

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.046

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-31-50

Моделирование с использованием цифрового двойника для оценки остаточного ресурса электродвигателя на основе интеграции физической модели и данных эксплуатации*

М.Д. ГЛАДЫШЕВ^{1,a}, А.А. ХАНОВА^{2,b}

¹ РФ, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева

² РФ, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет

^a glad.mi@yandex.ru ^b akhanova@mail.ru

В настоящее время наблюдается активное развитие мобильной робототехники, что обусловлено повышением требований к надежности исполнительных механизмов, в частности к малогабаритным электродвигателям, которые используются в робототехнических комплексах. Существующие математические модели и различные алгоритмы, позволяющие провести оценку остаточного ресурса привода, работают неполноценно и неэффективно с точки зрения адекватности предсказаний срока службы для каждого элемента, входящего в состав электропривода. Для оценки существующих подходов проведен анализ как отечественных, так и зарубежных моделей цифровых двойников электродвигателей. Изучены математические модели цифровых двойников электродвигателей, позволяющие провести оценку остаточного ресурса. Ключевая задача – построение улучшенной системы, которая позволит оценить остаточный ресурс электродвигателя в режиме реального времени, а также выявить наиболее нагруженные узлы в зависимости от различных режимов эксплуатации. Экспериментальная часть работы включает тестирование системы предсказания остаточного ресурса. По результатам работы предлагаемая система показала работоспособность и в дальнейшем может быть использована в других проектах. В ходе исследования получены корректные результаты с точки зрения физических законов работы электродвигателя. Построена комплексная математическая модель, учитывающая закономерности всех деталей и узлов, входящих в состав привода. Получены оценки значений по их остаточному ресурсу в зависимости от режима работы. На заключительном этапе работы получены данные для дальнейшего масштабирования исследования и доработки имеющейся системы.

Ключевые слова: имитационная модель, остаточный ресурс, электропривод, надежность, цифровой двойник, принятие решений, техническое обслуживание, прогнозирование, алгоритмическое обеспечение, обработка информации, системный анализ

* Статья получена 06 февраля 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

Электродвигатели в настоящее время привлекают значительное внимание из-за способности генерировать механическую энергию без выброса опасных компонентов в окружающую среду [1]. Электродвигатели с постоянными магнитами ценятся за высокую плотность крутящего момента и эффективность [2, 3]. Электрическая энергия преобразуется в механическую через возникающий крутящий момент на роторе двигателя. Она необходима для работы различных вращающихся механизмов в промышленных условиях. В робототехнических системах часто возникают неисправности, приводящие к нестабильности и потенциальному повреждению электродвигателей. Неизбежны неисправности, связанные с дисбалансом ротора, из-за ошибок производственного процесса, которые также связаны с трудностями заводских электродвигателей [4, 5]. Эти эффекты могут привести к дисбалансу, сильной вибрации и повреждению внутренних деталей и узлов электродвигателя и сопутствующих элементов системы [6–8]. Непрерывный мониторинг состояния необходим для поддержания безопасности электродвигателя, так как при сильном дисбалансе может произойти значительное повреждение [9–11]. Поэтому задача повышения надежности и предсказания срока работы является актуальной. При этом сформировалось понимание того, что тематика цифровых двойников и цифрового моделирования [12, 13] требует разработки инструментов непрерывного мониторинга для предсказания остаточного ресурса в реальных условиях эксплуатации.

В статье рассматриваются особенности имитационного моделирования щеточных двигателей постоянного тока, а также конструктивные особенности, влияющие на алгоритм расчета. Для точного определения ресурса работы и расчета максимального времени работоспособности необходимо учитывать конструктивные индивидуальные особенности, режим работы и влияние окружающей среды. Представлена разработка цифрового двойника, объединяющего математическую модель из Simulink и 3D-визуализацию в Unity, с калибровкой и верификацией для различных режимов нагружения. Приведены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие распределение ресурса между ротором, зубчатыми передачами, втулками и щеточным узлом в номинальном, пусковом и тормозном режимах.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования является процесс деградации деталей и узлов, входящих в состав электродвигателя, применяемого в проектах малой робототехники. Предметом исследования является цифровой двойник электродвигателя для оценки остаточного ресурса с целью принятия решения о техническом обслуживании. Основная задача – разработка и верификация методики и алгоритма построения цифрового двойника, обеспечивающего учет деградации отдельных узлов на основе физических законов износа, интеграцию математической модели со средой трехмерной визуализации для отображения степени износа в реальном времени, количественную оценку влияния различных режимов работы на остаточный режим электродвигателя.

Научная новизна отличается переходом от обобщенной оценки остаточного ресурса всего электропривода к поэлементному анализу деградации и интеграцией имитационной модели ресурсов электродвигателя с высокоуровневой визуализацией, позволяющей оператору интуитивно оценить критические состояния без анализа числовых массивов данных. Цифровой двойник может быть внедрен в системы управления малых робототехнических комплексов для перехода от регламентного к предиктивному обслуживанию. Это позволит повысить надежность и снизить простой оборудования, а также должен быть масштабируемым и иметь возможность адаптации для других типов малогабаритных электродвигателей.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для расчета остаточного ресурса работы электродвигателя составлена математическая модель, описывающая электромеханические переходные процессы в системе уравнений первого порядка. Рассмотрены щеточные двигатели постоянного тока, так как этот тип привода актуален для задач управления малой или микроробототехникой. Электрическая часть представлена уравнением якорной цепи с учетом противоЭДС:

$$U(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E(t), \quad (1)$$

$$E(t) = K_e w_m(t), \quad (2)$$

где $U(t)$ – входное напряжение (В); $R_a = 154$ – сопротивление якоря (Ом); $L_a = 11,2$ – индуктивность (мГн); $I_a(t)$ – ток, проходящий через якорь (А); $E(t)$ – противоЭДС (В); $K_e = 0,015$ – константа противоЭДС (В); $w_m(t)$ – угловая скорость ротора (рад/с).

Механическая часть моделируется через баланс моментов:

$$J_r \frac{dw_m(t)}{dt} = M_e(t) - M_L(t), \quad (3)$$

$$M_e(t) = K_t I_a(t), \quad (4)$$

где $J_r \approx 9,1 \cdot 10^{-6}$ – момент инерции ротора ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$); $M_e(t)$ – электромагнитный момент нагрузки от редуктора; $M_L(t)$ – внешний момент нагрузки от редуктора ($\text{Н} \cdot \text{м}$); $K_t \approx 0,015$ – моментная константа ($\text{Н} \cdot \text{м}/\text{А}$).

Электрическую схему в Simulink можно представить в качестве функции первого порядка:

$$\frac{w_m(s)}{U(s)} = \frac{K_u}{Ts + 1}, \quad (5)$$

где $K_u \approx 45$ – коэффициент усиления по скорости (рад/с/В); $T = 0,1$ – константа времени (с).

Во многих электроприводах используются редукторы. Обычно они представляют двух-, трех- или четырехступенчатые передачи. В соответствии с передаточным числом ступени коэффициент i для конкретной ступени принят равным: $i_1 = 2,8$, $i_2 = 3,2$, $i_3 = 2,38$, $i_{\text{общее}} = 21,3$. Момент M_k на выходе редуктора для k -й ступени можно рассчитать по формуле

$$M_k = M_e \prod_{j=1}^k i_j n_j, \quad (6)$$

где n_j – КПД ступени (95 %); $k = 1, 2, 3$ – ступени редуктора; M_1, M_2, \dots, M_6 – моменты каждой шестерни (Н·м).

Ресурс зубчатых пар рассчитывается по квадратичной зависимости скорости износа от контактных нагрузок:

$$\frac{dD_k}{dt} = c_{gk} |M_k(t)|^2, \quad (7)$$

где $D_k(t)$ – накопленный ущерб шестерни (до 100 %); c_{gk} – коэффициент износа (экспериментально подбираемый для заданного случая). Тогда остаточный ресурс можно вычислить так:

$$R_k(t) = 100(1 - D_k(t)). \quad (8)$$

Для втулок и подшипников, задействованных в модели, ресурс вычисляется по формуле усталостного разрушения:

$$\frac{dD_{bk}}{dt} = c_{bk} |F_{bk}(t)|^3, \quad (9)$$

$$F_{bk} = \frac{K_{bk} M_k}{r_k}, \quad (10)$$

где F_{bk} – эквивалентная радиальная нагрузка (Н); r_k – радиус вала (м); K_{bk} – коэффициент распределения нагрузки.

Для щеток электродвигателя износ пропорционален квадрату тока, проходящего через якорь:

$$I_a(t) = \frac{U(t) - K_e w_m(t)}{R_a}, \quad (11)$$

$$\frac{dD_b}{dt} = c_b I_a^2(t). \quad (12)$$

Вышеуказанные коэффициенты c_{gk} , c_{bk} , c_b подобраны экспериментально по принципу соответствия типичному ресурсу для аналогичных режимов работы до 2000 часов непрерывной работы в номинальном режиме работы для электродвигателя [16, 17]. Следует учитывать влияние температуры, которая приводит к деградации лака обмоток ротора. В простом варианте температуру ротора можно описать таким образом:

$$C_{mw}(t) = \left(I^2 R_a + P_{meh} \right) - \frac{T(t) - T_{amb}}{R_{th}}, \quad (13)$$

где C_{mw} – теплоемкость обмотки (Дж/К); $I^2 R$ – выделяемое тепло, возникающее в роторе (Вт); P_{meh} – выделяемое тепло от механических факторов (Вт); $T(t)$ – температура ротора, зависящая от времени ($^{\circ}\text{C}$); T_{amb} – температура окружающей среды для эксперимента, принята равной 25°C ; R_{th} – тепловое сопротивление окружающей среды ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$); R_a – значение сопротивления обмотки при комнатной температуре, принято равным 154 Ом . При работе обмотка нагревается, и сопротивление меди можно описать следующей зависимостью:

$$R_a(t) = R_a [1 + a_{cu}(T - 25)], \quad (14)$$

где $a_{cu} \approx 0,0039$ – температурный коэффициент ($1/^{\circ}\text{C}$); R_a – базовое сопротивление, равное 154 Ом ; T – текущая температура ротора ($^{\circ}\text{C}$) [18].

На основе рассмотренной математической модели разработана методика расчета остаточного ресурса электродвигателя. Методика обеспечивает точность и достоверность данных, получаемых при работе цифрового двойника. Рассмотрим последовательно этапы и алгоритм методики расчета остаточного ресурса электродвигателя (рис. 1).

Этап 1 – ввод данных: вносятся параметры исследуемого электропривода (напряжение, условия и режимы работы).

Этап 2 – проверка и основной расчет: оценивается полнота предоставленных данных, указываются дополнительные узлы и модули, входящие в состав электродвигателя (редукторы, датчики и др.). Происходит расчет скорости вращения ротора, силы тока, выделяемого тепла и дополнительных параметров, влияющих на различные детали и модули.

Этап 3 – расчет узлов: собраны основные данные по работе электродвигателя, и алгоритм приступает к расчету состояния дополнительных узлов и элементов (шестеренок, втулок, валов, щеток и др.). При неполноте данных или их отсутствии требуется дозаполнить недостающие поля вручную. Далее происходит расчет остаточного ресурса дополнительных узлов.

Этап 4 – подведение итогов расчета: после получения данных о работе для элементов и узлов, входящих в состав электродвигателя, алгоритм визуализирует данные построением графиков с указанием общего ресурса работы. Также формируется единый вектор состояния по всем элементам. В таком виде с данными проще работать в дальнейшем.

Этап 5 – визуализация: сформированный вектор состояния передается через локальный порт в программу визуализации (в данном случае это среда разработки Unity). Также предварительно импортируется 3D-модель электродвигателя и формируется управляющий скрипт с привязкой к отдельным деталям. Получив вектор состояния через локальный порт, Unity запускает сцену, визуализируя достоверную и отлаженную математическую модель. Это позволяет в режиме реального времени на конкретных цифровых объектах отслеживать деградацию узлов и учитывать это в работе механизмов.

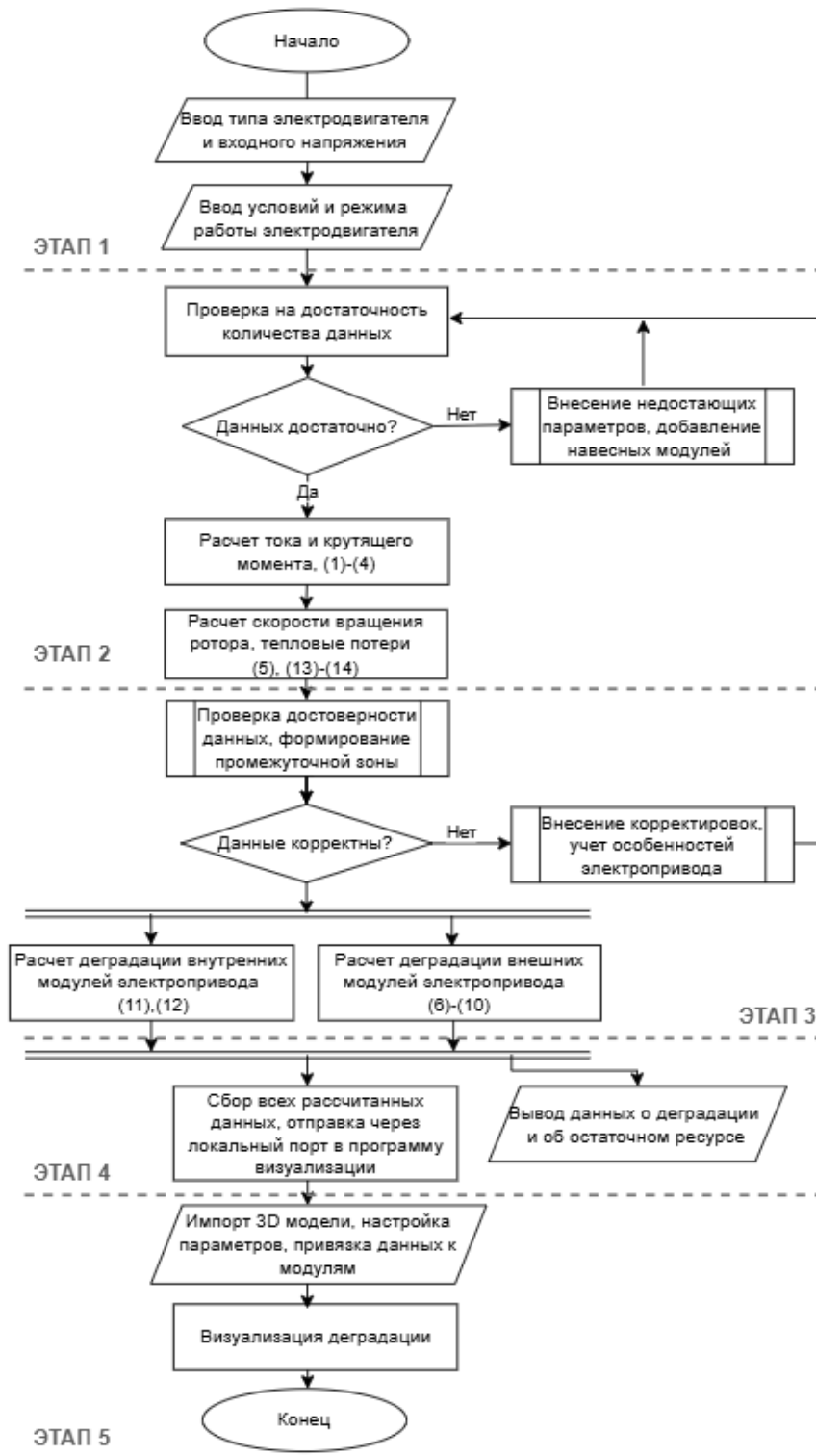


Рис. 1. Блок-схема методики расчета остаточного ресурса

Fig. 1. Block diagram of the residual life calculation method

За основу взят щеточный двигатель постоянного тока с редуктором модели 33GB-520-18.7, так как аналогичный тип электродвигателей используется в малом мобильном робототехническом комплексе, на базе которого проводится основное исследование (рис. 2, 3). Электродвигатель широко распространен и применяется во многих проектах, связанных с созданием робототехнических платформ. Номинальное напряжение питания составляет 6...12 В, ток холостого хода ~100 мА, частота вращения без редуктора около 7500 об/мин, индуктивность обмотки якоря 11,2 мГн, сопротивление якоря 154 Ом. Редуктор обеспечивает выходную скорость около 350 об/мин, крутящий момент на валу ~0,2 Н·м при токе 500 мА, масса мотор-редуктора около 100 г.

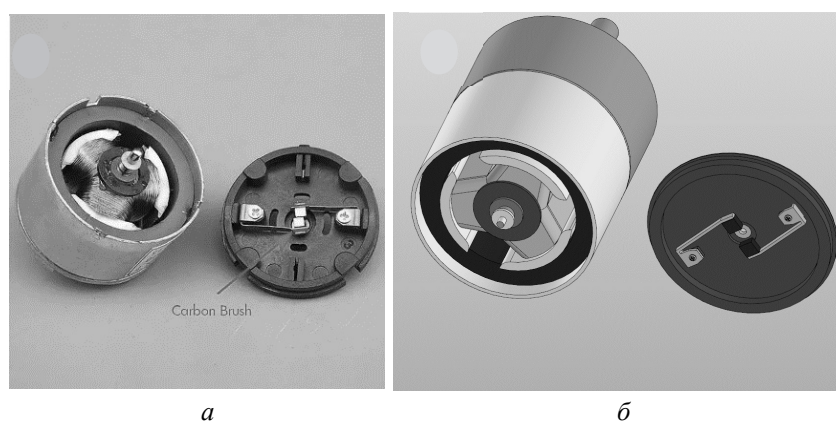


Рис. 2. Двигатель постоянного тока модели 33GB-520-18.7:

a – в разборе; *б* – 3D-модель

Fig. 2. The 33GB-520-18.7 DC motor model:

a is disassembled electric motor; *b* is a 3D-model

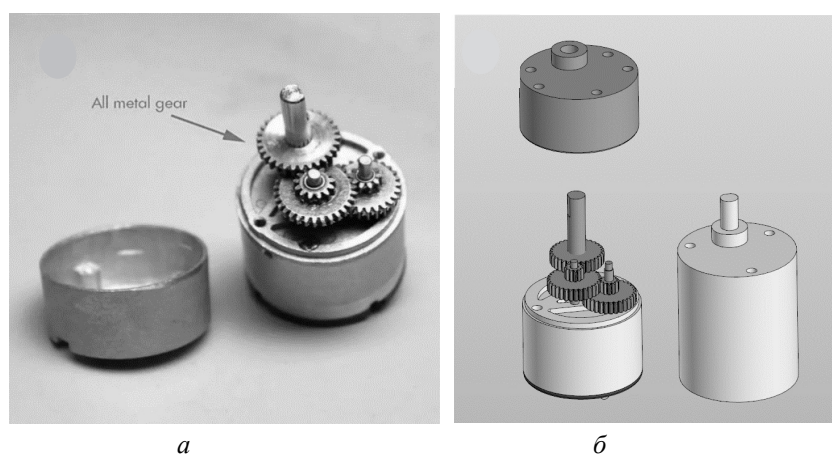


Рис. 3. Внутреннее строение редуктора двигателя 33GB-520-18.7:

a – в разборе; *б* – 3D-модель

Fig. 3. The internal structure of the 33GB-520-18.7 engine gearbox:

a is gearbox disassembled; *b* is a 3D-model

На основе проведенных замеров и имеющихся геометрических и массовых характеристик приняты следующие оценки: доля редуктора составляет около 40 % от общей массы узла, или около 40 г. Масса ротора ~26,2 г; радиус ротора около 26,4 мм, что обеспечивает оценку его момента инерции: $J_r \approx 9,1 \cdot 10^{-6}$ кг·м². Корпус выполнен из алюминиевого сплава АД31, что определяет тепловые и прочностные характеристики при длительной работе в нагруженных режимах. Для дальнейшего исследования электродвигателя необходимо его тщательно изучить и описать каждый из элементов, входящих в его состав [14, 15]. Особое внимание следует уделить общему количеству деталей, входящих в конструкцию. Для этих целей электродвигатель был полностью разобран, сняты размеры деталей и спроектированы в 3D.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная в MatLab/Simulink ресурсная модель электродвигателя состоит из трех блоков: 1) блок мотора, учитывающий возникающую температуру при работе, выглядит как передаточная функция скорости от напряжения; 2) блок учета ресурса компонентов, состоящий из отдельных веток, учитывающих остаточный ресурс каждого элемента (ведущих и ведомых шестерней, втулок, щеток); 3) блок передачи данных, пересылающий в Unity 13 параметров для последующей визуализации (рис. 4). Ресурсная модель позволяет рассчитать 13 параметров для электродвигателя. Каждый параметр представляет или отдельный элемент (шестерня или вал), или пару элементов щетки или втулки. Для дальнейшей обработки и интеграции в цифровой двойник эти значения необходимо отправить через протокол UDP (User Datagram Protocol – протокол пользовательских датаграмм).

Выходы сигнала signal1: signal9 предназначены для визуализации шестеренок трехступенчатого редуктора, втулок, и валов. Рассмотрим эти выходы сигнала детально: signal1 – малая шестерня редуктора 1; signal2 – большая шестерня редуктора 2; signal3 – ресурс втулок вала 2 и 3 шестеренки; signal4 – малая шестерня редуктора 3; signal5 – большая шестерня редуктора; signal6 – малая шестерня редуктора 5; signal7 – ресурс втулок вала 4 и 5 шестеренки; signal8 – большая шестерня редуктора 6; signal9 – ресурс втулок вала 6 шестеренки. Кроме расчета ресурса узлов редуктора ресурсная модель учитывает signal10 – износ щеток электродвигателя; signal11 – выделяемое тепло на роторе двигателя (С°); signal12 – скорость вращения ротора двигателя (об/мин); signal13 – силу тока, протекающего через щетки электромотора (А). Такая структура модели обеспечивает адаптивность ко входному сигналу от постоянного напряжения до произвольных последовательностей пусков, остановок и перегрузок.

Имитационная модель ресурсов электропривода, выполненная в MatLad/Simulink, объединена с трехмерной моделью на основе платформы Unity. Данные из MatLad/Simulink отправляются в Unity через протокол UDP. Модель редуктора импортирована в формате FBX (Filmbox – проприетарный формат файлов трехмерной графики) в разобранном виде. Это обеспечивает доступ к каждой детали для назначения материалов и компонентов анимации. Обмен данными организован следующим образом: MatLad/Simulink формирует вектор из 13 параметров, в который входят угловая скорость выходного вала,

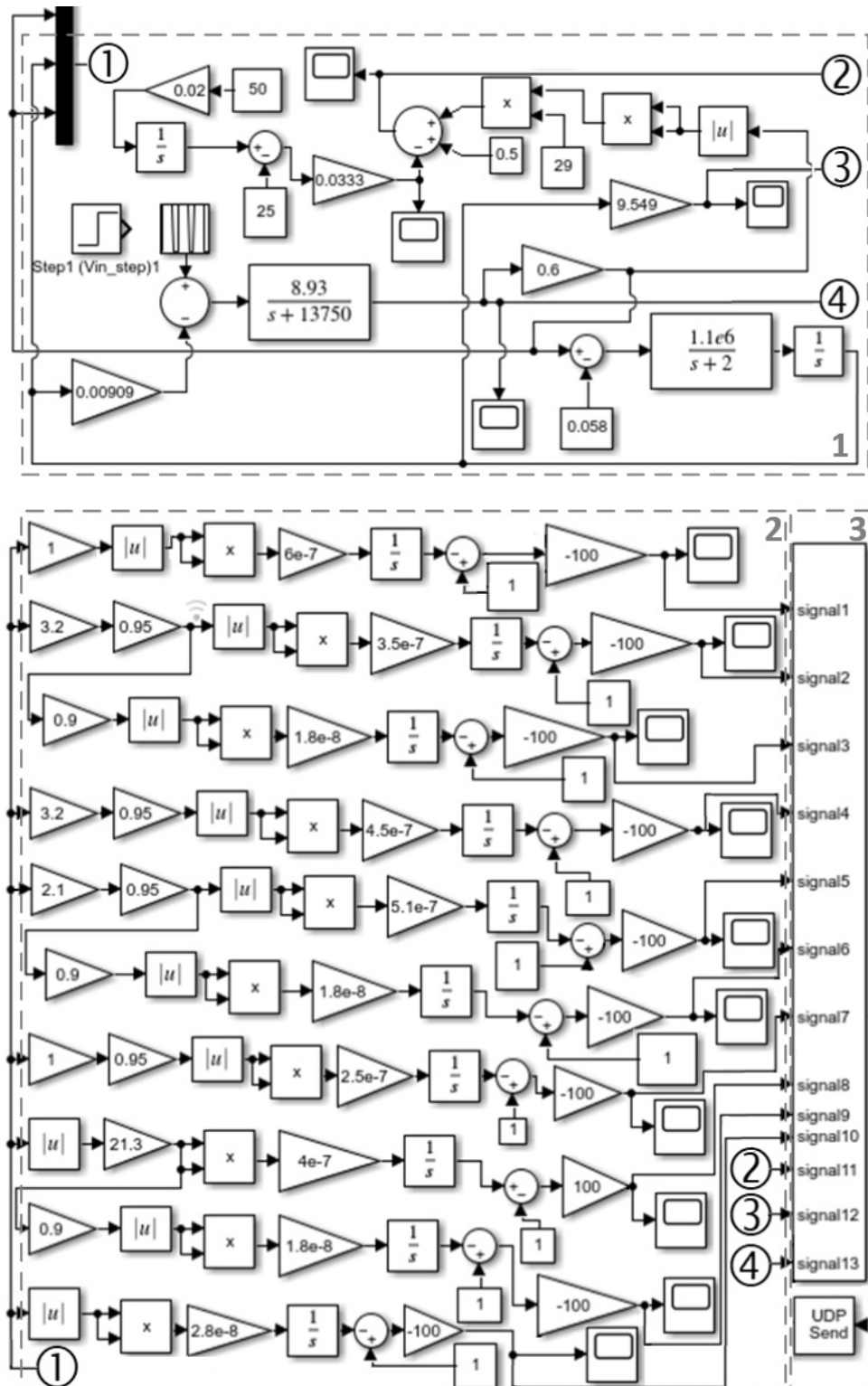


Рис. 4. Имитационная модель ресурсов электропривода

Fig. 4. Simulation model of electric drive resources

протекающий ток, остаточный ресурс 11 элементов, температура. Эти данные передаются через блок UDP Send на локальный адрес 127.0.0.1:8000. Частота дискретизации составляет 0,01 с. Unity принимает пакеты в фоновом режиме через ответную часть на своей стороне на основе UdpClient и обновляет состояние каждого элемента в соответствии с полученными данными, расположенными в сценах в основном цикле. Такая архитектура обеспечивает синхронизацию в режиме реального времени и позволяет синхронизировать расчёты, проводить визуализацию в режиме реального времени.

Первым режимом работы для электродвигателя является номинальная работа без перерыва. При постоянном напряжении питания 12 В наблюдается установившийся режим работы с угловой скоростью ротора $\omega \approx 36$ рад/с порядка 7500 об/мин без нагрузки. При номинальном режиме работы ток якоря стабилизирован на уровне $\sim 0,15$ А, крутящий момент на выходном валу составляет $\sim 0,04$ Н·м, что полностью соответствует замеренным показателям. Симуляция номинального режима проводилась за 1000 ч и представлена на рис. 5. На основе проведенного моделирования было выявлено, что наиболее нагруженным элементом является выходная шестерня 6 (износ составляет ~ 15 %), остаточный ресурс составляет ~ 85 %, за ней следуют остальные промежуточные шестеренки.

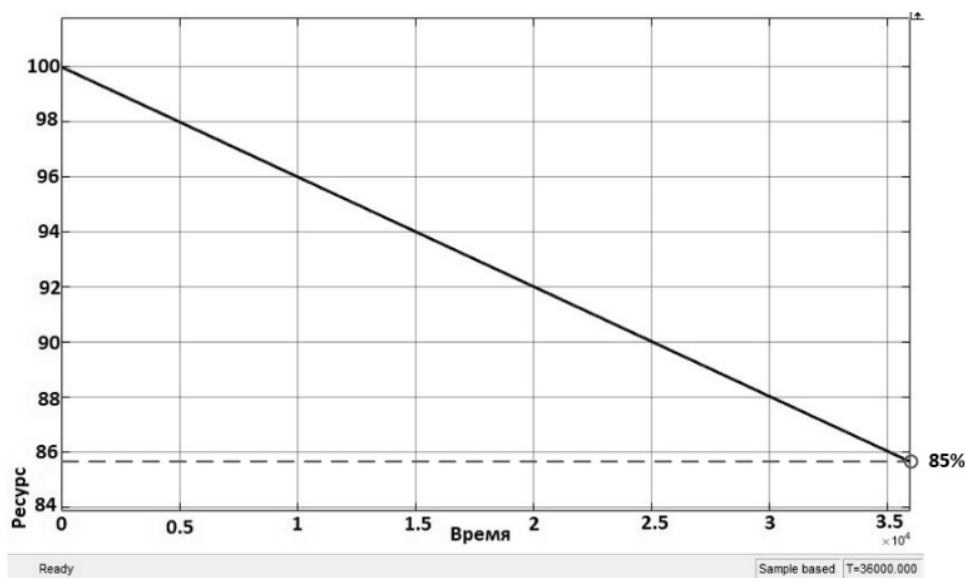


Рис. 5. График зависимости ресурса шестерни 6 на 1000 часов непрерывной работы при холостом вращении двигателя

Fig. 5. Graph of the resource dependence of gear No. 6 for 1000 hours of continuous operation with the engine idling

После первого этапа симуляция работает корректно и показывает результаты, близкие к расчетным на 1000 часов непрерывной работы в устоявшемся режиме работы (рис. 6). Износ щеток составил менее 11 %, остаточный ресурс ~ 89 %, что является правдоподобным показателем для электродвигателя с током холостого хода 100 мА. По результатам симуляции предполагаемый ресурс щеток составил ~ 9000 часов, что также является приближенным к реальному

показателю значением. Большинство производителей закладывают ресурс электродвигателя в диапазоне от 5 до 10 тыс. часов. Это выражено общей продолжительностью работы 7 лет. Таким образом, электродвигатель в течение 7 лет каждый день будет работать по 4 часа (с расчетом на смазку через каждые 2000–3000 часов работы) без перегрева, при минимизации попадания пыли в отверстия для циркуляции воздуха и недопустимости превышения нагрузок на выходящем валу электродвигателя. Ресурс шестеренок в редукторе составил чуть больше 2000 часов непрерывной работы, что является показателем, приближенным к реальности. Учитывая незнание марки металла и типа смазки, можно считать, что рассчитанный ресурс может быть завышен [18].

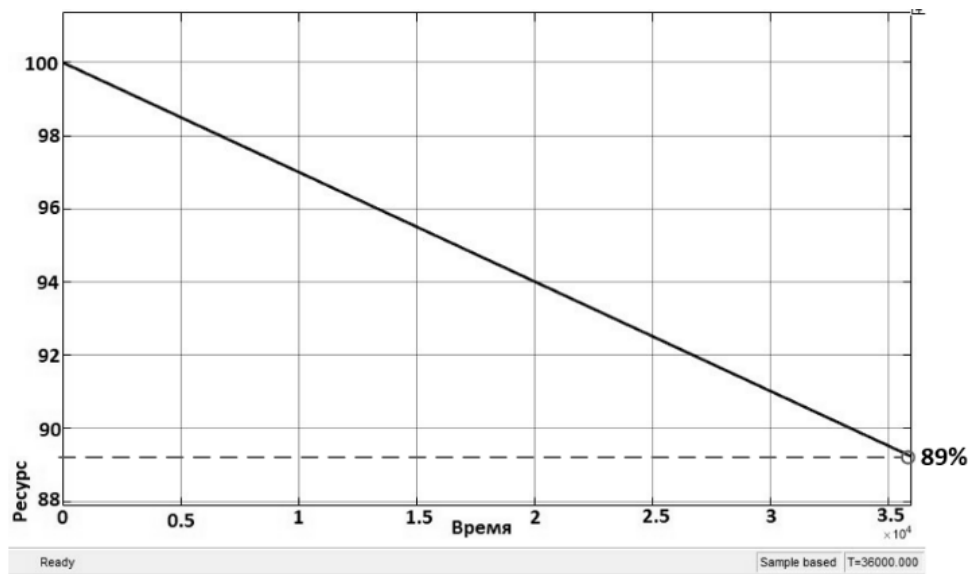


Рис. 6. График зависимости ресурса щеток электродвигателя за 1000 часов непрерывной работы при холостом вращении двигателя

Fig. 6. Graph of the dependence of the brush life of an electric motor for 1000 hours of continuous operation with the engine idling

Далее рассмотрим импульсное управление с циклом «разгон 2с – остановка за 1с» (рис. 7). Такой режим работы приводит к периодическим пикам тока до 0,45 А и моментам до 1,2 Н·м на выходе редуктора. За эквивалентные 1000 часов суммарной работы общий ресурс снижается как минимум в 3 раза по сравнению с номинальным режимом.

При пуске электродвигателя возникает кратное кратковременное повышение тока. Это негативно влияет на щетки электродвигателя, уменьшая их ресурс в 3–5 раз, чем при непрерывном режиме работы (рис. 8). В случае остаточного ресурса снижается срок эксплуатации почти в 3 раза (до ~69 %) за счет повышения силы тока [19–22]. За время симуляций и анализа наиболее чувствительными к пусковым режимам оказались шестерни первой и второй ступеней, где динамические перегрузки при разгоне приводят к локальному росту скорости износа в 2,5 раза. Выходная шестерня 6 сохраняет лидерство по суммарному расходу ресурса.

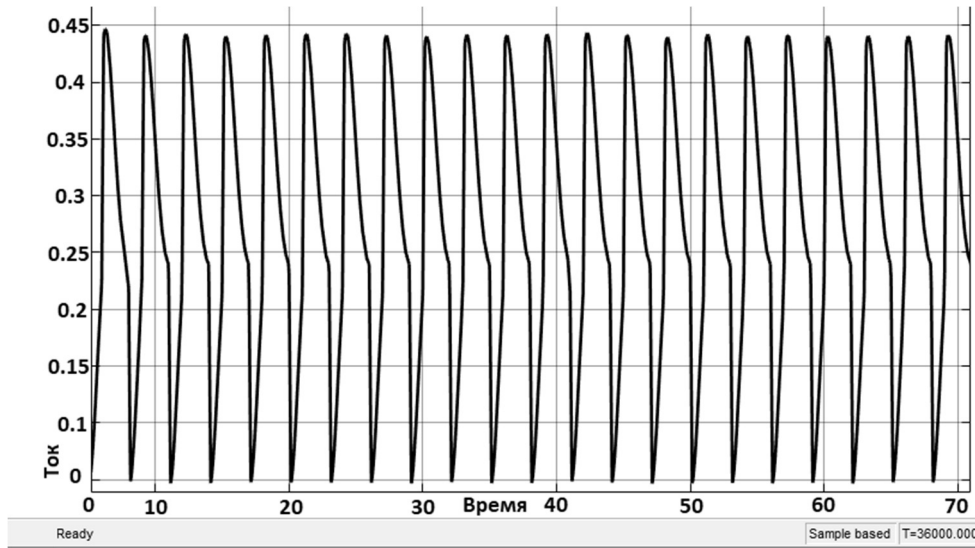


Рис. 7. График зависимости тока от времени при импульсном режиме работы

Fig. 7. Graph of current versus time dependence in pulse operation

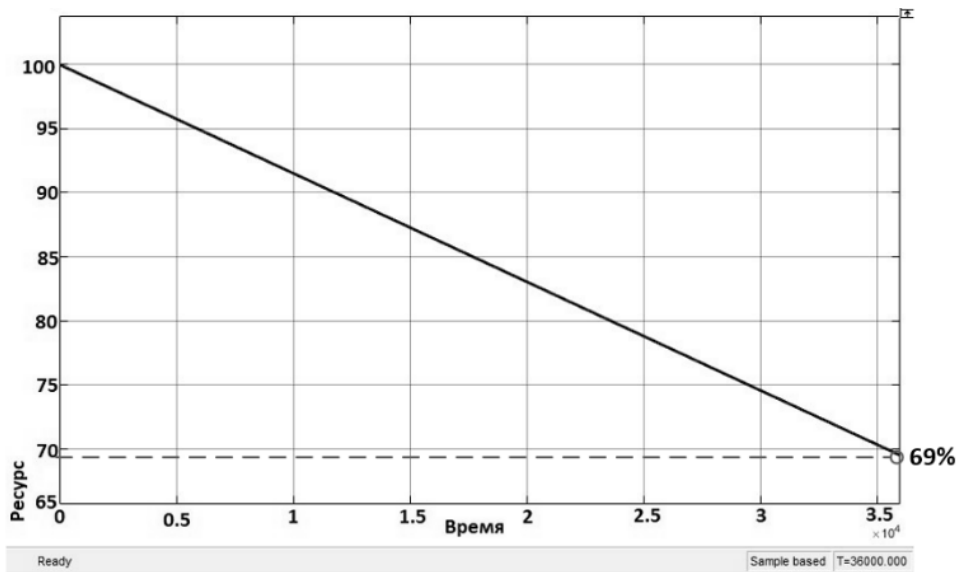


Рис. 8. График зависимости ресурса щеток электродвигателя от времени при импульсном режиме работы

Fig. 8. Graph of the dependence of the brush life of an electric motor on the time during pulse operation

Проведены испытания в режиме перегрузки выходного вала (рис. 9). Моделирование торможения вала реализовано добавлением внешнего момента нагрузки $0,20 \text{ Н}\cdot\text{м}$, начиная со старта [23, 24]. Ток якоря возрастает практически до $0,5 \text{ А}$, общий момент на шестернях – до $1,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$. За 1000 часов работы в перегрузочном режиме остаточный ресурс щеток составил 39 %,

износ 64 % (рис. 10). Шестерня 6 показала остаточный ресурс около 28 % от изначального, износ составил ~72 % (рис. 11). Остальные шестерни редуктора израсходовали свой ресурс не так активно: шестерня 5 израсходовала 53 %, в то время как шестерня 1 израсходовала 90 % остаточного ресурса.

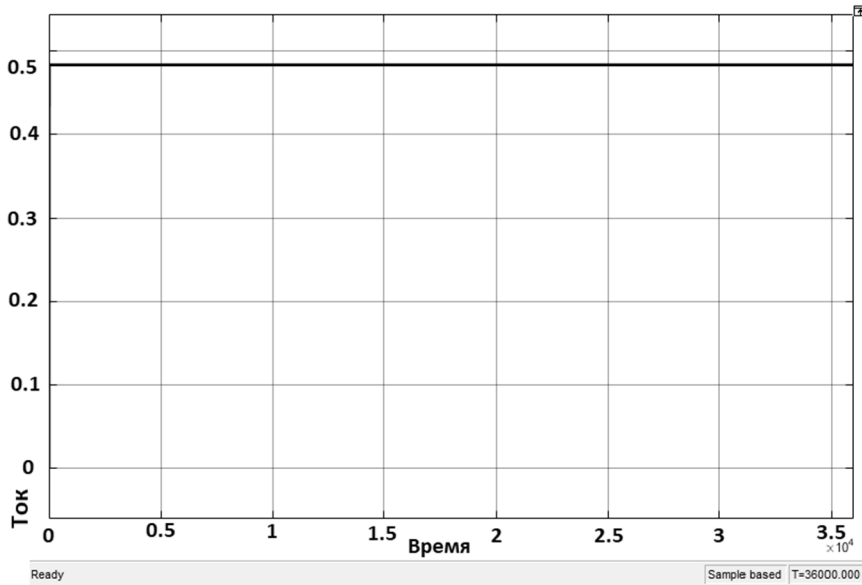


Рис. 9. График зависимости тока от времени при режиме работы с нагрузкой на валу

Fig. 9. Graph of current dependence on time in the operating mode with a load on the shaft

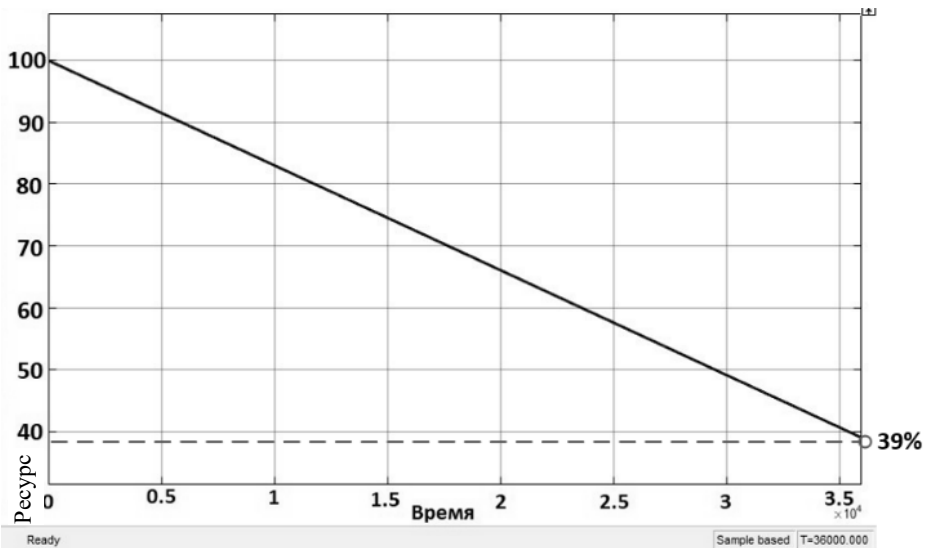


Рис. 10. График зависимости ресурса щеток от времени при режиме работы с нагрузкой на валу

Fig. 10. Graph of the dependence of brush life on time during operation with shaft load

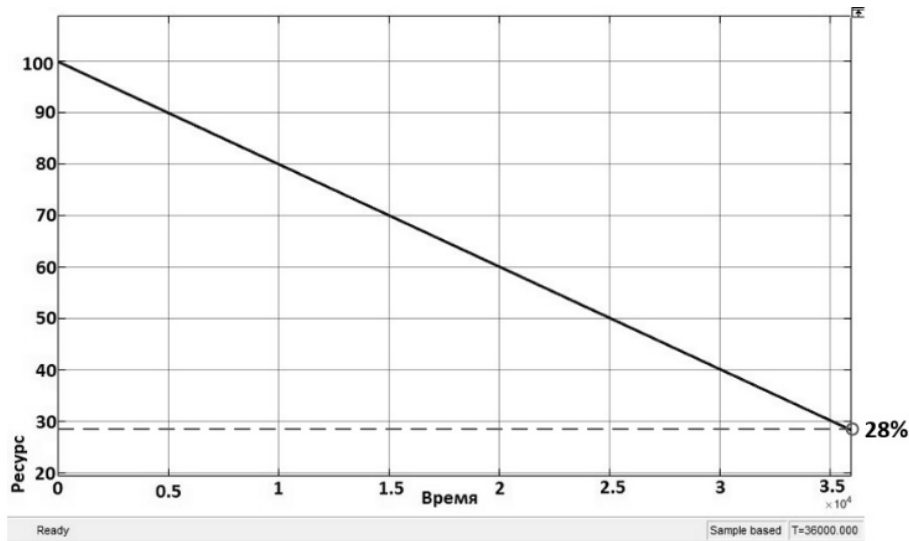


Рис. 11. График зависимости ресурса шестерни 6 на 1000 часов непрерывной работы при режиме работы с нагрузкой на валу

Fig. 11. Resource graph of gear No. 6 for 1000 hours of continuous operation, in the operating mode with a load on the shaft

Втулки испытывают повышенную радиальную нагрузку +45 % скорости износа. Интегрированная математическая модель в Unity позволяет визуально оценить деградацию ресурса в реальном времени (рис. 12). Степень изношенности на рис. 12 выделена оттенками серого и распределяется следующим образом: 1-я степень соответствует более 75 % остаточного ресурса, 2-я степень – от 50 до 75 % и 3-я степень – менее 50 %. При номинальном режиме все элементы остаются в состоянии 1-й степени остаточного ресурса более 80 % времени. При пусковых режимах 2-я степень изношенности появляется гораздо быстрее. Сравнение с «линейным, многочасовым» подходом показывает, что традиционная оценка по времени работы не может быть применена к общему ресурсу электродвигателя с учетом разных возможных эксплуатационных условий, связанных с увеличенной температурой, отсутствием смазки, попаданием пыли, импульсных нагрузок и др. Это обеспечивает потенциал для дальнейших доработок математической модели и ее последующей интеграции с возможностью визуального отображения износа определенных компонентов.

Разработанный цифровой двойник щеточного двигателя постоянного тока с редуктором модели 33GB-520-18.7 позволяет прогнозировать распределение ресурса между 11 элементами привода с учетом специфики режимов эксплуатации. Основные полученные результаты:

- при номинальном непрерывном режиме щетки и втулки демонстрируют минимальный расход ресурса, что обусловлено низкой плотностью тока и распределением нагрузки;
- режим частых пусков увеличивает общий расход ресурса в 3 раза для щеток и свыше двух раз для всех шестеренок, входящих в состав редуктора, что обусловлено динамическими перегрузками и квадратом зависимости от тока;

- при режиме работы, связанном с возникновением перегрузки выходного вала, рост токов возрастает до 0,5 А и моментов до 1,5 Н·м. При таком режиме усиливается износ внутренних компонентов электродвигателя;
- совместное использование среды имитационного моделирования MatLab/Simulink и платформы Unity позволяет обеспечить комплексную математическую модель и удобную графическую среду с большим набором инструментов для визуализации деградации компонентов электромотора в режиме реального времени.

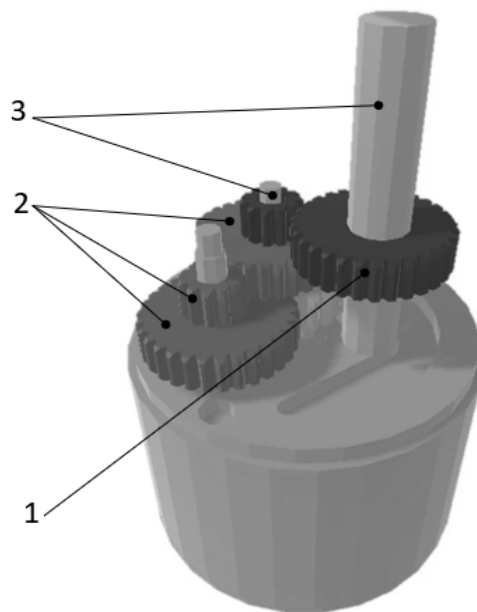


Рис. 12. Цифровая симуляция в Unity, отражающая режим работы и ресурс электромотора

Fig. 12. A digital simulation in Unity that reflects the operating mode and service life of an electric motor

Подобный подход существенно упрощает анализ и принятие решений о плановом обслуживании оборудования. Цветовая индикация позволяет мгновенно оценить критические элементы без изучения числовых таблиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы проанализированы существующие исследования, посвященные методикам и способам оценки состояния и остаточного ресурса электродвигателей. В ходе проведения работы рассматривались исследования, проводимые в MatLab/Simulink, MATLAB/Simscape, Unity3D, ANSYS Twin Builder. В некоторых работах авторы применяли комбинированные модели, использующие промышленные протоколы обмена данными со специализированной операционной системой ROS (Robot Operating System).

В настоящей работе рассмотрен щеточный двигатель постоянного тока с редуктором модели 33GB-520-18.7 в трех режимах работы: номинальном, импульсном и перегрузочном.

Основным отличием разработанной модели от существующих является комплексный учет деградации 12 критических узлов: щеточно-коллекторного узла, шести шестеренок редуктора, четырех втулок, а также деградации лака на обмотках ротора. На основе физических законов износа учитывается распределение нагрузок по ступеням. Разработана методика расчета, позволяющая оценить ресурс работы электродвигателя. Методика расчета основана на алгоритме оценки остаточного ресурса, математической модели и модуле визуализации на базе Unity. Экспериментальные исследования за 1000 часов наработки показали, что предложенная система цифрового двойника обеспечивает точное распределение ресурса. Модели, рассмотренные в работах других авторов, применимы только к промышленным решениям в области робототехники и учитывают работу с асинхронными двигателями высокой мощности. Разработанная модель успешно справилась с задачей предсказания остаточного ресурса с учетом всех контролируемых параметров эксплуатации – тока, момента, температуры, демонстрируя физическую адекватность и масштабируемость для малых робототехнических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные вентильные электродвигатели с постоянными магнитами для привода нефтеперекачивающих насосов. Перспективы использования на объектах ТЭК / А.С. Адалёв, С.А. Булгаков, А.С. Кибардин, В.Г. Кучинский, В.Ф. Сойкин // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2008. – № 1 (11). – С. 66–69.
2. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data / F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, F. Sui // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 94. – P. 3563–3576. – DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.
3. *Vaez-Zadeh S.* Variable flux control of permanent magnet synchronous motor drives for constant torque operation // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2001. – Vol. 16 (4). – P. 527–534.
4. Exciting force and vibration analysis of stator permanent magnet synchronous motors / S. Wang, J. Hong, Y. Sun, H. Cao // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – Vol. 54 (11). – P. 1–5.
5. Interface development for digital twin of an electric motor based on empirical performance model / A. Rassolkin, V. Rjabtsikov, V. Kuts, T. Vaimann, A. Kallaste, B. Asad, A. Partyshev // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 15635–15643. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3148708.
6. Fault-tolerant electric drive and space-phaser modulation of flux-switching permanent magnet machine for aerospace application / L. Wang, S. Aleksandrov, Y. Tang, J.J.H. Paulides, E.A. Lomonova // IET Electric Power Applications. – 2017. – Vol. 11 (8). – P. 1416–1423. – DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0864.
7. Digital twin of an electrical motor based on empirical performance model / A. Rassolkin, V. Rjabtsikov, T. Vaimann, A. Kallaste, V. Kuts, A. Partyshev // 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), St. Petersburg, Russia, 2020. – IEEE, 2020. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249366.
8. *Xu M., Marangoni R.* Vibration analysis of a motorflexible coupling-rotor system subject to misalignment and unbalance. Part I: Theoretical model and analysis // Journal of Sound and Vibration. – 1994. – Vol. 176 (5). – P. 663–679.
9. *Jalan A.K., Mohanty A.* Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition // Journal of Sound and Vibration. – 2009. – Vol. 327 (3–5). – P. 604–622.
10. *Rodriguez F., Emadi A.* A novel digital control technique for brushless DC motor drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54 (5). – P. 2365–2373. – DOI: 10.1109/TIE.2007.900312.

11. Digital twins as electric motor soft-sensors in the automotive industry / F. Toso, R. Torchio, A. Favato, P.G. Carlet, S. Bolognani, P. Alotto // 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive). – Bologna, Italy, 2021. – P. 13–18. – DOI: 10.1109/MetroAutomotive50197.2021.9502885.
12. *Гладышев М.Д.* Разработка модели цифрового двойника: технологические аспекты и практические применения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 6. – С. 48–51.
13. Digital twin of the management process of field service teams of an electric grid company / A.R. Kinzhalieva, O.M. Protalinskiy, A.A. Khanova, I.O. Bondareva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2090. – P. 012015. – DOI: 10.1088/1742-6596/2090/1/012015.
14. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности / под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: Политех-Пресс, 2022. – 492 с.
15. Применение цифровых двойников в промышленности / С. Малакути, П. Ван Шалквик, Б. Босс, Ч.Р. Састри // Современная электроника. – 2022. – № 8. – С. 34–41.
16. *Wang X., Palka R., Wardach M.* Nonlinear digital simulation models of switched reluctance motor drive // Energies. – 2020. – Vol. 13 (24). – P. 6715. – DOI: 10.3390/en13246715.
17. Electric motor production 4.0 – Application potentials of Industry 4.0 technologies in the manufacturing of electric motors / A. Mayr, M. Weigelt, J. von Lindenfels, J. Seefried, M. Ziegler, A. Mahr, N. Urban, A. Kuhl, F. Huttel, J. Franke // 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC). – Schweinfurt, Germany, 2018. – P. 1–13. – DOI: 10.1109/EDPC.2018.8658294.
18. *Holtmann C., Rinderknecht F., Friedrich H.E.* Thermal model of electric machines with correction of critical parameters // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). – Miami, FL, USA, 2017. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002043.
19. ГОСТ ИЕС 60034-1–2014. Машины электрические вращающиеся. Ч. 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики: дата введения 2016-03-01. – М.: Стандартинформ, 2016.
20. *Buryak S.Yu* Mathematical modeling of AC electric point motor // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2014. – № 2 (50). – С. 7–20.
21. Mathematical modeling of a linear-induction motor based on detailed equivalent circuits / F.N. Sarapulov, V.E. Frizen, E.L. Shvydkiy, I.A. Smol'yanov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89. – P. 270–274. – DOI: 10.3103/S1068371218040119.
22. *Konuhova M.* Induction motor dynamics regimes: A comprehensive study of mathematical models and validation // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15 (3). – P. 527. – DOI: 10.3390/app15031527.
23. *Khan K., Samuilik I., Ali A.* A mathematical model for dynamic electric vehicles: analysis and optimization // Mathematics. – 2024. – Vol. 12 (2). – P. 224. – DOI: 10.3390/math12020224.
24. *Tatwawadi V.H., Modak J.P., Chilbule S.* Mathematical modelling and simulation of working of an enterprize manufacturing electric motors // International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice. – 2010. – Vol. 17 (4). – DOI: 10.2305/IJETAP.2010.17.4.86.

Гладышев Михаил Дмитриевич, доцент кафедры технологии материалов и промышленной инженерии Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева. Основное направление научных исследований – моделирование поведения цифровых двойников и управление робототехническими комплексами. Имеет более 20 печатных работ. E-mail: glad.mi@yandex.ru

Ханова Анна Алексеевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление сложными системами на основе имитационного моделирования. Имеет более 200 публикаций, в том числе две монографии. E-mail: akhanova@mail.ru

Gladyshev Mikhail D., associate professor at the Department of Materials Technology and Industrial Engineering, Astrakhan Tatishchev State University. The main focus of his research is modeling the behavior of digital twins and managing robotic systems. He has published over 20 papers. E-mail: glad.mi@yandex.ru

Khanova Anna A., Doctor of Engineering Sciences, professor at the Department of Applied Informatics in the Astrakhan State Technical University. Her primary research focus is strategic

management of complex systems based on simulation modeling. She has over 200 publications, including two monographs. E-mail: akhanova@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-31-50

Modeling a digital twin for estimating the residual life of an electric motor based on the integration of a physical model and operating data*

M.D. GLADYSHEV^{1,a}, A.A. KHANOVA^{2,b}

Astrakhan Tatishchev State University, 20a Tatishcheva Street, Astrakhan, 1414056, Russian Federation

Astrakhan State Technical University, 16 Tatishcheva Street, Astrakhan, 1414056, Russian Federation

^a glad.mi@yandex.ru ^b akhanova@mail.ru

Abstract

Recently, there has been an active development of mobile robotics, which leads to increased requirements for the reliability of actuators, in particular for small-sized electric motors that are used in robotic complexes. The existing mathematical models and various algorithms that make it possible to assess the residual life of the drive are incomplete and ineffective in terms of the adequacy of life expectancy predictions for each element included in the electric drive. To assess existing approaches, an analysis was carried out of both domestic and foreign models of digital twins of electric motors. Mathematical models of digital twins of electric motors have been studied, which make it possible to assess the residual resource. The key task of this work is to present an improved system that would make it possible to assess the residual life of the electric motor in real time, as well as to identify the most loaded units depending on various operating modes. The experimental part of the work involves testing the residual resource prediction system. Based on the results of the work, the proposed system has shown its operability and can be used in other projects in the future. In the course of the study, the correct results were obtained in terms of the physical laws of the electric motor. A comprehensive mathematical model was built, taking into account all the laws of all parts and assemblies included in the drive. Estimates of values were obtained by their residual resource depending on the operating mode. At the final stage of work, data were obtained to further scale the study and refine the existing system.

Keywords: simulation model, residual resource, electric drive, reliability, digital twin, decision making, maintenance, forecasting, algorithmic support, information processing, systems analysis

REFERENCES

1. Adalev A.S., Bulgakov S.A., Kibardin A.S., Kuchinskii V.G., Soikin V.F. Sovremennye ventil'nye elektrodvigateli s postoyannymi magnitami dlya privoda nefteperekachivayushchikh nasosov. Perspektivy ispol'zovaniya na ob'ektakh TEK [Modern valve electric motors with permanent magnets for driving oil pumps. Prospects for use at fuel and energy complex facilities]. *Truboprovodnyi transport: teoriya i praktika = Pipeline transport: Theory and practice*, 2008, no. 1 (11), pp. 66–69.
2. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 3563–3576. DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.
3. Vaez-Zadeh S. Variable flux control of permanent magnet synchronous motor drives for constant torque operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001, vol. 16 (4), pp. 527–534.

* Received 06 February 2026.

4. Wang S., Hong J., Sun Y., Cao H. Exciting force and vibration analysis of stator permanent magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 54 (11), pp. 1–5.
5. Rassolkin A., Rjabtsikov V., Kuts V., Vaimann T., Kallaste A., Asad B., Partyshev A. Interface Development for digital twin of an electric motor based on empirical performance model. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 15635–15643. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3148708.
6. Wang L., Aleksandrov S., Tang Y., Paulides J.J.H., Lomonova E.A. Fault-tolerant electric drive and space-phasor modulation of flux-switching permanent magnet machine for aerospace application. *IET Electric Power Applications*, 2017, vol. 11 (8), pp. 1416–1423. DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0864.
7. Rassolkin A., Rjabtsikov V., Vaimann T., Kallaste A., Kuts V., Partyshev A. Digital twin of an electrical motor based on empirical performance model. *2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249366.
8. Xu M., Marangoni R. Vibration analysis of a motorflexible coupling-rotor system is subject to misalignment and unbalance. Part I: Theoretical model and analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, vol. 176 (5), pp. 663–679.
9. Jalan A.K., Mohanty A. Model based fault diagnosis of a rotor–bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, vol. 327 (3–5), pp. 604–622.
10. Rodriguez F., Emadi A. A novel digital control technique for brushless DC motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54 (5), pp. 2365–2373. DOI: 10.1109/TIE.2007.900312.
11. Toso F., Torchio R., Favato A., Carlet P.G., Bolognani S., Alotto P. Digital twins as electric motor soft-sensors in the automotive industry. *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive)*, Bologna, Italy, 2021, pp. 13–18. DOI: 10.1109/MetroAutomotive50197.2021.9502885.
12. Gladyshev M.D. Razrabotka modeli tsifrovogo dvoynika: tekhnologicheskie aspekty i prakticheskie primeneniya [Development of a digital twin model: technological aspects and practical applications]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskije nauki = Modern Science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*, 2008, no. 6, pp. 48–51.
13. Kinzhaliyeva A.R., Protalinskiy O.M., Khanova A.A., Bondareva I.O. Digital twin of the management process of field service teams of an electric grid company. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2090, p. 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/2090/1/012015.
14. Borovkov A.I., ed. *Tsifrovye dvoyniki v vysokotekhnologichnoi promyshlennosti* [Digital twins in the high-technology manufacturing industry]. St. Petersburg, Politekh-Press Publ., 2022. 492 p.
15. Malakuti S., Van Schalkwyk P., Boss B., Sastry C.R. Primenenie tsifrovoykh dvoynikov v promyshlennosti [Application of digital twins in industry]. *Sovremennaya elektronika = Modern Electronics*, 2022, no. 8, pp. 34–41.
16. Wang X., Palka R., Wardach M. Nonlinear digital simulation models of switched reluctance motor drive. *Energies*, 2020, vol. 13 (24), p. 6715. DOI: 10.3390/en13246715.
17. Mayr A., Weigelt M., von Lindenfels J., Seefried J., Ziegler M., Mahr A., Urban N., Kuhl A., Huttel F., Franke J. Electric motor production 4.0 – Application potentials of Industry 4.0 technologies in the manufacturing of electric motors. *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Schweinfurt, Germany, 2018, pp. 1–13. DOI: 10.1109/EDPC.2018.8658294.
18. Holtmann C., Rinderknecht F., Friedrich H.E. Thermal model of electric machines with correction of critical parameters. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, FL, USA, 2017, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002043.
19. GOST IEC 60034-1–2014. *Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya*. Ch. 1. *Nominal'nye znacheniya parametrov i ekspluatatsionnye kharakteristiki* [State Standard IEC 60034-1–2014. Rotating electrical machines. Pt. 1. Rating and performance]. Moscow, Standartinform Publ., 2016.
20. Buryak S.Yu. Mathematical modeling of AC electric point motor. Science and progress of transport. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 2 (50), pp. 7–20.
21. Sarapulov F.N., Frizen V.E., Shvydkiy E.L., Smol'yanov I.A. Mathematical modeling of a linear-induction motor based on detailed equivalent circuits. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, pp. 270–274. DOI: 10.3103/S1068371218040119.
22. Konuhova M. Induction motor dynamics regimes: A comprehensive study of mathematical models and validation. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15 (3), p. 1527. DOI: 10.3390/app15031527.

23. Khan K., Samuilik I., Ali A. A mathematical model for dynamic electric vehicles: analysis and optimization. *Mathematics*, 2024, vol. 12 (2), p. 224. DOI: 10.3390/math12020224.

24. Tatwawadi V.H., Modak J.P., Chilbule S. Mathematical modelling and simulation of working of an enterprize manufacturing electric motors. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 2010, vol. 17 (4). DOI: 10.23055/ijietap.2010.17.4.86.

Для цитирования:

Гладышев М.Д., Ханова А.А. Моделирование с использованием цифрового двойника для оценки остаточного ресурса электродвигателя на основе интеграции физической модели и данных эксплуатации // Системы анализа и обработки данных. – 2026. – № 2 (102). – С. 31–50. – DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-31-50.

For citation:

Gladyshev M.D., Khanova A.A. Modelirovanie s ispol'zovaniem tsifrovogo dvoynika dlya otsenki ostatochnogo resursa elektrodvigatelya na osnove integratsii fizicheskoi modeli i dannykh ekspluatatsii [Modeling a digital twin for estimating the residual life of an electric motor based on the integration of a physical model and operating data]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2026, no. 2 (102), pp. 31–50. DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-31-50.