

УДК 621.318.38

doi 10.54708/22259309_2025_13247

ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АКТИВНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

Д. Р. Ильясов¹, Ш. Н. ШАРАФУТДИНОВ², Д. А. ГЛУМОВ³

¹david.ilyasow@gmail.com, ²sharshamil98@gmail.com, ³glumov00@gmail.com

¹⁻³ ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация: Активные магнитные подшипники (АМП) используются для обеспечения бесконтактного вращения роторов. Сбои в работе датчиков и систем управления АМП приводят к аварии и длительным простоям оборудования. Технология цифровых двойников (ЦД) позволяет создавать и контролировать виртуальные копии физических систем в реальном времени. В данной статье рассматривается подход к созданию цифровых двойников для АМП.

Ключевые слова: активный магнитный подвес; магнитный подшипник; цифровой двойник; программно-аппаратное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность предъявляет повышенные требования к подшипниковым узлам. Их конструкция должна обеспечивать надежность, долговечность, работу в экстремальных условиях и удобство обслуживания. В ряде областей традиционные механические подшипники могут быть заменены на активные магнитные подшипники – вид опор, поддерживающих бесконтактную подвеску ротора агрегата, из-за чего они обладают следующими преимуществами: меньший износ и трение, повышенная надежность, способность работать на высоких скоростях и в сложных условиях, легкость обслуживания [1]. В настоящее время большое внимание уделяется безотказной работе оборудования, из-за чего диагностика состояния в режиме реального времени и прогнозирующий контроль аварийного состояния магнитных подшипников являются актуальной областью исследований.

Эффективная работа АМП обуславливается наличием стабилизирующей системы управления с обратной связью. Система АМП состоит из множества компонентов, основными из них являются контроллер, датчики положения, усилители мощности и электромагнитный привод. На рис. 1 приведена схема работы АМП.

Чтобы выявить случаи сбоев в работе АМП, принято проводить сравнительный анализ наблюдаемого поведения системы и ее ожидаемой производительности при нормальных условиях эксплуатации [2]. Альтернативный подход заключается в проведении имитационного моделирования перед производством.

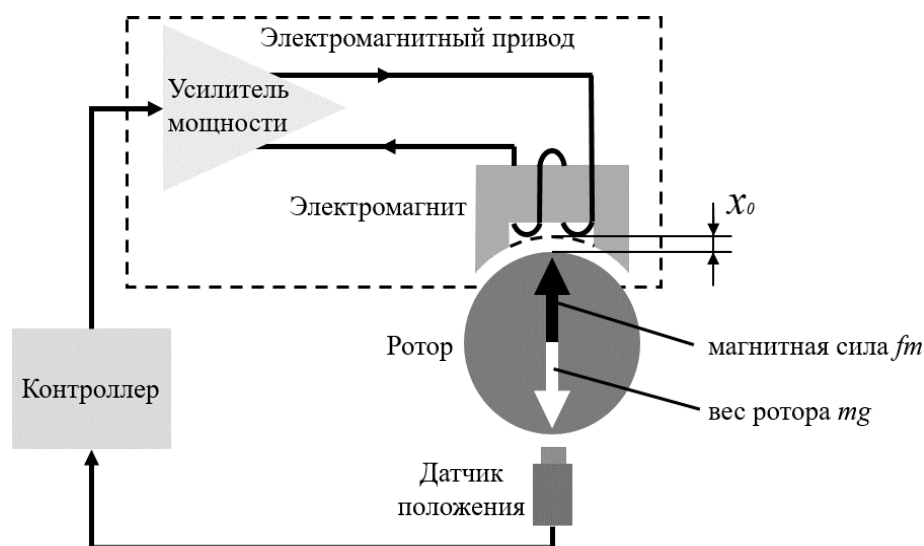


Рис. 1. Схема АМП

В данном виде тестирования наиболее полную информацию предоставляют цифровые двойники – виртуальное представление физической системы, которое обновляется в режиме реального времени для отражения состояния системы на основе информации, поступающей от датчиков и других источников (рис. 2). Цифровой двойник может выявлять возможные проблемы, прогнозировать возможные сбои и предлагать шаги по их предотвращению или уменьшению, проводя анализ данных, поступающих от оборудования [3].

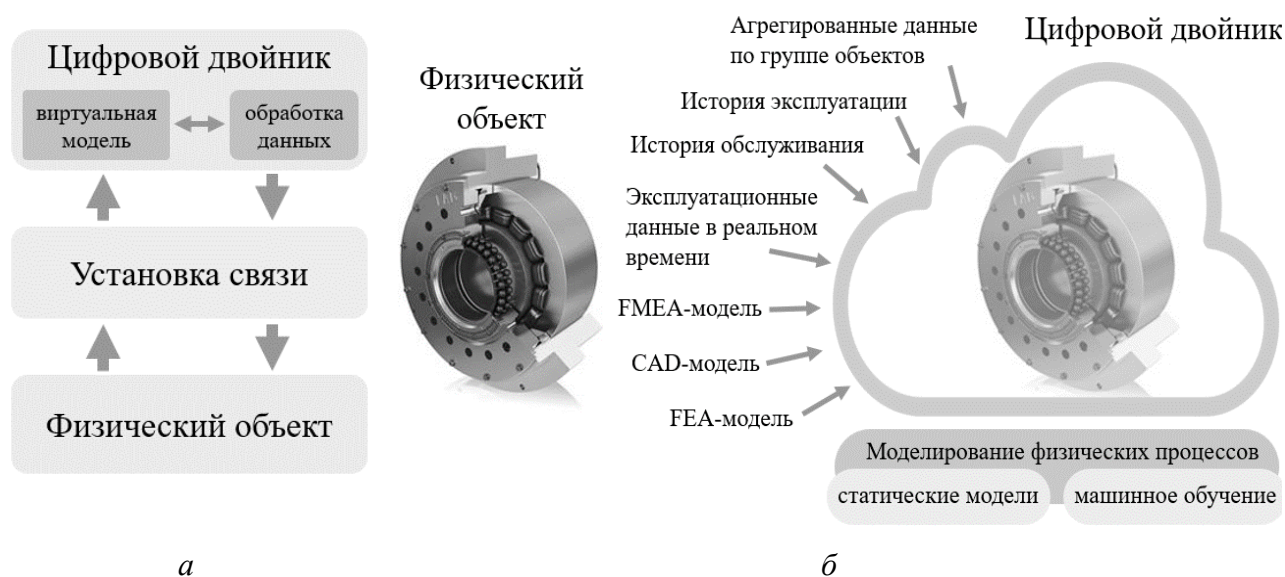


Рис. 2. Структура цифрового двойника:
 а – общая модель цифрового двойника;
 б – информационная основа цифрового двойника

Цель цифрового двойника – имитировать поведение и производительность физического объекта или системы в различных условиях эксплуатации. Цифровой двойник может быть использован для моделирования поведения ротора, системы управления и магнитного поля в статоре АМП. Это позволяет оценить производительность и конструкцию системы еще до ее разработки [4].

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК АМП

Для того чтобы технология цифрового двойника была эффективной, крайне важно, чтобы модель точно отражала состояние фактической работы. Цифровое моделирование магнитных подшипников содержит физический и виртуальный уровни. Модель взаимодействия различных уровней магнитного подшипника показана на рис. 3.

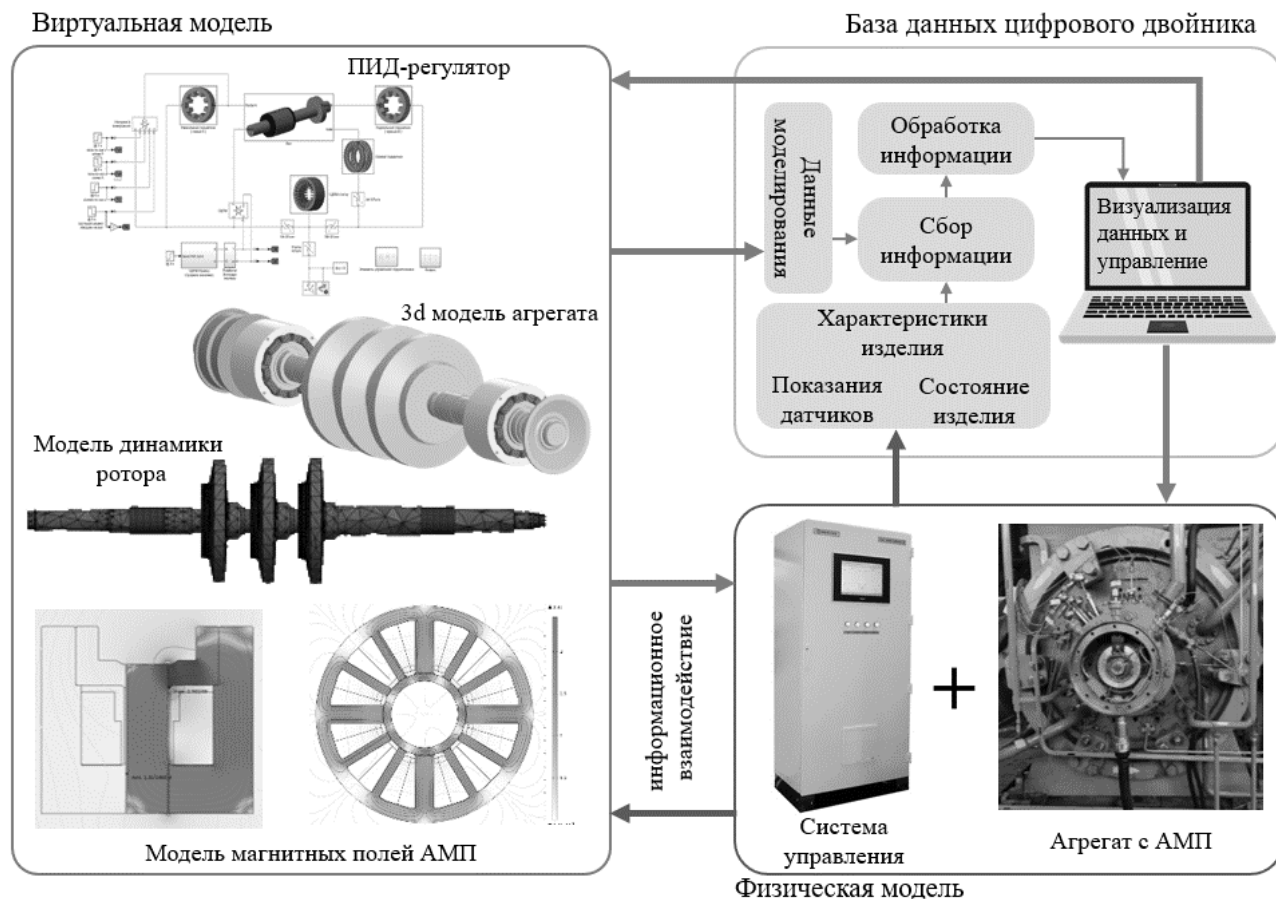


Рис. 3. Схема цифрового двойника активного магнитного подшипника

Физический уровень: охватывает аппаратное обеспечение системы. Как правило, в системах мониторинга состояния объект является ядром физического измерения и включает в себя датчики, контроллеры и другое необходимое оборудование. Одним из важных аспектов, который следует учитывать, является двойственность этих компонентов: привод АМП является чисто физическим объектом, поскольку представляет собой систему электромагнитного преобразования, выполняющую одну цель. Датчики и контроллеры представляют как физический, так и виртуальный уровень. Их аппаратная часть и логические операции осуществляются в физическом измерении. При этом они могут обеспечивать передачу данных сразу на виртуальный уровень, что можно использовать при моделировании. Рабочее состояние физического объекта будет прогнозироваться с использованием параметров синхронизации, которые затем используются для оптимизации параметров управления системой для реализации комплексной стратегии управления на основе цифрового двойника.

Виртуальный уровень: его ядро является наиболее приближенным отображением физического уровня в меру возможностей программного обеспечения. Он состоит из трехмерного изображения компонентов в системе автоматизированного проектирования, модели электромагнитных полей и расчета динамики ротора по методу конечных элементов. Замкнутая система регулятора АМП задается ПИД-регулятором (пропорционально-

интегрально-дифференцирующим регулятором), фильтром и датчиком положения для получения выходных данных о положении ротора. Виртуальная модель создается на основе рабочих состояний АМП, а обновление параметров для модели цифрового двойника реализуется путем сбора данных о состоянии физического объекта и объединения их с алгоритмом управления, что позволяет виртуальной модели синхронно развиваться с виртуальной моделью.

База данных: этот уровень не имеет физического представления. Данные представляют собой численную информацию и их физическое значение. Его цель – снабдить физические и виртуальные уровни информацией, с которой будут работать их механизмы. Он может быть расположен как локально, так и в облачном хранилище, и включать три различных исходных версии: историческую, режим реального времени и прогнозируемую [5].

Для создания ЦД необходимо применение программно-технологической платформы, имеющей следующие функции [6]:

- управление программным обеспечением компьютерного моделирования;
- сбор, обработка, анализ, визуализация, каталогизация, хранение, передача компьютерных моделей и результатов компьютерного моделирования;
- отслеживание изменений конструкторских, технологических решений и модификации компьютерных моделей и вариантов инженерных расчетов;
- оформление результатов.

Сформированный цифровой двойник сопровождает изделие на всем протяжении его жизненного цикла, расширяя возможности его настройки, оценки состояния и прогнозирования аварийных состояний. Это достигается за счет непрерывного мониторинга АМП: цифровой двойник записывает данные о состоянии, условиях эксплуатации, рабочих параметрах и т.д. Таким образом, ЦД информирует о последних изменениях в работе подшипников. Также виртуальная модель может имитировать условия эксплуатации изделия в различных средах. В результате ЦД сообщает, какое влияние различные параметры окружающей среды и режимы эксплуатации окажут на здоровье, срок службы, производительность и т.д., чтобы контролировать состояние и поведение АМП (например, изменять рабочие параметры системы и характеристики ПИД-регулятора). Основываясь на настоящих показателях АМП и данных о прошлой эксплуатации, ЦД продукта способен точно прогнозировать оставшийся срок службы изделия и вероятность возникновения неисправности [7].

Сложность разработки ЦД для активного магнитного подшипника заключается в необходимости моделирования процессов в подшипниках, системы автоматического управления и динамики ротора агрегата и последующего их совмещения в единую систему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровые двойники играют важную роль в продвижении интеллектуального производства. Они позволяют производителям тестировать изделие до его производства, а также в режиме реального времени сопоставлять физический объект с его цифровым представлением, что открывает путь для интеграции физических объектов в цифровые структуры управления. В сочетании с возможностями точного анализа и прогнозирования больших объемов данных АМП, управляемый цифровым двойником, станет более гибким и прогнозируемым, что будет способствовать более разумному и точному управлению производством.

Учитывая среду взаимодействия цифрового двойника с виртуальной реальностью, алгоритмы интеграции и слияния данных системы, процесса работы, модели и платформы ЦД требуют дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
2. Omer W., Hu Y. Modeling of a Digital Twin for Magnetic Bearings // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. №14. 21 p.

3. **Carpanzano E., Renna P., Kaiblinger A., Woschank M.** State of the Art and Future Directions of Digital Twins for Production Logistics: A Systematic Literature Review // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. №14. 21 p.
4. **Hu Y., Omer W., Yang K.** Fault Detection in Active Magnetic Bearings Using Digital Twin Technology // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. №4. 20 p.
5. **Falekas G., Karlis A.** Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance: State-of-the-Art and Future Prospects // *Energies*. 2021. Vol. 14. №18. 26 p.
6. **ГОСТ Р 57700.37-2021.** Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 16.09.2021 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Изд. официальное. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 10 с.
7. **Qi Q., Tao F.** Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. Pp. 3585–3593.

ОБ АВТОРАХ

ИЛЬЯСОВ Давид Ринатович, бакалавр кафедры технологии машиностроения (УУНИТ, 2024).

ШАРАФУТДИНОВ Шамиль Наильевич, асп. ПИШ «Моторы будущего». Готовит диссертацию о методологии расчета активных магнитных подшипников.

ГЛУМОВ Данил Андреевич, магистр ПИШ «Моторы будущего» (УУНИТ, 2024).

METADATA

Title: AN APPROACH TO THE FORMATION OF A DIGITAL DOUBLE OF AN ACTIVE MAGNETIC BEARING.

Authors: D. R. Ilyasov¹, Sh. N. Sharafutdinov², D. A. Glumov³

Affiliation:

¹ Ufa University of science and technology (UUST), Russia.

Email: ¹david.ilyasov@gmail.com, ²sharshamil98@gmail.com, ³glumov00@gmail.com.

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (32), pp. 47-51, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: Active magnetic bearings (AMP) are used to ensure non-contact rotation of the rotors. Failures in the operation of sensors and AMP control systems lead to accidents and long downtime of equipment. Digital twins (DCS) technology allows you to create and control virtual copies of physical systems in real time. This article discusses an approach to creating digital doubles for AMP.

Key words: active magnetic suspension, magnetic bearing, digital twin, hardware and software modeling.

About authors:

ILYASOV David Rinatovich, Bachelor of Engineering Technology Department (UUST, 2024).

SHARAFUTDINOV Shamil Nailevich, asp. AES "Motors of the future".

GLUMOV Danil Andreevich, master's degree, AES "Motors of the Future" (UUST, 2024).