

УДК 519.876.5

АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

И. А. Еременко, Е. Ю. Сопельник, К. В. Хохлова

Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Эффективное развитие технологий «интернета вещей» требует совершенства систем моделирования и отладки управляемых объектов. Процесс взаимодействия управляющей системы и объекта управления представляет собой программно-аппаратную часть, являющуюся многофакторной структурой. Ключевыми преимуществами данного подхода является существенное сокращение затрат ресурсов при эксплуатации, а также обеспечение максимизации качественных показателей операции. Важным этапом реализации данного механизма является разработка цифровых двойников.

Ключевые слова: цифровой двойник, техническое средство, экономическая эффективность, COMSOL Multiphysics.

ANALYSIS OF TOOLS FOR THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS OF TECHNICAL MEANS IN ASSESSING THEIR ECONOMIC EFFICIENCY

I. A. Eremenko, E. Yu. Sopelnik, K. V. Khokhlova

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The effective development of the Internet of Things technologies requires the improvement of systems for modeling and debugging of managed objects. The process of interaction between the control system and the control object is a software and hardware part, which is a multifactor structure. The key advantages of this approach are a significant reduction in resource costs during operation, as well as ensuring the maximization of the quality indicators of the operation. An important stage in the implementation of this mechanism is the development of digital twins.

Keywords: digital twin, hardware, cost-effectiveness, COMSOL Multiphysics.

Введение. Удельная энергоёмкость технических средств является одним из основных показателей экономической эффективности и целесообразность их использования. Установлено, что существенное влияние на удельную энергоёмкость оказывают конструктивные параметры технической системы [1]. Соответственно, для повышения их эксплуатационной эффективности и минимизации затрат энергии при реализации ими служебного назначения необходимо использовать имитационные методы. Как показал анализ, перспективным инструментом технико-экономической оценки эксплуатации технического средства является использование цифровых двойников [1–3]. Согласно [2–3], цифровой двойник представляет модельную систему, имеющую связь с физическим прототипом, инструментом взаимодействия между которыми являются математические зависимости, характеризующие его состояние в рамках заданных граничных условий. Связь цифровых двойников с эконометрическими показателями эффективности эксплуатации осуществляется через их удельные энергетические затраты, оптимизировать которые можно в программных продуктах, осуществляющих имитационное моделирование. Доказано, что данный подход позволяет повлиять на экономическую эффективность технического средства не только на этапе разработки, но и последующей эксплуатации [1, 4]. Поэтому анализ

инструментов разработки цифровых двойников технических средств при оценке их экономической эффективности является актуальной задачей. На сегодняшний день положительный опыт использования цифровых двойников отмечен в сельском хозяйстве, перерабатывающих и обслуживающих отраслях [5]. На рис. 1 представлена блок-схема места цифрового двойника в системе оценки экономической эффективности операций.

Известно, что существенную долю экологической нагрузки на окружающую среду составляют процессы утилизации отходов агропромышленного комплекса (АПК), в частности сточных вод [6–12]. Соответственно, задача разработки цифровых двойников данных процессов и операций является актуальной. Цель статьи — анализ инструментов разработки цифровых двойников как средства повышения экономической эффективности технических средств (на примере АПК).



Рис. 1. Место цифрового двойника операции в системе оценки экономической эффективности её выполнения

Основная часть. Наиболее существенной составляющей экономической эффективности является удельная энергоёмкость:

$$N_{\text{уд.э}} = \frac{P * t}{Q},$$

где P – затраты электрической энергии, Вт;

t – время, час.;

Q – производительность, т/час.

$$\mathcal{E}_{\text{эф.}} = f(N_{\text{уд.э}}, W),$$

где W – группа параметров, характеризующих качественные свойства.

Условия повышения экономической эффективности:

$$N_{\text{уд.э}} \rightarrow \min;$$

$$W \rightarrow \max.$$

Анализ работ [8–9] позволяет сформулировать несколько компонентов разработки цифровых двойников, представленных на рис. 2. Как показал анализ работ [10–17], разработка

цифрового двойника является сложной многоступенчатой задачей. На рис. 3 представлена структурная схема цифрового двойника.

Существенным образом сократить затраты на разработку и отладку цифрового двойника позволяют имитационные модели. Перспективным инструментом имитационного физического моделирования является программный комплекс COMSOL Multiphysics [15].



Рис. 2. Подходы к разработке цифровых двойников

Преимуществом COMSOL Multiphysics можно назвать параллельное использование в единой удобной среде различных физических принципов, что является определяющим при построении адекватных моделей.

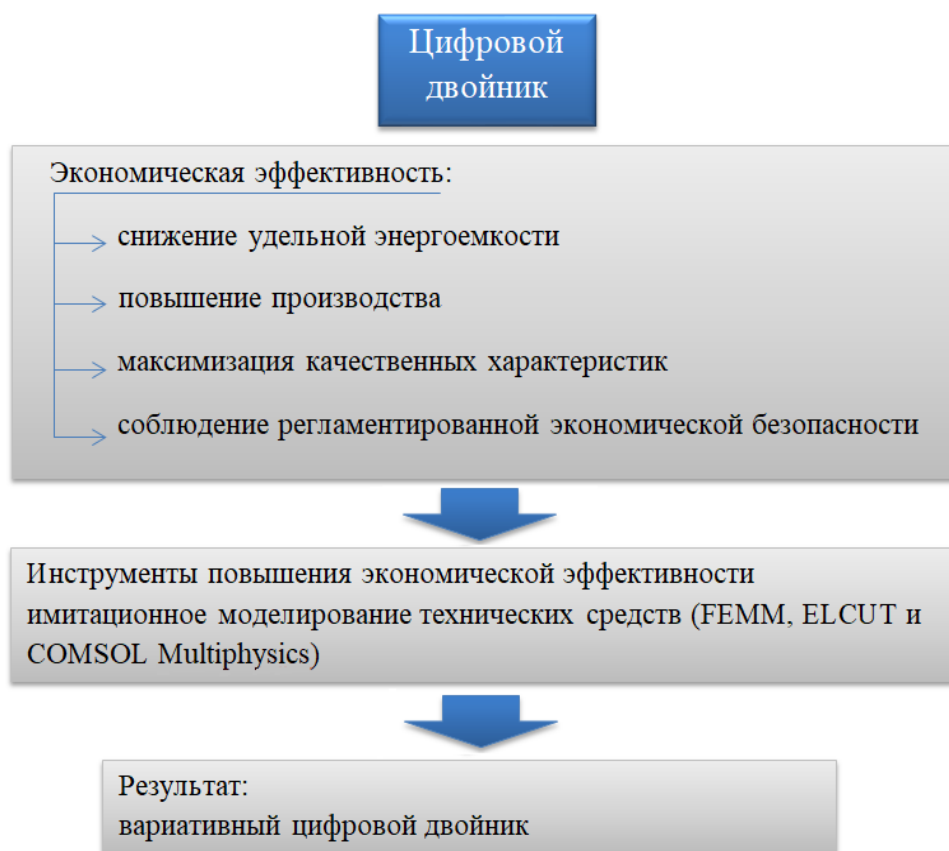


Рис. 3. Структурная схема цифрового двойника с позиции экономической эффективности

Данный программный продукт позволяет решать как прямые задачи, т. е. по заданным входным данным, описывать поведение системы или режим работы устройств, так и обратные задачи, т. е. задачи по определению некоторых неизвестных параметров по известным данным, например эмпирическим.

В пакете COMSOL Multiphysics возможно построить статичную и динамичную модели в двумерном и трехмерном пространстве.

Программный комплекс COMSOL Multiphysics позволяет анализировать и оптимизировать процессы в технических средствах. На рис. 4 представлены цифровые двойники гидромеханических элементов технических средств, стрелочные графики которых отображают параметры текучих сред.

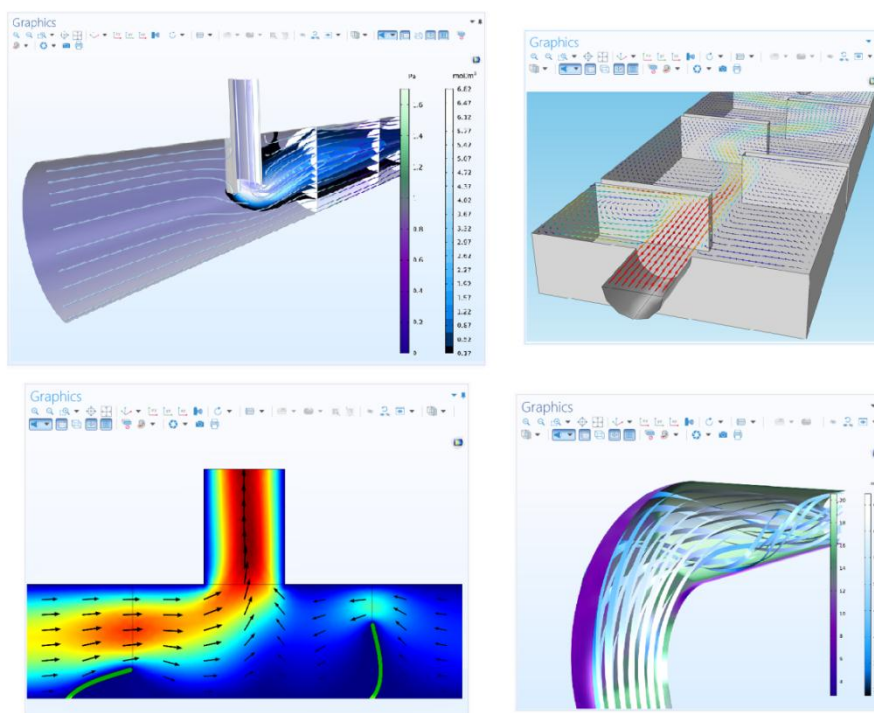


Рис. 4. Цифровые двойники средств АПК

Заключение. Установлено, что с пакетом COMSOL Multiphysics возможно моделирование мультифизических процессов с высокой степенью достоверности, что позволяет использовать его при имитационных испытаниях разрабатываемых технических средств и прогнозировать экономический эффект.

Полученные в ходе исследования результаты представляют собой исходные данные для разработки эконометрических показателей цифровых двойников технических средств.

Библиографический список

1. Шпак, П. С. Вовлечение цифровых двойников в хозяйственный оборот как важнейшая составляющая экономической эффективности работы отечественных предприятий / П. С. Шпак // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2019. — № 30. — С. 111–113.
2. Пономарев, К. С. Цифровой двойник производства — средство цифровизации деятельности организации / К. С. Пономарев, А. Н. Феофанов, Т. Г. Гришина // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. — 2019. — № 2 (4). — С. 11–17.

3. Пономарев, К. С. Цифровой двойник производства как инструмент цифровизации технологических процессов предприятия / К. С. Пономарев, А. Н. Феофанов // Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции ; под общ. ред. Е. П. Ткачевой. — Белгород : Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2018. — С. 141–144.

4. Фюер, Ц. Преимущества «цифрового двойника» / Ц. Фюер, Ц. Вейсманн // CAD/CAM/CAE Observer. — 2017. — 5 (113). — С. 50–53.

5. Юрченко, И. Ф. Становление цифровых платформ мелиоративного водохозяйственного комплекса / И. Ф. Юрченко // Известия НВ АУК. — 2020. — № 1 (57). — С. 380–395.

6. Экосистема утилизации органических отходов животноводства / С. Н. Борычев, И. А. Успенский, И. А. Юхин, Н. В. Лимаренко // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П. А. Костычева. — Рязань. — 2020. — № 4 (48). — С. 83–91.

7. Использование нечеткого моделирования при оценке интенсивности технологий утилизации органических отходов / С. Н. Борычев, Н. В. Лимаренко, Е. А. Ракул [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. — 2021. — № 1 (61) — С. 298–315.

8. Ecological and technological criteria for the efficient utilization of liquid manure / N. V. Vyshov, I A Uspenskiy, I A Yukhin, N V Limarenko // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2020. [10.1088/1755-1315/422/1/012069](https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012069)

9. Лимаренко, Н. В. Создание экологически безопасной технологии утилизации стоков животноводства / Н. В. Лимаренко, В. П. Жаров, Б. Г. Шаповал // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2017) : материалы V Международной научно-практической конференции. — Ростов-на-Дону, 2017. — С. 176–179.

10. Моделирование эпидемиологических свойств бесподстилочного навоза при подготовке физико-химическим обеззараживанием / А. А. Цымбал, И. А. Успенский, И. А. Юхин, Н. В. Лимаренко // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П. А. Костычева. — Рязань. — 2020. — № 3 (47) — С. 89–97.

11. Проектирование и управление цифровизованной автономной системой электроснабжения / Б. Ч. Месхи, Н. И. Цыгулев, Р. А. Амерханов [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. — 2021. — № 2 (130). — С. 57–62.

12. Обеспечение безопасной эксплуатации транспортных тоннелей на основе прогнозного моделирования интенсивных геомеханических процессов / Б. Ч. Месхи, М. С. Плешко, И. В. Войнов, Ж. Ж. З. Кайшау // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — № 8. — С. 86–96.

13. Сазонов, А. А. Анализ системы разработки цифровых двойников на основе компонентов цифровой платформы CML-BENCH / А. А. Сазонов // Управление инновационно-инвестиционной деятельностью: к 80-летию юбилею профессора Ю. П. Анисимова : сб. материалов Всероссийской юбилейной научно-практической конференции. — Воронеж. — 2019. — С. 132–139.

14. Салимов, М. С. Трехмерная интегральная модель сухого трения для движения прямоугольного корпуса / М. С. Салимов, И. В. Меркурьев // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 1. — С. 14–21. — [10.23947/2687-1653-2021-21-1-14-21](https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-1-14-21)

15. Хохлова, К. В. Анализ инструментов моделирования энергетических характеристик электрических аппаратов / К. В. Хохлова // Молодой исследователь Дона. — 2021. — № 2 (29). — С. 64–67.

16. Павлевич, А. Л. Эффективная платформа прикладных исследований и всестороннего численного моделирования на основе решений ANSYS / А. Л. Павлевич, Н. Н. Староверов, Д. П. Хитрых // CAD/CAM/CAE Observer. — 2018. — № 4. — С. 70–75.

17. Лаврентьев, А. А. Моделирование электромагнитных характеристик индуктора электрического вихревого аппарата в среде COMSOL Multiphysics / А. А. Лаврентьев, Н. В. Лимаренко, К. В. Хохлова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2021. — Т. 64, № 3. — С. 12–17.

Об авторах:

Еременко Игорь Анатольевич, заведующий кафедрой «Экономика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат экономических наук, доцент, soig64@mail.ru

Сопельник Екатерина Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Экономика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), katya_sopelnik@mail.ru

Хохлова Кристина Владимировна, студентка кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), cristy2020@yandex.ru

About the Authors:

Eremenko, Igor A., Head, Economics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Cand.Sci., Associate Professor, soig64@mail.ru

Sopelnik, Ekaterina Yu., Senior Lecturer, Economics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), katya_sopelnik@mail.ru

Khokhlova, Kristina V., Student, Economics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), cristy2020@yandex.ru