

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО РОБОТА

М. А. Щербаков¹, Н. В. Азарнов², С. Д. Кашицын³, А. П. Кушнир⁴, А. М. Володина⁵

^{1,2,3} Научно-производственное предприятие «Исток» имени Шокина, Фрязино, Московская обл., Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет (филиал в г. Фрязино), Фрязино, Московская обл., Россия

^{4,5} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹ mashcherbakov@istokmw.ru, ² nvazarnov@istokmw.ru, ³ sedkashitsyn@istokmw.ru,

⁴ 89169521579@ya.ru, ⁵ akholopova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современное производство развивается в соответствии с шестью направлениями Индустрии 4.0. Рассмотрены два из них – PLM (Product Lifecycle Management) и Smart Factory как концепции, которые неразрывно связаны с понятием «цифровой двойник». Актуальность данной технологии, как показано в работе, обусловлена важностью цифровой трансформации в отрасли логистики и ее влиянием на конкурентные преимущества перед другими предприятиями. Целью работы является прогнозирование параметров состояния мобильного робота на основе формирования информационных связей между цифровым двойником и физическим объектом. *Материалы и методы.* Исследования основываются на взаимодействии MES/APS систем (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) в сочетании с IIoT (Industrial Internet of Things), мобильными роботами, а также методами динамического моделирования. *Результаты.* Разработаны имитационные модели приводов мобильного промышленного робота, предложены алгоритмы взаимодействия между цифровым двойником и физическим объектом. *Выводы.* Предложенный способ интеллектуального управления и мониторинга позволяет повысить надежность работы MES-системы на основе прогнозирования параметрических отказов мобильного робота.

Ключевые слова: цифровое производство, цифровой двойник, интернет вещей, автономный робот, логистика, привод, аккумуляторная батарея, старение, мониторинг, SimInTech, CALS-технологии

Для цитирования: Щербаков М. А., Азарнов Н. В., Кашицын С. Д., Кушнир А. П., Володина А. М. Цифровой двойник мобильного транспортного робота // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 52–66. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-7

THE DIGITAL TWIN OF A MOBILE TRANSPORT ROBOT

M.A. Shcherbakov¹, N.V. Azarnov², S.D. Kashitsyn³, A.P. Kushnir⁴, A.M. Volodina⁵

^{1,2,3} Research and Production Enterprise "Istok" named after A.I. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russia

³ MIREA – Russian Technological University (Fryazino branch), Fryazino, Moscow region, Russia

^{4,5} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹ mashcherbakov@istokmw.ru, ² nvazarnov@istokmw.ru, ³ sedkashitsyn@istokmw.ru,

⁴ 89169521579@ya.ru, ⁵ akholopova@mail.ru

Abstract. *Background.* Modern production is developing in accordance with the six directions of Industry 4.0. This article discusses two of them – PLM (Product Lifecycle Management) and Smart Factory as concepts that are inextricably linked with the concept of «digital twin». The relevance of this technology, as shown in, is due to the importance of digital transformation in the logistics industry and its impact on competitive advantages over other enterprises. The purpose of the work is to predict the parameters of the state of a mobile robot based on the formation of information links between a digital twin and a physical object. *Materials and methods.* The research is based on the interaction of MES/APS systems (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) in combination with IIoT (Industrial Internet of Things), mobile robots, as well as dynamic modeling methods. *Results.* Simulation models of mobile industrial robot drives have been developed, and algorithms for interaction between a digital twin and a physical object have been proposed. *Conclusions.* The proposed method of intelligent control and monitoring makes it possible to increase the reliability of the MES system based on predicting parametric failures of a mobile robot.

Keywords: digital production, digital twin, Internet of Things, autonomous robot, logistics, drive, battery, aging, monitoring, SimInTech, CALS technologies

For citation: Shcherbakov M.A., Azarnov N.V., Kashitsyn S.D., Kushnir A.P., Volodina A.M. The digital twin of a mobile transport robot. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):52–66. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-7

Введение

Среди приоритетных направлений стратегии научно-технологического развития Российской Федерации особое внимание уделяется развитию информационно-телекоммуникационных систем и робототехнических комплексов, что подчеркивает их значимость в рамках приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ. В данном контексте актуальной задачей является разработка и внедрение цифровых двойников мобильных роботов, которые играют ключевую роль в цифровизации производства [1, 2].

Цифровые двойники мобильных роботов позволяют создавать автономные транспортные системы, обеспечивающие повышение эффективности производственных процессов за счет внедрения новых методов и средств механизации, автоматизации, роботизации и цифровизации. Это способствует снижению трудоемкости, повышению производительности и экономичности производства, а также решению задач, связанных с обеспечением надежности и экологической безопасности окружающей среды. Таким образом, развитие технологий цифровых двойников мобильных роботов является важным шагом на пути к созданию интеллектуальных производственных систем нового поколения.

Под объектом исследования будем предполагать логистические внутрицеховые операции. В качестве предмета исследования принят мобильный транспортный робот с установленным на нем коботом, исследование создания которого проводится в рамках развития «Передовой инженерной школы СВЧ-электроники» на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Разработка модели

Одной из важнейших функций MES-системы является мониторинг технологических процессов и оборудования, в частности, мобильного транспортного робота [3–5]. Модель взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом (мобильным транспортным роботом) с учетом концепции PLM может быть представлена в виде структурной схемы, приведенной на рис. 1.

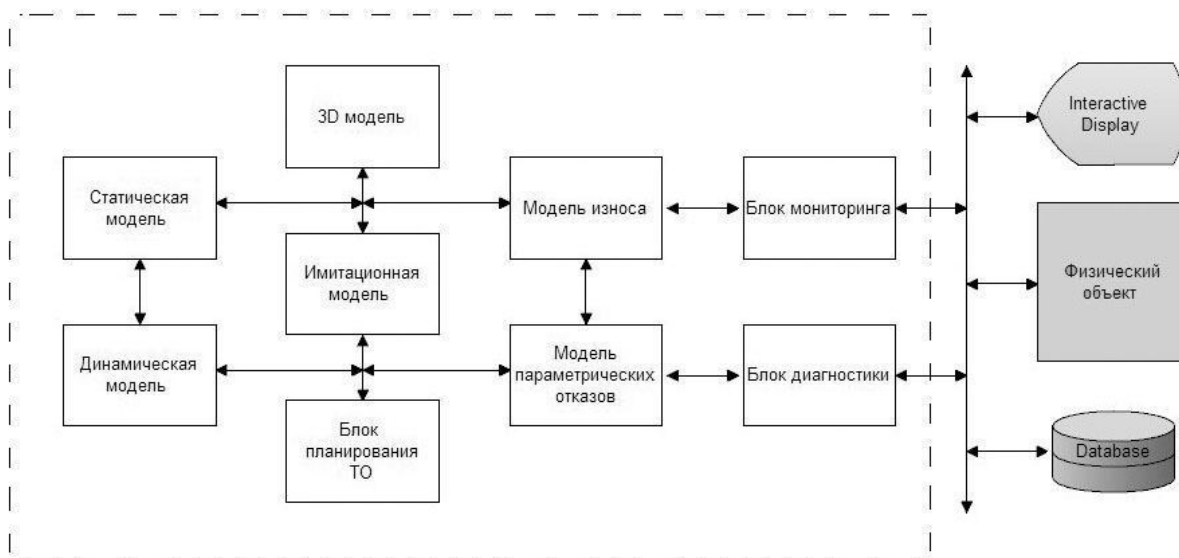


Рис. 1. Модель взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом

Особенностью данной модели является применение CALS-технологий (*Continuous Acquisition and Life cycle Support*), т.е. управление логистическим процессом с учетом жизненного цикла изделия. В этой связи данная модель может быть использована для прогнозирования состояния мобильного робота на основе взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом.

Исходя из намеченной цели, для формирования виртуального объекта были сформулированы следующие задачи:

- 1) построение имитационной модели цифрового двойника мобильного робота;
- 2) разработка модели отказа;
- 3) разработка информационной модели взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом.

Рассмотрим более подробно первую задачу. Для ее решения необходимо проанализировать особенности конструкции мобильного робота и, в первую очередь, определить типы приводов.

Для управления роботами применяют практически все известные типы приводов. Относительно дешевым, простым и надежным является пневматический привод, нашедший применение среди серийно выпускаемых роботов в объеме 20...30 %. По данным работы [6], «эти приводы плохо управляемы и поэтому используются в основном как нерегулируемые с цикловым управлением. Пневматические приводы характеризуются высокими скоростями перемещений элементов робота, поэтому для снижения скорости в роботах с цикловым управлением применяются демпферы». На самом деле это не так. Пневматические приводы не обязательно имеют высокие скорости перемещения и могут быть настроены практически на любую скорость (вплоть по «ползучей») даже в разомкнутых системах управления. Кроме того, пневмоприводы можно достаточно просто регулировать как по скорости, так и по положению на основе следящих систем с обратной связью. Не совсем верным является также утверждение, что для снижения высоких скоростей в роботах с цикловым управлением применяют демпферы. Для снижения скорости в пневмосистемах обычно используют дроссели и другие регулирующие клапаны, а демпферы служат лишь для торможения штока, причем только в конце рабочего хода [7, 8].

Примерно одна треть всех промышленных роботов оснащена гидравлическими приводами. Данные системы хоть и являются более сложными и дорогими по сравнению с пневматическими и электрическими, однако они обладают наилучшими массогабаритными характеристиками, способны развивать практически неограниченные усилия и крутящие моменты, поэтому являются основным типом привода для тяжелых и сверхтяжелых роботов [9, 10]. Гидравлические приводы хорошо управляются, поэтому они также нашли применение в роботах средней грузоподъемности, для которых требуются высококачественные динамические характеристики [11, 12].

Наибольшее распространение в приводах роботов (40...50 %) получил электрический привод как переменного [13], так и постоянного тока благодаря хорошей управляемости, простоте подвода энергии, высокому КПД и удобстве эксплуатации [14].

В промышленных роботах нашли применение электроприводы, в которых используют двигатели постоянного тока – традиционные коллекторные и бесколлекторные (вентильные), асинхронные двигатели (как нерегулируемые, так и с частотным управлением), шаговые двигатели, электромагниты (соленоиды и др.) [15–18].

С учетом того, что предметом исследования является мобильный транспортный робот [19], можно ограничить число возможных типов приводов, которые могут быть использованы в устройствах данного назначения. В частности, применение пневмо- и гидропривода в мобильных устройствах хоть и является теоретически возможным, но, с точки зрения практической реализации, является нежелательным вследствие значительного усложнения конструкции, так как этот способ требует наличия автономной системы подачи сжатого воздуха или масла под избыточным давлением в каждом автономном роботе.

Использование асинхронных или синхронных приводов в мобильных роботах также является технически сложным из-за того, что для их работы необходим высоковольтный источник переменного тока. Существуют драйверы шаговых двигателей с питанием от постоянного тока, однако сами шаговые двигатели (ШД) не могут быть использованы в качестве силового привода из-за невысокой развиваемой мощности. Выпускаемые серийно силовые ШД обычно комплектуются гидравлическими усилителями, что делает затруднительным их использование в составе мобильных роботов [20–22].

Таким образом, наиболее подходящим приводом мобильных роботов (в том числе комплексов, состоящих из мобильного транспортного робота с установленным на нем манипуляционным коботом) является привод постоянного тока, питание которого осуществляют от бортовой аккумуляторной батареи (АБ) (рис. 2).

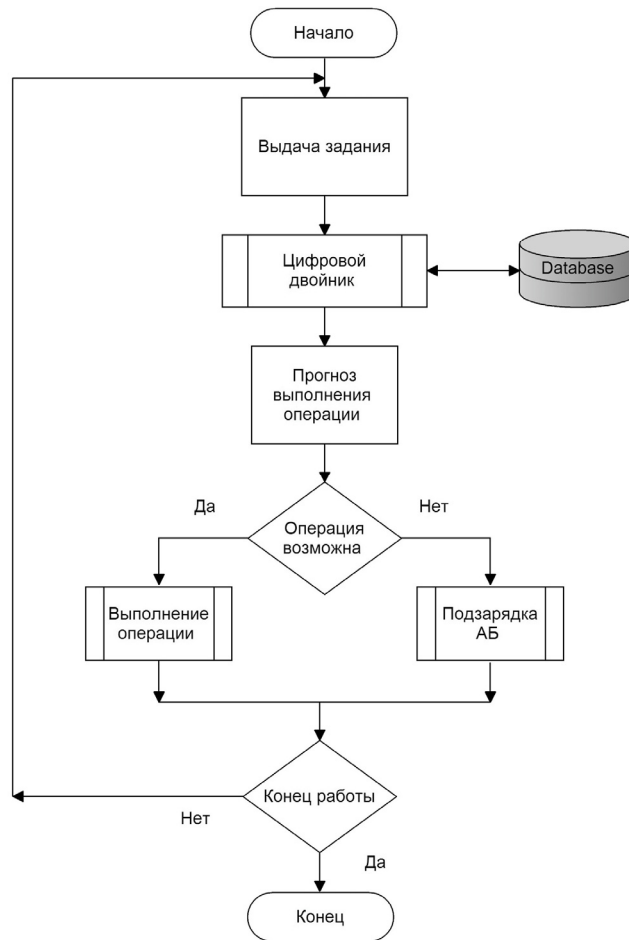


Рис. 4. Блок-схема алгоритма взаимодействия цифрового двойника с мобильным роботом

Рассчитать теоретически изменение емкости АБ при выполнении технологической логистической операции можно на основе затрат энергии, требуемой на перемещение мобильного робота и манипуляций кобота с грузом, однако данный расчет будет слишком неточным. Это объясняется тем, что при работе привода постоянного тока имеют место существенные потери энергии в процессе пуска двигателей, которые трудно учесть аналитически. В такие моменты пусковые токи могут на порядок превышать их номинальные значения, что, несомненно, сказывается на текущей емкости АБ. Поэтому для более точных расчетов необходимо разработать имитационную модель привода [26].

Модель привода постоянного тока (в системе СИ) может быть представлена системой уравнений в операторной форме [27]:

$$\begin{cases} \langle u_B \rangle = T_B s \langle i_B \rangle + \langle i_B \rangle = (T_B s + 1) \langle i_B \rangle, \\ \langle u_A \rangle = (T_A s + 1) \langle i_A \rangle + \langle \omega \rangle \langle \Phi \rangle, \\ \langle \Phi \rangle = k \langle i_B \rangle, \\ s T_m \langle \omega \rangle = \langle i_A \rangle \langle \Phi \rangle - \langle M_H \rangle, \end{cases} \quad (2)$$

где u_B – напряжение на обмотке возбуждения двигателя; L_B – индуктивность цепи обмотки возбуждения; i_B – ток обмотки возбуждения; r_B – активное сопротивление цепи обмотки возбуждения; u_A – напряжение на якорной обмотке двигателя; L_A – индуктивность якорной цепи; i_A – ток якоря; r_A – активное сопротивление цепи якоря; e_A – электродвижущая сила (ЭДС) якоря; k_e – коэффициент связи между скоростью и ЭДС; Φ – поток, создаваемый обмоткой возбуждения; k – коэффициент связи между током и потоком возбуждения; ω – скорость вращения вала двигателя; M – электромагнитный момент двигателя; M_H – момент сопротивления движению (момент нагрузки); J – суммарный (приведенный) момент инерции якоря и нагрузки; k_m – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом; $T_B = L_B / r_B$ – постоянная времени обмотки возбуждения; $T_A = L_A / r_A$ – постоянная времени цепи якоря; s – оператор Лапласа.

Система уравнений представлена в форме безразмерных параметров $\langle \rangle$, представляющих собой отношение абсолютной величины к номинальной, например:

$$\langle i_a \rangle = i_a / i_{a \text{ ном.}}$$

С точки зрения модели, входными воздействиями являются напряжения в цепях якоря и обмотки возбуждения, а также момент сопротивления движению (момент нагрузки). К независимым входным параметрам можно отнести также постоянные времени, значения которых определяется типоразмером привода и его конструктивными особенностями. К выходным переменным относятся электромагнитный момент двигателя и скорость вращения вала двигателя (ротора), а к параметрам состояния – переменные, определяющие токи в цепях якоря и обмотки возбуждения. Остальные коэффициенты, входящие в состав уравнений, являются параметрами, численные значения которых необходимо задать при проведении расчета.

Модель привода постоянного тока независимого возбуждения может быть реализована разными способами, например, в системе Matlab-Simulink как на элементах библиотеки Simulink (рис. 5), так и с использованием SimPowerSystems (библиотека Machines) (рис. 6).

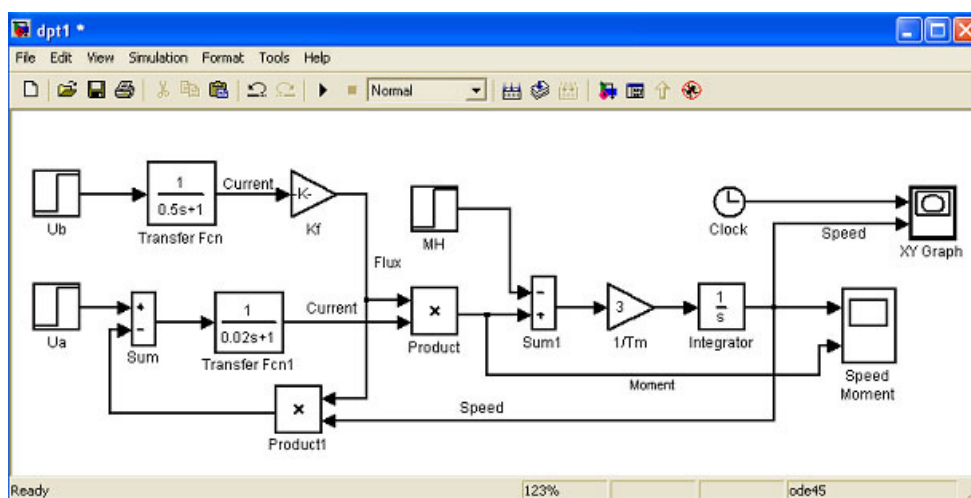


Рис. 5. Модель привода постоянного тока независимого возбуждения, построенная на элементах библиотеки Simulink: *current* – ток в цепи якоря; *speed* – угловая скорость ротора; *moment* – электромагнитный момент, развиваемый двигателем; *MH* – приведенный момент нагрузки; *Ub* – напряжение на обмотке возбуждения; *Ua* – напряжение на обмотке якоря; *Flux* – магнитный поток

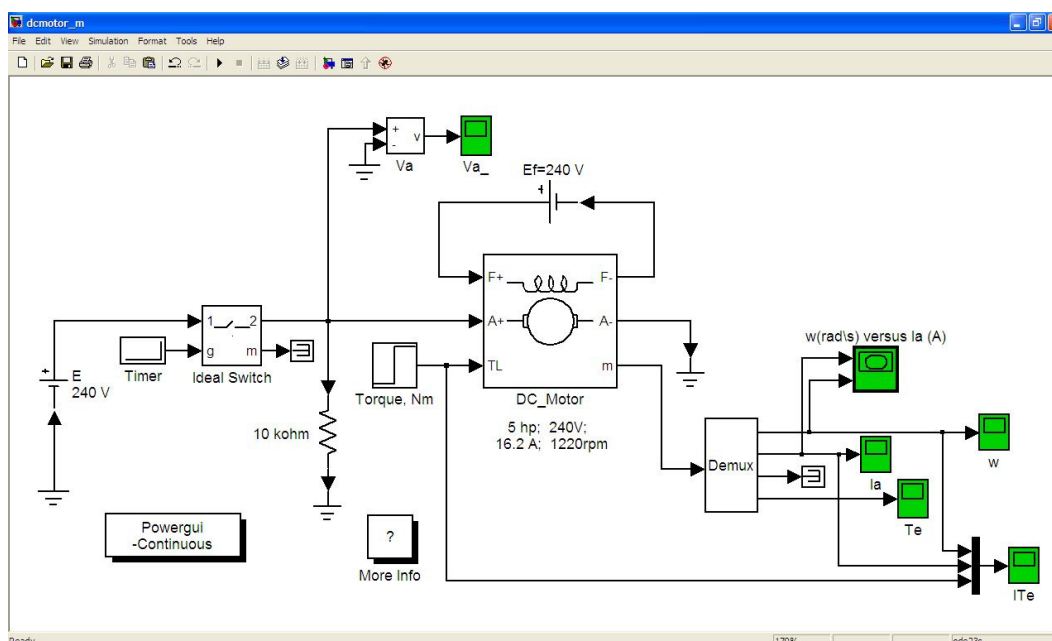


Рис. 6. Модель привода постоянного тока независимого возбуждения, построенная на элементах библиотеки SimPowerSystems

Результаты моделирования скорости и тока якоря привода постоянного тока независимого возбуждения от времени показаны на рис. 7, 8.

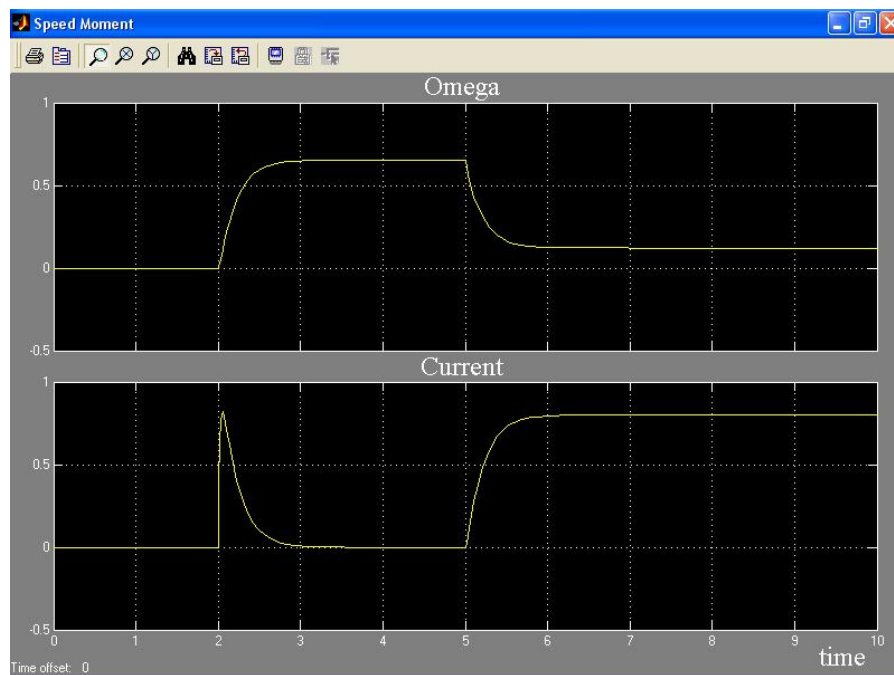


Рис. 7. Зависимость скорости (*omega*) и тока якоря (*current*) привода постоянного тока независимого возбуждения от времени модели Simulink

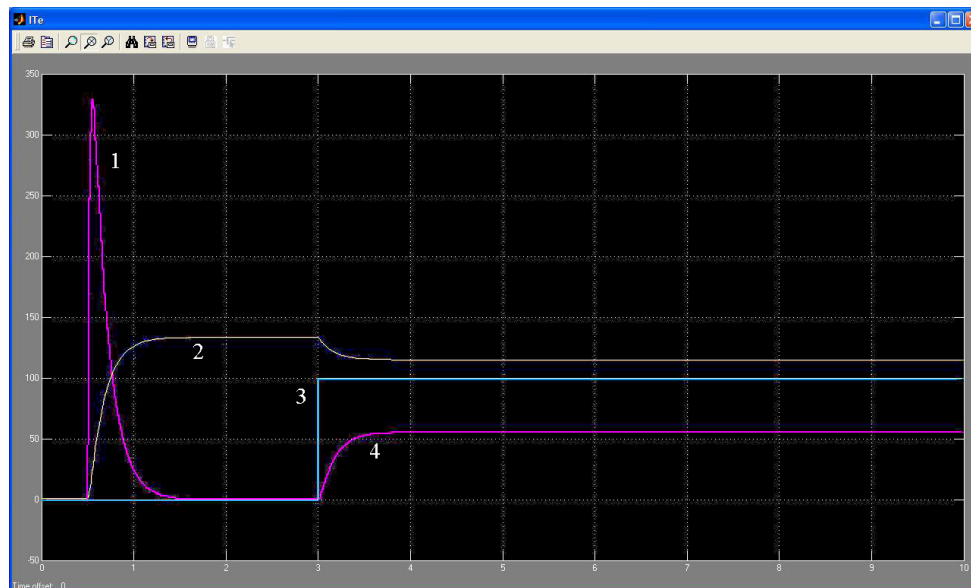


Рис. 8. Зависимость параметров привода модели SimPowerSystems от времени:

1 – пусковой ток якоря; 2 – угловая скорость ротора;
3 – приведенный момент нагрузки; 4 – ток якоря при нагрузке

Достаточно широкое распространение в последнее время получили приводы постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов на редкоземельных металлах [28]. Данный тип двигателей является более дорогим, но имеет более высокий КПД и меньшую инерционность по сравнению с двигателями с обмотками возбуждения [29]. Система уравнений (1) в этом случае может быть упрощена и представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \langle u_a \rangle = (T_a s + 1) \langle i_a \rangle + \langle \omega \rangle \langle \Phi \rangle, \\ \langle \Phi \rangle = k, \\ s T_m \langle \omega \rangle = \langle i_a \rangle \langle \Phi \rangle - \langle M_n \rangle. \end{cases} \quad (3)$$

Схемы привода постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов в Simulink и в отечественной среде динамического моделирования Simintech, полученная на основе системы уравнений (3), показаны на рис. 9, 10 соответственно.

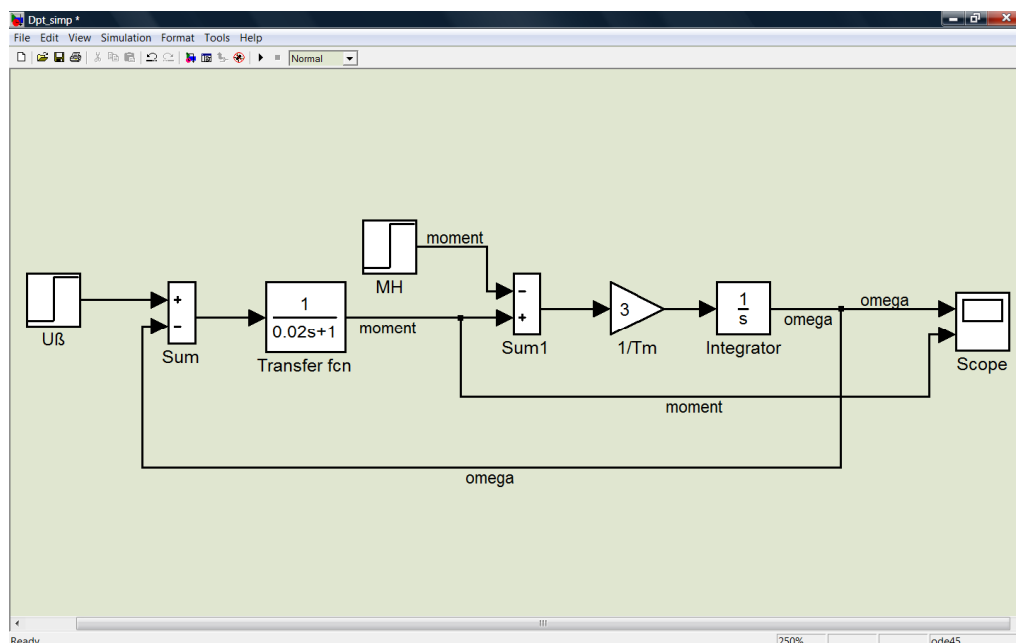


Рис. 9. Модель привода постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов в системе Matlab-Simulink

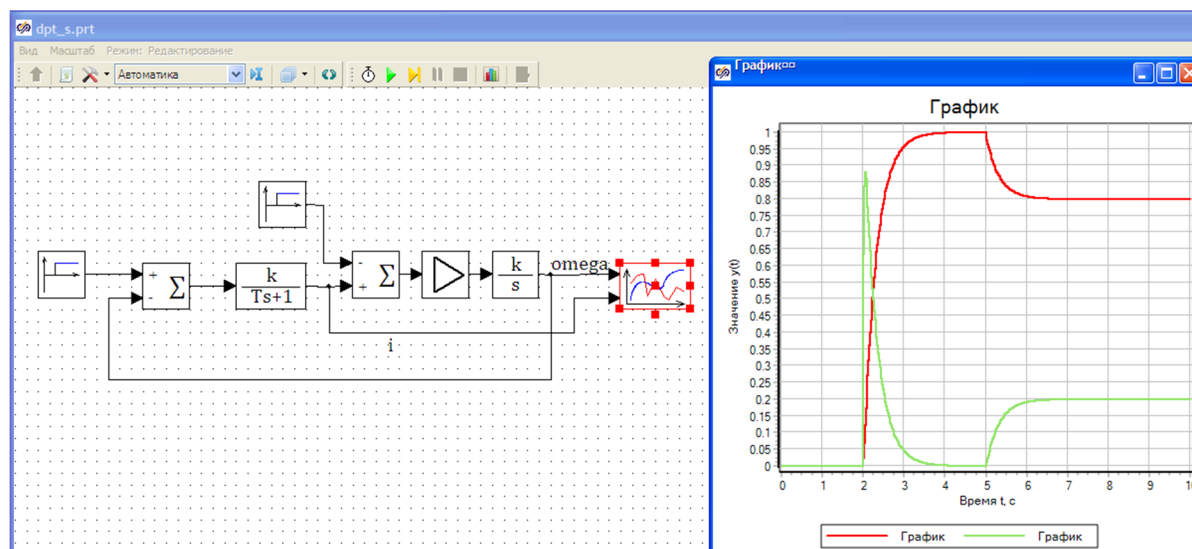


Рис. 10. Результаты моделирования по току якоря и крутящему моменту привода с постоянными магнитами

Как следует из рис. 10, результаты моделирования по току якоря и крутящему моменту привода с постоянными магнитами аналогичны результатам, приведенным на рис. 7, 8 для привода с независимой обмоткой возбуждения.

Для снижения пиковых значений пусковых токов в мощных силовых приводах часто применяют ступенчатый пуск. Моделирование привода постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов в системе SimInTech с использованием ступенчатого пуска приведено на рис. 11.

Результаты моделирования показывают, что для получения точных оценочных данных по затратам энергии необходима интегрированная оценка изменения тока якоря от времени.

Модель, приведенная на рис. 12, позволяет прогнозировать нагрузку АБ в зависимости от заданного закона изменения приведенного крутящего момента нагрузки (рис. 13).

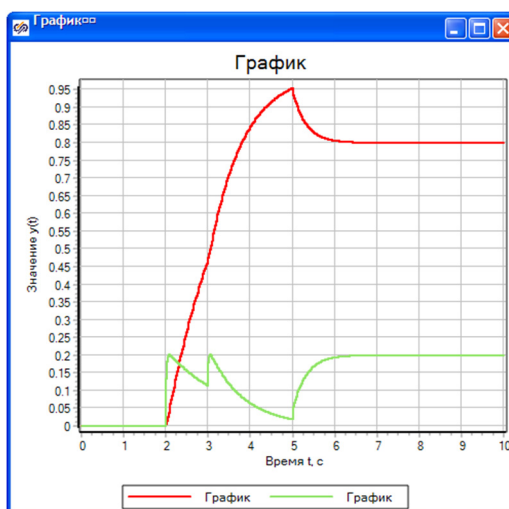


Рис. 11. Моделирование угловой скорости и тока якоря привода постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов в системе SimInTech при ступенчатом пуске

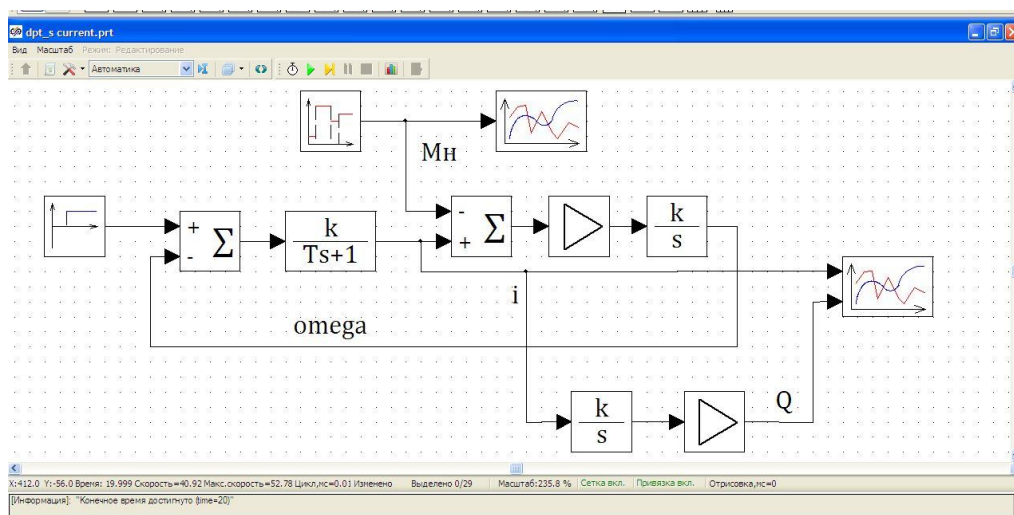


Рис. 12. Имитационная модель привода с программируемой нагрузкой и интегрированной оценкой тока якоря от времени

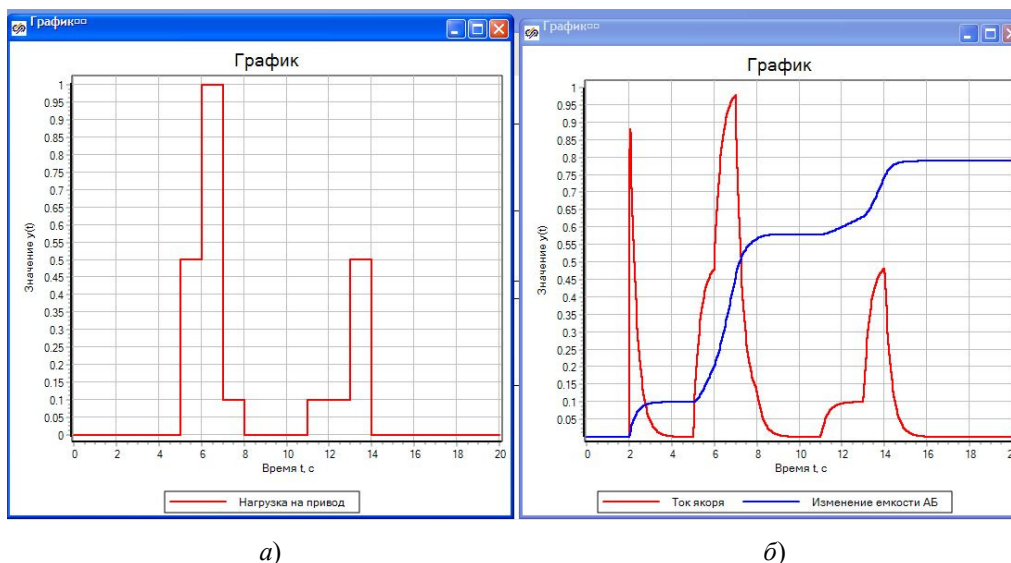


Рис. 13. Результаты моделирования привода постоянного тока при переменной нагрузке: а – приведенный крутящий момент нагрузки; б – график тока якоря и изменения емкости АБ

Для решения третьей задачи были разработаны информационные модели взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом.

Для промышленных автоматизированных систем, в которых используют такой широко распространенный стандарт, как OPC UA, был предложен инструментарий для сбора и интеграции технологической информации, получаемой от оборудования полевого уровня, в автоматизированную систему верхнего уровня путем агрегации данных и стандартизированного обмена данными для последующего анализа и обработки [30]. Программа, написанная на языке GO, позволяет организовать единое информационное пространство предприятия. Функционал разработанной программы обеспечивает создание клиента OPC UA, настройку и подключение к серверу, получение и обработку структуры хранения от OPC UA сервера, формирование подписки на изменение значений требуемых элементов структуры хранения, передачу полученных клиентом данных в специальный канал хранения.

Для получения, обработки, хранения и оценки технологической информации в режиме мягкого реального времени, обеспечения гибкости и масштабируемости в управлении данными может быть использован программный модуль, написанный на языке Lua [31].

Функционал модуля позволяет получать данные из различных источников, динамически создавать таблицы, функции и методы API, что обеспечивает конфигурирование технологического процесса, а также хранение и управление конфигурациями подключения к серверам, хранение метаданных технологических процессов на основе Дублинского ядра с использованием нормативно-справочной документации, осуществление унификации и анализ технологических данных.

Для создания клиента OPC UA сервера предлагается использовать функцию «SetupOPCUAConnection», алгоритм работы которой представлен на рис. 14. Для ее выполнения необходимо учитывать следующие входные параметры: «endpoint» (тип: строка): url, на котором работает OPC UA сервер необходимого технологического процесса.

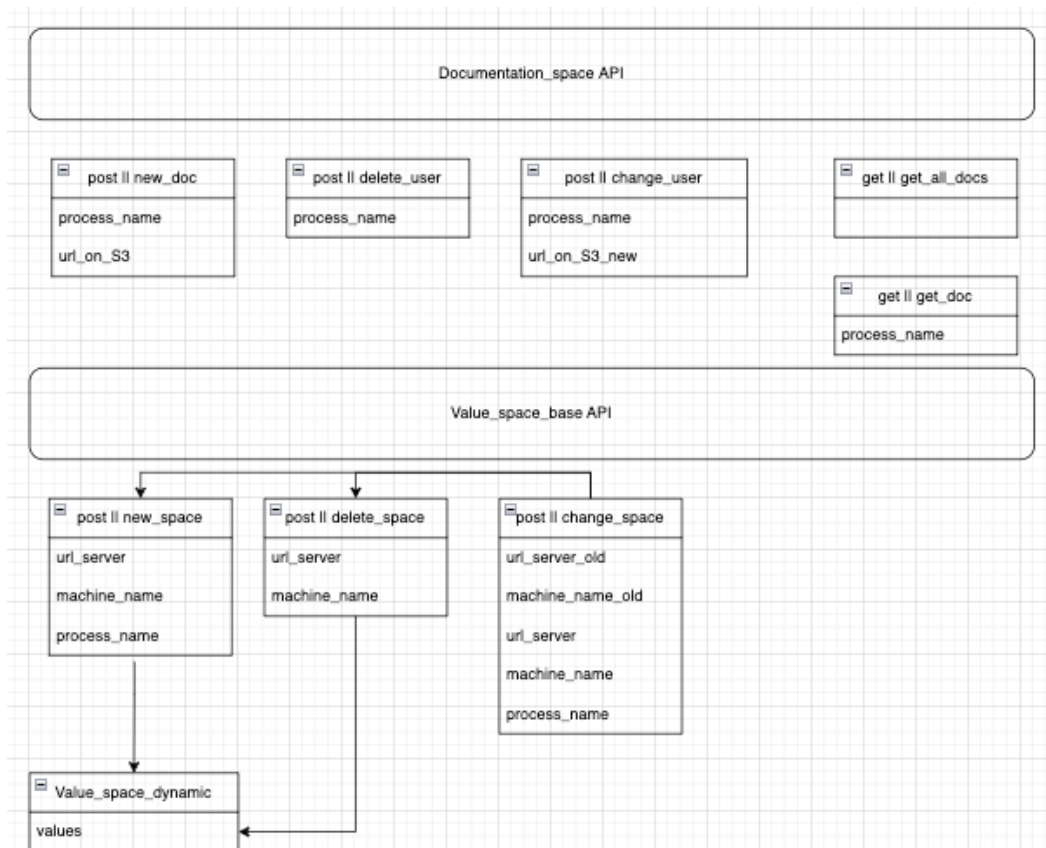


Рис. 14. Схема API по работе с динамическими таблицами и документацией

Логика работы состоит из следующих шагов:

- 1) инициализация переменных, необходимых для подключения к OPC UA серверу;
- 2) получение доступных url;

- 3) получение url подключения по текущим параметрам;
- 4) инициализация параметров подключения для создания клиента;
- 5) создание клиента OPC UA сервера;
- 6) подключение к OPC UA серверу;
- 7) функция возвращает клиента для работы с OPC UA сервером.

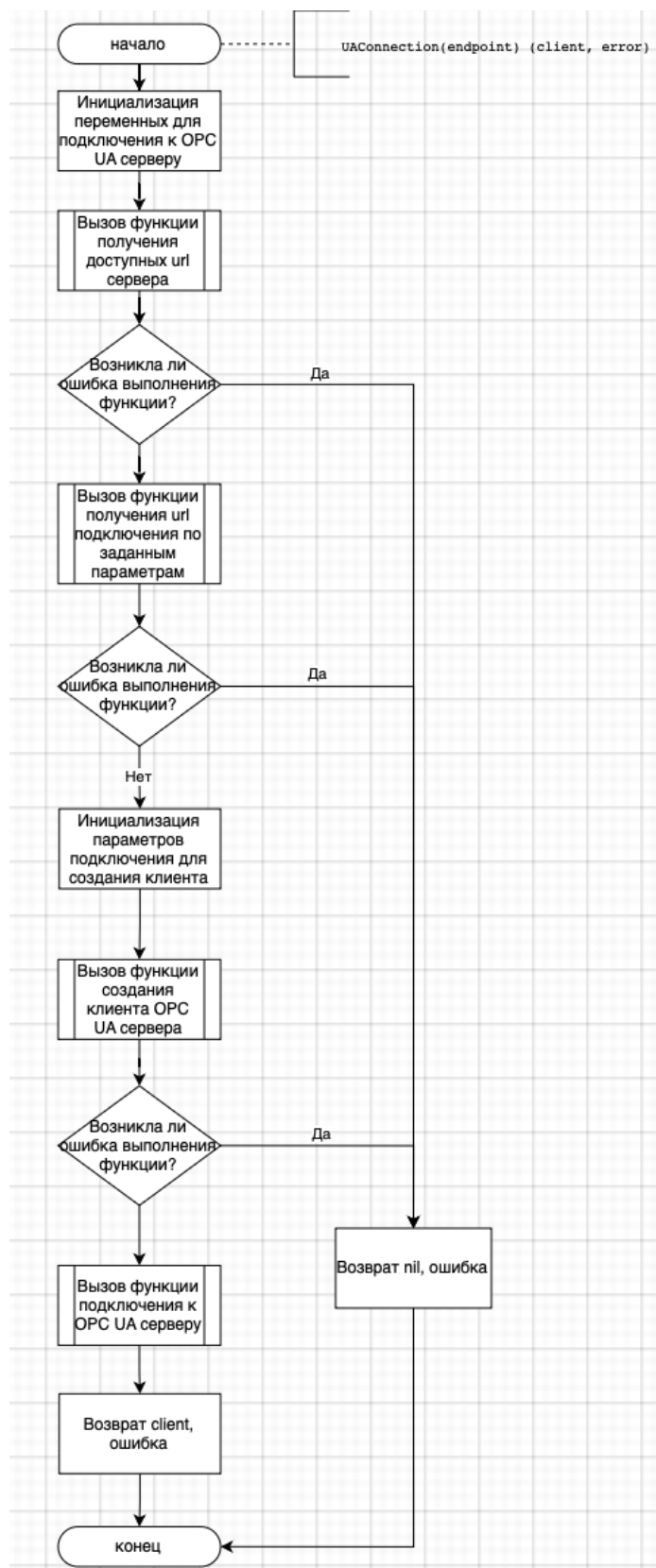


Рис. 15. Алгоритм функции «SetupOPCUAConnection»

Заключение

Результаты работы демонстрируют, что использование цифрового двойника позволяет повысить надежность работы MES-системы за счет прогнозирования параметрических отказов, таких как снижение емкости аккумуляторной батареи. Предложенная модель взаимодействия цифрового двойника с физическим объектом, основанная на концепции PLM и CALS-технологиях, обеспечивает эффективное управление жизненным циклом мобильного робота и позволяет прогнозировать его состояние в реальном времени.

Разработанные алгоритмы и модели, реализованные в средах Matlab-Simulink и SimInTech, позволяют точно оценивать энергопотребление робота и прогнозировать его работоспособность в зависимости от текущего состояния аккумуляторной батареи. Это особенно важно для предотвращения остановки робота в процессе выполнения технологических операций из-за разрядки батареи.

Кроме того, предложенные решения по интеграции данных через OPC UA и использование программных модулей на языках GO и Lua обеспечивают гибкость и масштабируемость системы управления, что делает ее применимой в различных промышленных автоматизированных системах.

Список литературы

1. Кушнир А. П. Система мониторинга динамических параметров станков с ЧПУ // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения : сб. тез. Междунар. науч. конф., посвящ. 85-летию Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН / под ред. акад. Р. Ф. Ганиева. М. : ИМАШ РАН, 2023. 262 с.
2. Калинина Е. Цифровая трансформация в логистике: технология цифрового двойника // Technoeconomics. 2024. Vol. 3, № 3. Р. 48–56. doi: <https://doi.org/10.57809/2024.3.3.10.5>
3. Паршина И. С., Фролов Е. Б. Разработка цифрового двойника производственной системы на базе современных цифровых технологий // Russian Journal of Industrial Economics. 2020. Vol. 13, № 1. doi: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34
4. Пат. РФ RU 2 680 755 C2. МПК G06F 15/16 (2006.01). Диспетчерская информационно-аналитическая система / Кушнир А. П., Холопов В. А., Каширская Е. Н. № 2017128646 ; заявл. 25.10.2018 ; опубл. 26.02.2019, Бюл. № 6.
5. Пат. RU 2 685 484 C1 МПК G05B 13/02 (2006.01). Киберфизическая система мониторинга высокотехнологичного оборудования / Кушнир А. П. № 2018137868 ; заявл. 26.10.2018 ; опубл. 18.04.2019, Бюл. № 11.
6. Классификация приводов роботов. URL: <https://helpiks.org/4-72330.html?ysclid=m6m3jsauk961621196>
7. Кушнир А. П. Пневматические производственные системы : учеб. пособие. М. : РТУ МИРЭА, 2019. 78 с.
8. Филатов А. М., Точилкин В. В. Пневмопривод и пневмоавтоматика подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин : учеб. пособие для вузов. Магнитогорск : МГТУ, 2006. 187 с.
9. Автоматизация технологических процессов. Приводы промышленных роботов : справочник. URL: https://spravochnik.ru/avtomatizaciya_tehnologicheskikh_processov/privody_promyshlennyh_robotov/?ysclid=m6lyb8ynis540685849
10. Кушнир А. П. Цифровой двойник героторного мотора // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : сб. ст. VIII Междунар. науч. конф. (г. Москва, 19–21 ноября 2024 г.). М. : ИМАШ РАН, 2024.
11. Москвин В. К., Кузнецов П. М., Феофанов А. Н. Повышение точности позиционирования гидропривода промышленного робота // Технология машиностроения. 2020. № 8. С. 46–49.
12. Баранов А. В. Гидро- и пневмопривод в автоматизированном производстве : учеб. пособие для вузов. Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. 172 с.
13. Слепцов В. В., Мостовской М. В., Малышев И. Ю. [и др.]. Информационно-измерительная и управляющая система электропривода промышленных роботов-манипуляторов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4. С. 5–15. doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-1
14. Махмуд Бассам Юнес. Совершенствование электроприводов роботов на основе фаззи – регуляторов и нейронных сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : Московский энергетический институт, 2008.
15. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб. : БХВ-Петербург, 2018. 284 с.
16. Бугров Ю. Н., Кушнир А. П., Киселев Д. С., Ву Хоанг Занг. Схемотехнический анализ широтно-импульсных и фазовых преобразователей в цифровых устройствах // Инновационные технологии в электронике и приборостроении : сб. докл. рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. М. : РТУ МИРЭА, 2021. Т. 2. С. 178–183.

17. Кушнир А. П., Ву Хоанг Занг. Автоматизация системы частотного управления на базе PLC и SCADA // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 7. С. 11–17.
18. Автоматизированный электропривод, робототехника и электроэнергетика : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию юбилею кафедры электропривода ЛГТУ. Липецк : ЛГТУ, 2024. 352 с.
19. Полтавский А. В., Григорьев А. В., Мельничук А. И., Избасов А. Г., Рыбаков И. М. Оптимизация моделей объектов информационно-измерительных и управляющих систем мобильных роботов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 28–38. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-4
20. CNC-технологии. URL: <https://cnc-tehnologi.ru/odnokanalnye-drajvery-shd/2dm556>
21. Шаговый привод. URL: <https://stepmotor.ru/catalog/shagovyi-privod>
22. Гибридные двигатели. URL: <https://electroprivod.ru/hybrid.htm>
23. Щуров Н. И., Дедов С. И., Штанг А. А. [и др.]. Моделирование процессов деградации литиевого аккумулятора самосвала с электрическим приводом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 10-1. С. 76–90.
24. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Орлов В. П., Артемова С. В. Теоретическая оценка метрологических характеристик информационно-измерительных и управляющих систем электропривода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 5–16. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1
25. Михайлов Е. А., Мищенко В. И., Пермяков А. П. Анализ существующих подходов к обоснованию срока службы метрологических комплексов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 40–45. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5
26. Урваев И. Н., Базыкин С. Н. Имитационное моделирование гидродинамических параметров подводного безэкипажного аппарата // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 58–67. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-7
27. Кушнир А. П. Киберфизические системы. М. : РТУ МИРЭА, 2023. 64 с.
28. Пат. RU 2 605 945 C1, МПК H02K 23/66. Устройство двигателя постоянного тока повышенной мощности с возбуждением от постоянных магнитов и электронной коммутацией коллекторных пластин / Дегтярев В. Б., Ширококов И. Н. № 2015135718 ; заявл. 24.08.2015 ; опубл. 10.01.2017.
29. Основы робототехники. Приводы промышленных роботов. URL: https://de.donstu.ru/CDO-Courses/AI/rabot_i_mehatr/206/lection4.html
30. А.с. Модуль сбора технологических данных на основе технологии OPC UA / Володина А. М., Черешнев Н. С. № 2024619795 ; опубл. 26.04.2024, Бюл. № 5.
31. А.с. Модуль управления и анализа технологической информации промышленных автоматизированных систем / Володина А. М., Левковец А. В. № 2024618580 ; опубл. 15.04.2024, Бюл. № 4.

References

1. Kushnir A.P. Monitoring system of dynamic parameters of CNC machines. *Mashiny, tekhnologii i materialy dlya sovremennogo mashinostroeniya: sb. tez. Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 85-letiyu Instituta mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN = Machines, technologies and materials for modern engineering : collection of technical data. International Scientific Conference, dedicated to 85th anniversary of the Blagonravov Institute of Machine Science of the RAS.* Moscow: IMASH RAN, 2023:262. (In Russ.)
2. Kalinina E. Digital transformation in logistics: technology of a digital twin. *Technoeconomics.* 2024;3(3):48–56. (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.57809/2024.3.3.10.5>
3. Parshina I.S., Frolov E.B. Development of a digital twin of a production system based on modern digital technologies. *Russian Journal of Industrial Economics.* 2020;13(1). (In Russ.). doi: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34
4. Pat. Russian Federation RU 2 680 755 C2. MPK G06F 15/16 (2006.01). Dispatching information and analytical system. Kushnir A.P., Kholopov V.A., Kashirskaya E.N. № 2017128646; appl. 25.10.2018; publ. 26.02.2019, Bull. № 6. (In Russ.)
5. Pat. RU 2 685 484 C1 MPK G05B 13/02 (2006.01). Cyberphysical monitoring system for high-tech equipment. Kushnir A.P. № 2018137868; appl. 26.10.2018; publ. 18.04.2019, Bull. № 11. (In Russ.)
6. *Klassifikatsiya privodov robotov = Classification of robot drives.* (In Russ.). Available at: <https://helpiks.org/4-72330.html?ysclid=m6m3jsauk961621196>
7. Kushnir A.P. *Pnevmaticheskie proizvodstvennyye sistemy: ucheb. posobie = Pneumatic production systems: textbook.* Moscow: RTU MIREA, 2019:78. (In Russ.)
8. Filatov A.M., Tochilkin V.V. *Pnevmoprivod i pnevmootomatika pod"emno-transportnykh, stroitel'nykh i dorozhnykh mashin: ucheb. posobie dlya vuzov = Pneumatic drive and pneumatic automation of lifting, transport, construction and road vehicles: textbook for universities.* Magnitogorsk: MGUTU, 2006:187. (In Russ.)
9. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov. Privody promyshlennykh robotov: spravochnik = Automation of technological processes. Industrial robot drives: reference book.* (In Russ.). Available at: https://spravochnik.ru/avtomatizatsiya_tekhnologicheskikh_processov/privody_promyshlennykh_robotov/?ysclid=m6lyb8ynis540685849

10. Kushnir A.P. Digital twin of a gerotor motor. *Fundamental'nye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: sb. st. VIII Mezhdunar. nauch. konf. (g. Moskva, 19–21 noyabrya 2024 g.) = Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering : collection of Articles VIII International Scientific Conference (Moscow, November 19–21, 2024)*. Moscow: IMASh RAN, 2024. (In Russ.)
11. Moskvina V.K., Kuznetsov P.M., Feofanov A.N. Improving the positioning accuracy of an industrial robot hydraulic drive. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Technology of mechanical engineering*. 2020;(8):46–49. (In Russ.)
12. Baranov A.V. *Gidro- i pnevmoprivod v avtomatizirovannom proizvodstve: ucheb. posobie dlya vuzov = Hydraulic and pneumatic drive in automated production: textbook for universities*. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2024:172. (In Russ.)
13. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V., Malyshev I.Yu. et al. Information-measuring and control system of electric drive of industrial robot manipulators. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(4):5–15. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-4-1
14. Makhmud Bassam Yunes. Improvement of electric drives of robots based on fuzzy controllers and neural networks: PhD abstract. Moscow: Moskovskiy energeticheskiy institut, 2008. (In Russ.)
15. Yurevich E.I. *Osnovy robototekhniki = Fundamentals of robotics*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2018:284. (In Russ.)
16. Bugrov Yu.N., Kushnir A.P., Kiselev D.S., Vu Khoang Zang. Circuit engineering analysis of pulse width and phase converters in digital devices. *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sb. dokl. ross. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem = Innovative technologies in electronics and instrument engineering : collection of reports of the Russian scientific and technical conference with international participation*. Moscow: RTU MIREA, 2021;2:178–183. (In Russ.)
17. Kushnir A.P., Vu Khoang Zang. Automation of PLC and SCADA-based frequency control systems. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial automated control systems and controllers*. 2021;(7):11–17. (In Russ.)
18. *Avtomatizirovanny elektroprirod, robototekhnika i elektroenergetika: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 50-letnemu yubileyu kafedry elektropriroda LGTU = Automated electric drive, robotics and electric power industry : collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 50th anniversary of the LGTU Electric Drive Department*. Lipetsk: LGTU, 2024:352. (In Russ.)
19. Poltavskiy A.V., Grigor'ev A.V., Mel'nichuk A.I., Izbasov A.G., Rybakov I.M. Optimization of models of objects of information-measuring and control systems of mobile robots. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(2):28–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-4
20. *CNC-tehnologii = CNC technology*. (In Russ.). Available at: <https://cnc-tehnologi.ru/odnokanalnye-drajvery-shd/2dm556>
21. *Shagovyy privod = Stepper drive*. (In Russ.). Available at: <https://stepmotor.ru/catalog/shagovyi-privod>
22. *Gibridnye dvigateli = Hybrid engines*. (In Russ.). Available at: <https://electroprirod.ru/hybrid.htm>
23. Shchurov N.I., Dedov S.I., Shtang A.A. et al. Modeling of the degradation processes of a lithium battery of an electric dump truck. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and Analytical Bulletin*. 2023;(10-1):76–90. (In Russ.)
24. Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Orlov V.P., Artemova S.V. Theoretical assessment of metrological characteristics of information-measuring and control systems of electric drive. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(1):5–16. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1
25. Mikhaylov E.A., Mishchenko V.I., Permyakov A.P. Analysis of existing approaches to substantiating the service life of metrological complexes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;(4):40–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-5
26. Urvaev I.N., Bazykin S.N. Simulation of hydrodynamic parameters of an underwater unmanned vehicle. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;(4):58–67. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-7
27. Kushnir A.P. *Kiberfizicheskie sistemy = Cyberphysical systems*. Moscow: RTU MIREA, 2023:64. (In Russ.)
28. Pat. RU 2 605 945 C1, MPK H02K 23/66. The device of a high-power DC motor with excitation from permanent magnets and electronic switching of collector plates. Degtyarev V.B., Shirobokov I.N. № 2015135718; appl. 24.08.2015; publ. 10.01.2017. (In Russ.)
29. *Osnovy robototekhniki. Privody promyshlennykh robotov = Fundamentals of robotics. Industrial robot drives*. (In Russ.). Available at: https://de.donstu.ru/CDOCourses/AII/rabot_i_mehatr/206/lection4.html
30. A.s. Technological data collection module based on OPC UA technology. Volodina A.M., Chereshev N.S. № 2024619795; publ. 26.04.2024, Bull. № 5. (In Russ.)
31. A.s. Module of control and analysis of technological information of industrial automated systems. Volodina A.M., Levkovets A.V. № 2024618580; publ. 15.04.2024, Bull. № 4. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Максим Александрович Щербakov**

заместитель директора по цифровой трансформации,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: mashcherbakov@istokmw.ru

Maksim A. Shcherbakov

Deputy director of digital transformation,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Никита Владимирович Азарнов

инженер,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: nvazarnov@istokmw.ru

Nikita V. Azarnov

Engineer,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Сергей Дмитриевич Кашицын

администратор проектов,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а);
преподаватель,
МИРЭА – Российский технологический университет
(филиал в г. Фрязино)
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: sedkashitsyn@istokmw.ru

Sergey D. Kashitsyn

Project administrator,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia);
lecturer,
MIREA – Russian Technological University
(Fryazino branch)
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Александр Петрович Кушнир

кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленной информатики,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: 89169521579@ya.ru

Aleksandr P. Kushnir

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of industrial informatics,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Анна Михайловна Володина

старший преподаватель
кафедры промышленной информатики,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: akholopova@mail.ru

Anna M. Volodina

Senior lecturer of the sub-department
of industrial informatics,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.04.2025

Принята к публикации / Accepted 13.05.2025