы ротора.

Создана и использована оригинальная модель балансировки, учитывающая производственные отклонения ротора. К достоинствам работы можно отнести, что новшеством разработанного алгоритма является модель прогнозирования вибрационного состояния и применение машинного обучения в виде нейронных сетей, которые в свою очередь значительно снижают трудоёмкость расчётов.

В качестве основных недостатков можно выделить сложность обучения нейронной сети и узость её применения, а именно только на ступенях низкого давления.

В статье [7] создана проектная система, позволяющая разработать энергоэффективную мини-ГЭС на любые требуемые параметры с учетом места её установки на малых и средних реках.

Цифровой двойник, созданный данной системой, во многом снижает риски при производстве реальной модели. К преимуществам работы можно отнести, что на созданном цифровом двойнике можно проводить все исследования и испытания генератора в различных режимах.

На основе проведённого литературного обзора, можно сделать вывод об актуальности данной темы, но, не смотря на полученные результаты, необходимо отметить, что в энергетике данная тема требует дальнейшие исследования.

Одним из важных моментов создания цифрового двойника является создание математической модели самого объекта, так в ходе выполнения в рамках проекта была создана математическая модель паровой турбины. Блок-схема математической модели показана на рисунке 1.

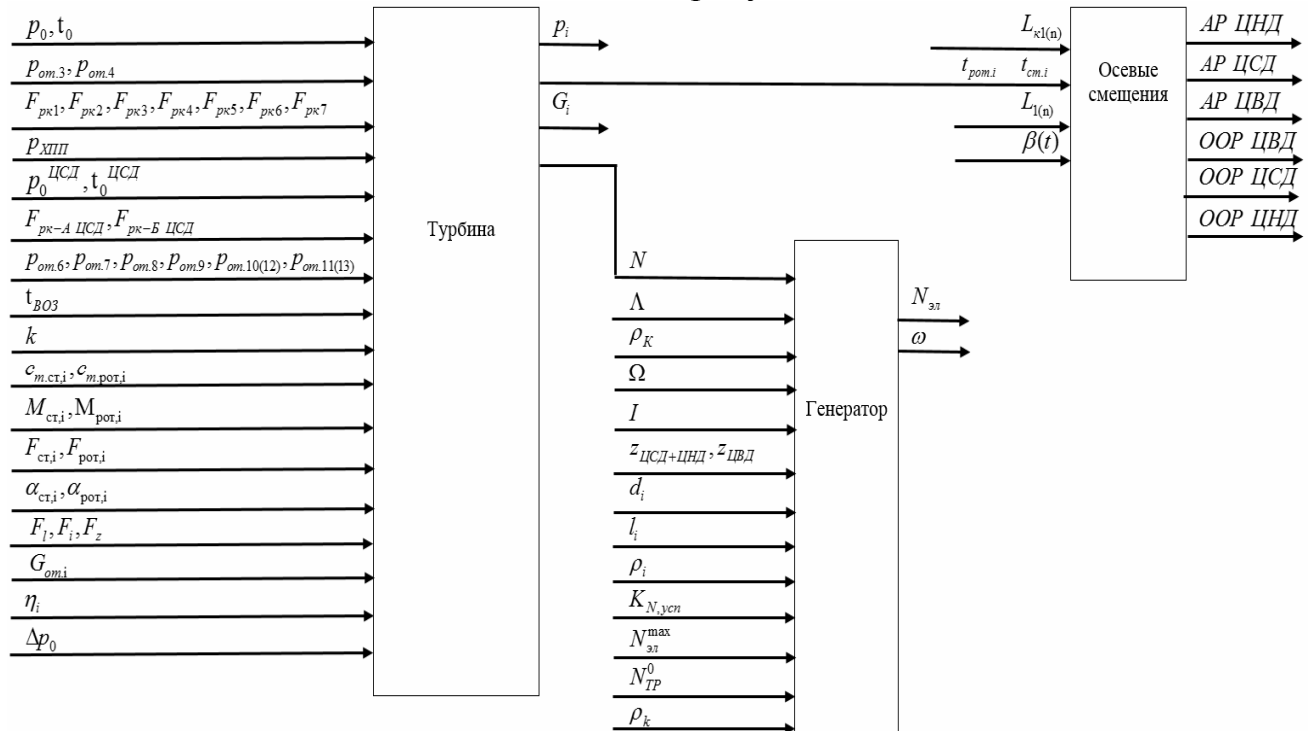


Рис. 1. Математическая модель паровой турбины

На рисунке 1 обозначено: AP ЦНД – Абсолютное расширение корпуса ЦНД, AP ЦСД– Абсолютное расширение корпуса ЦСД, AP ЦВД– Абсолютное расширение корпуса ЦВД, OOP ЦВД– Относительное расширение корпуса ЦВД, OOP ЦСД – Относительное расширение корпуса ЦСД, OOP ЦНД – Относительное расширение корпуса ЦНД. Остальные обозначения можно найти [8].

При создании математической модели, было обнаружено, что для её нормального функционирования необходимы термодинамические зависимости, такие, например, как, зависимость энтальпии пара от давления и температуры пара. Для реализации такой функциональной зависимости, воспользовались высокоуровневым языком программирования Python и материалами Международной ассоциации по свойствам воды и пара [9].

На рисунке 2 представлен фрагмент программы расчёта термодинамических свойств воды и пара.

Проверив программу на множестве значений и сравнив их с табличными значениями [10], мы пришли к выводу о том, что данную программу, можно использовать для расчёта термодинамических свойств воды и пара. Так при давлении 14 МПа и температуре 790°C, абсолютная погрешность составила $7.66643 \cdot 10^{-5} \%$.

```

# Функция определения удельной энтальпии (h, КДж/кг) как зависимость от давления (p, МПа) и температуры (T, К)
# в области перегретого пара
def НРТ2(p, T):
    y: float = 0 # по расчету гамма 0 тау - Свободная энергия Гиббса, идеальная часть
    x: float = 0 # по расчету гамма Pi тау - Свободная энергия Гиббса, реальная часть
    t = 540 / T # безразмерная температура
    R = 0.461526 # КДж/кг*К универсальная газовая постоянная

    # Расчет идеальной составляющей энергии Гиббса

    j0 = [0.0, 1.0, -5.0, -4.0, -3.0, -2.0, -1.0, 2.0, 3.0]
    n0 = [-0.96927686500217 * (10 ** 1), 0.10086655968018 * (10 ** 2), -0.56087911283020 * (10 ** -2),
          0.71452738081455 * (10 ** -1), -0.40710498223928, 0.14240819171444 * 10, -0.43839511319450 * 10,
          -0.28408632460772, 0.21268463753307 * (10 ** -1)]

    for i in range(0, 9):
        y = y + n0[i] * j0[i] * (t ** (j0[i] - 1.0))

    # Расчет реальной составляющей Гиббса

    i = [1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 5, 6, 6, 6, 7, 7, 7, 8, 8, 9, 10, 10, 10, 16, 16, 18, 20,
          20, 20, 21, 22, 23, 24, 24, 24]

    J = [0, 1, 2, 3, 6, 1, 2, 4, 7, 36, 0, 1, 3, 6, 35, 1, 2, 3, 7, 3, 16, 35, 0, 11, 25, 8, 36, 13, 4, 10, 14, 29, 50,
          57, 20, 35, 48, 21, 53, 39, 26, 40, 58]

    n1 = [...]

    for k in range(0, len(n1)):
        x += n1[k] * p ** i[k] * J[k] * (t - 0.5) ** (J[k] - 1)

    h = R * T * t * (y + x) # Энтальпия перегретого пара

    return h

```

Рис. 2. Фрагмент программы на языке Python

Проведя исследования, делаем выводы о том, что цифровой двойники имеют множество способов применения и что данная тематика является актуальной. Так в ходе выполнения проекта была создана математическая модель паровой турбины.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения построения имитационных моделей цифровых двойников оборудования ТЭС и тепловых схем для применения в составе систем диагностики и предиктивной аналитики» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и ИТ» и «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 гг.

Список литературы

1. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // ransdisciplinary perspectives on complex systems. – Springer, Cham, 2017. – P. 85-113.
2. Цуриков Г.Н., Щербатов И.А. Применение промышленного интернета вещей на объектах энергетики // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2018. №2. С. 97-100.
3. Абдрахманова К.Н. и др. Обзор современных программных комплексов и концепции цифрового двойника для прогнозирования аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли // Нефтегазовое дело. – 2020. – №3. – С. 71-91.

4. Марухленко А.Л., Агапов А.А. Учебные курсы по 3Dмоделированию последствий аварий с использованием программного комплекса FLACS // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 2. С. 78-79.
5. Success Factors for Computational Fluid Dynamics (CFD) based Fire and Explosion Studies // Bell Energy. URL: <https://bell-energy.com/businessanalytics/cfd-success-factor>
6. Болотов М.А. и др. Алгоритм прогнозирования вибрационного состояния ротора турбины с использованием машинного обучения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – Т. 19. – № 1. – С. 18-27. – DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-18-27.
7. Андрушин А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И. Управление и инноватика в теплоэнергетике. – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – 392 с.
8. Киселев А.И. Динамическая модель паровой турбины для компьютерных тренажеров: дисс. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2004. – 160 с.
9. Wagner W., Kretzschmar H.J. IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam // International steam tables: properties of water and steam based on the industrial formulation IAPWS-IF97. – 2008. – P. 7-150.
10. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.

Сведения об авторах:

Щербатов Иван Анатольевич – к.т.н., доцент кафедры Автоматизированных систем управления тепловыми процессами, НИУ «МЭИ», Москва;
Долгушев Алексей Николаевич – студент, НИУ «МЭИ», г.Москва;
Агибалов Владимир Алексеевич – студент, НИУ «МЭИ», г.Москва;
Белов Михаил Константинович – студент, НИУ «МЭИ», г.Москва.