

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.92>**КРИТЕРИЙ ПРЕАДАПТАЦИИ ДЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Научная статья

**Терехин М.А.<sup>1,\*</sup>, Сподобаев И.М.<sup>2</sup>, Иващенко А.В.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0009-0004-1127-0978;<sup>2</sup>ORCID : 0009-0000-6465-6576;<sup>3</sup>ORCID : 0000-0001-7766-3011;<sup>1, 2, 3</sup>Самарский государственный медицинский университет, Самара, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (terexin.m.a[at]yandex.ru)

**Аннотация**

В статье предложен критерий преадаптации для оценки результатов инженерной деятельности как механизм повышения устойчивости технических систем к изменяющимся условиям эксплуатации. Предложенный критерий основан на количественной оценке изменений функциональных возможностей (аффордансов) системы в ответ на вариации внешних требований без необходимости её конструктивной переработки. Реализация предложенного критерия была апробирована на практическом примере при решении задачи анализа надежности асинхронного электродвигателя шнека экструдера. Основная инженерная задача в данном случае заключается в поиске технических или технологических идей, определяющих высокую надежность выбранного дизайн-решения в заданных условиях эксплуатации. В ходе имитационного моделирования было установлено, что параметр сопротивления обмотки статора является наиболее чувствительным параметром индикатором деградации. Механизм преадаптации, реализованный через мониторинг аффордансов и модификацию цифровой модели, позволяет задержать момент отказа и повысить надежность системы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании интеллектуальных систем технической диагностики, ресурсного управления и цифровых двойников в электромеханике и других отраслях инженерии. Кроме того результаты исследования могут быть применены при проектировании приводов шнековых буровых установок для отбора керна при инженерно-геологических изысканиях.

**Ключевые слова:** аффорданс, преадаптация, цифровой двойник, адаптивная коррекция, асинхронный электродвигатель, техническая диагностика, эксплуатационное старение, параметрическая идентификация, интеллектуальное управление, прогностическая модель, инженерная деятельность.

**PREADAPTATION CRITERION FOR ENGINEERING ACTIVITY RESULTS**

Research article

**Terekhin M.A.<sup>1,\*</sup>, Spodobaev I.M.<sup>2</sup>, Ivashchenko A.V.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0009-0004-1127-0978;<sup>2</sup>ORCID : 0009-0000-6465-6576;<sup>3</sup>ORCID : 0000-0001-7766-3011;<sup>1, 2, 3</sup>Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

\* Corresponding author (terexin.m.a[at]yandex.ru)

**Abstract**

The article proposes a preadaptation criterion for evaluating the results of engineering activity as a mechanism for increasing the stability of technical systems to changing operating conditions. The suggested criterion is based on the quantitative evaluation of changes in the functional capabilities (affordances) of the system in response to variations in external requirements without the necessity of its constructive redesign. The implementation of the proposed criterion was tested on a practical example when solving the problem of reliability analysis of the asynchronous electric motor of the extruder screw. The main engineering task in this case is to search for technical or technological ideas determining high reliability of the selected design solution in the given operating conditions. In the course of simulation modelling, it was found that the stator winding resistance parameter is the most sensitive degradation indicator parameter. The mechanism of preadaptation implemented through monitoring of affordances and modification of the digital model allows delaying the moment of failure and increasing the reliability of the system. The obtained results can be used in the design of intelligent systems of technical diagnostics, resource management and digital twins in electromechanics and other branches of engineering. In addition, the results of the study can be applied to the design of drives for auger drilling rigs for coring during engineering and geological surveys.

**Keywords:** affordance, preadaptation, digital twin, adaptive correction, induction motor, technical diagnostics, operational ageing, parametric identification, intelligent control, predictive model, engineering activity.

**Введение**

Разработка новых технических систем и устройств сопряжена с поиском эффективных инженерных решений и техническим творчеством. Наряду с применением известных способов стимулирования технического творчества [1], в настоящее время появились новые возможности развития инженерной деятельности, основанные на интеграции информационных ресурсов предприятий, построении цифровых двойников [2] и активном использовании технологий

генеративного искусственного интеллекта [3]. В этих условиях задача организации инженерной деятельности приобретает новую актуальность.

Новые возможности по автоматизации инженерной деятельности с использованием технологий искусственного интеллекта не позволяют полностью заменить инженера, но существенно облегчают рутинную работу, связанную с генерацией вариантов решения инженерных задач и их оценкой. Особенно сложно решать такого рода задачи в условиях неопределенности технических требований и облика результатов инженерной деятельности. Эта неопределенность обычно возникает при проведении междисциплинарных исследований, а также при построении сложной техники, использование которой предполагается в меняющихся условиях эксплуатации, например, при разработке асинхронных двигателей широкого применения, в том числе для прикладных геофизических и геологических задач.

В этом случае говорят об адаптивности изделий в смысле способности приспосабливаться к новым условиям применения и требованиям назначения. Таким образом, можно сформулировать актуальную задачу для автоматизированной информационной системы поддержки инженерной деятельности по обеспечению адаптивности, то есть приспособляемости результатов инженерной деятельности к меняющимся условиям. Данную задачу можно решить, например, возможностями конфигурирования параметров устройства, объединением его функциональности, повышением универсальности применения и т.п. При этом необходимо обеспечить формализованное описание этих возможностей для использования в интегрированной информационной среде и обучения искусственного интеллекта.

Для решения поставленной задачи предложим новый критерий, в основу которого положим свойство преадаптации, широко применяющееся в медико-биологических и социальных науках [4], [5]. По аналогии преадаптации элементов технических решений состоит в возможности смены функций в процессе приспособления к меняющимся внешним условиям. Это свойство систем и устройств позволяет расширять возможности применения путем коррекции вариантов использования при появлении новых задач или изменении требований назначения. В настоящее время свойство преадаптации активно используется для описания новых возможностей современных аппаратно-программных комплексов на основе искусственного интеллекта [6], [7] для стимулирования инженерной деятельности [8], [9], а также применяется при реализации новых архитектур адаптивного управления [10]. Для описания принципа multifunctionality и эволюции органов путем смены функций в современной науке используется также термин экзаттации [11], [12], так как преадаптация носит телеологический характер. Однако в случае проектирования систем и устройств телеология не нарушает общих принципов инженерной деятельности, поскольку не противоречит идеям механистического детерминизма.

Для реализации свойства преадаптации в технических системах должна быть предусмотрена определенная конфигурация функциональных возможностей, формально описать которые можно с помощью другого концепта «аффорданс» [13], широко применяющегося для формального описания способов реализации искусственного интеллекта [14]. В теории восприятия и технического дизайна аффорданс определен как ощущаемая человеком возможность взаимодействовать с предметом определенным образом [15], [16]. В отличие от абстрактных характеристик объекта, аффорданс определяет способ его использования и отражает реализацию требований назначения. Сложение или обобщение аффордансов расширяет область применения и обеспечивает свойство преадаптации элементов технических решений.

В данной статье предложен критерий преадаптации для результатов инженерной деятельности, основанный на анализе аффордансов, и рассмотрен пример практического применения этого критерия для проекта асинхронного двигателя.

### Критерий преадаптации

Свойство преадаптации результатов инженерной деятельности можно определить, как способность изделия к адаптации или эффективному функционированию в новых условиях без значительных изменений конструкции. На практике это означает поиск и реализацию таких дизайн-решений, которые обеспечивают максимальную вариативность использования.

На основе метода, предложенного в работе [17], сформулируем критерий преадаптации. Предположим, что изделие  $c_i$  имеет несколько вариантов исполнений или дизайн-решений  $d_{i,j}$  тогда получим:

$$d_{i,j} = d_{i,j}(c_i, \{p_{i,j,k}\}, \{s_{i,j,l}\}) \quad (1)$$

где  $\{p_{i,j,k}\}$  — набор характерных параметров;  $\{s_{i,j,l}\}$  — определяющий значения параметров набор технических или технологических идей.

Определение возможностей использования спроектированного изделия, имеющее конкретное исполнение дизайна  $d_{i,j}$  в соответствии с назначением, реализуется за счёт онтологии восприятия инженерно-технических работников (ИТР)  $\Omega_n$ .

Понятие «аффорданс» представим в виде Булевой функции, которая определяет возможность достижения цели субъекта в заданных условиях:

$$a_{i,j,n,m} = a_{i,j,n,m}(d_{i,j}, \Omega_n, g_m) \in \{0, 1\} \quad (2)$$

где  $g_m$  — цель или показатель назначения.

Тогда задача технического творчества представляет собой поиск в рамках одного дизайн-решения единого комплекса инженерных идей, удовлетворяющих требованиям назначения  $\{g_m^*\}$ :

$$\exists d_{i,j} : \sum_{m^*} g_{m^*} \left( \sum_{n,m} \delta(g_m = g_{m^*}) \cdot (1 - a_{i,j,n,m}(d_{i,j}, \Omega_n, g_m)) \right) \rightarrow 0 \quad (3)$$

$$\text{где } \delta(x) = \begin{cases} 1, & x = \text{true}, \\ 0, & x = \text{false}. \end{cases}$$

Исходя из вышеизложенного, этому решению будет скорее соответствовать максимум аффордансов в каждом новом дизайн решении:

$$P(d_{i,j}) = \sum_{m^*,n} a_{i,j,n,m^*}(d_{i,j}, \Omega_n, g_{m^*}) \rightarrow \max \quad (4)$$

Таким образом, несколько дизайн-решений можно сравнивать по критерию количества реализуемых ими аффордансов  $a_{i,j,n,m}$ . При этом сравнение необходимо проводить в одном и том же контексте: одна онтология восприятия  $\Omega_n$ , одинаковые требования назначения  $\{g_{m^*}\}$ . Сравниваемые дизайн-решения относятся к реализации концептуально одного и того же изделия, но отличаются составом идей, формой, функцией, компонентами и т.д.

Для двух выбранных для сравнения дизайн-решений:

$$\Delta P(d_{i,j_1}, d_{i,j_2}) = P(d_{i,j_1}) - P(d_{i,j_2}) \quad (5)$$

Если  $\Delta P(d_{i,j_1}, d_{i,j_2}) > 0$ , то  $j_1$  решение обладает большей преадаптацией; если  $\Delta P(d_{i,j_1}, d_{i,j_2}) = 0$ , оба решения равнозначны по функционалу; если  $\Delta P(d_{i,j_1}, d_{i,j_2}) < 0$ , то большей преадаптацией обладает решение  $d_{i,j_2}$ .

Оптимизация преадаптации возможна за счёт расширения множества реализуемых аффордансов  $a_{i,j,n,m}$  в рамках фиксированной онтологии восприятия  $\Omega_n$  и требований назначения  $\{g_{m^*}\}$ .

### Реализация на примере проекта асинхронного двигателя

Реализация предложенного критерия была апробирована на практическом примере при решении задачи анализа надежности асинхронного электродвигателя  $s_1$  шнека экструдера  $g_1$ . Основная инженерная задача в данном случае заключается в поиске технических или технологических идей, определяющих высокую надежность выбранного дизайн-решения в заданных условиях эксплуатации. Для решения этой задачи необходимо установить роль функциональных параметров в обеспечении надежности.

Вопросам моделирования и параметрической идентификации параметров электродвигателя посвящены работы [18], [20], [21], [22]. В выбранном примере аффордансы можно использовать для описания вариантов эксплуатации для приведения во вращение шнека экструдера в условиях повышенной нагрузки. Этому назначению  $g_1$  свойственна прогрессирующая деградация изоляции и тепловые потери, а также вариативность сценариев старения в разных экземплярах.

Аффордансы можно классифицировать по функциональным типам  $\Omega_n$  следующим образом. Функциональные возможности обозначают способность поддерживать высокое КПД и оцениваются как:

$$a_{i,j,1,1}(d_{1,j}, \Omega_1, g_1) = \delta \left( 1 - \frac{P_{\text{потери}}}{P_{\text{выход}}} \geq \theta_f \right) \quad (6)$$

Адаптационные возможности обозначают способность к корректировке параметров. Пусть:  $V(t)$  — вектор параметров модели асинхронного двигателя  $s_{i,j,l}$ ;  $E(t)$  — вектор внешних воздействий (нагрузки, температуры, износа и др.), тогда:

$$a_{i,j,2,1}(d_{1,j}, \Omega_2, g_1) = \delta \left( G \left( \frac{dV}{dt}, \frac{dE}{dt} \right) \leq \varepsilon_a \right) \quad (7)$$

где  $G(x)$  — функция адаптационной чувствительности, определяющая уровень способности системы к изменению своих параметров  $V$  в ответ на изменения внешних условий  $E$ ; в общем виде может задаваться как норма вектора производных или как комбинация чувствительных характеристик:

Диагностические возможности обозначают способность выявлять отклонения через чувствительность параметров к изменениям состояния:

$$a_{i,j,3,1}(d_{1,j}, \Omega_3, g_1) = \delta \left( H \left( \frac{dV}{dt}, \frac{d\Psi}{dt} \right) \geq \theta_d \right) \quad (8)$$

где  $H(x)$  — функция чувствительности, отражающая степень изменения параметров в ответ на динамику состояния,  $\Psi(t)$  — обобщённая характеристика состояния двигателя, сформированная на основе анализа сигналов и модели (например, фазовые сдвиги, отклонения тока, оценка остаточного ресурса).

Интегральный критерий преадаптации для попарного сравнения разных дизайн-решений в данном случае составит:

$$P(d_{1,j}) = a_{1,j,1,1}(d_{1,j}, \Omega_1, g_1) + a_{1,j,2,1}(d_{1,j}, \Omega_2, g_1) + a_{1,j,3,1}(d_{1,j}, \Omega_3, g_1) \quad (9)$$

что означает многокритериальное требование по обеспечению в изделии функциональных, адаптационных и диагностических возможностей.

Анализ этой модели показал, что данные аффордансы связаны с электромагнитными параметрами  $s_{i,j,l}$ , регулируемые в ходе эксплуатации: сопротивление обмоток статора  $R_s$ , сопротивление обмоток ротора  $R_r$ , самоиндукция  $L_m$ , скольжение  $s$ , электромагнитная постоянная времени  $\tau$ , КПД двигателя  $\eta$ .

Моделирование процессов потери надежности электродвигателя по каждому из указанных параметров позволило выявить их влияние на показатели надежности. Например (см. Рис 1) анализ динамики изменения ключевых электромагнитных параметров асинхронного электропривода позволил выявить решающую роль параметра сопротивления обмотки статора. На графике представлены усреднённые безразмерные значения трёх ключевых параметров: скольжения  $s$  (в долях от синхронной скорости), сопротивления обмотки статора  $R_s$  и сопротивления обмотки ротора  $R_r$  (в условных единицах, эквивалентных активному сопротивлению). Горизонтальная ось отражает номер цикла моделирования (от 0 до 10), вертикальная — значения параметров в относительных единицах. Данные усреднены по популяции из 200 имитированных экземпляров электродвигателя с одним дизайн-решением.

Сопротивление обмотки статора демонстрирует нарастающий экспоненциальный рост, начиная с 6–7 цикла, что отражает прогрессирующую деградацию изоляции и тепловые потери, и в свою очередь сопровождается расширением доверительного интервала, указывающим на вариативность сценариев старения в разных экземплярах. Сопротивление ротора изменяется незначительно, подтверждая его инерционность и устойчивость к внешним и внутренним воздействиям. Скольжение остаётся относительно стабильным и не демонстрирует резких колебаний, что свидетельствует о вторичном характере его изменений.

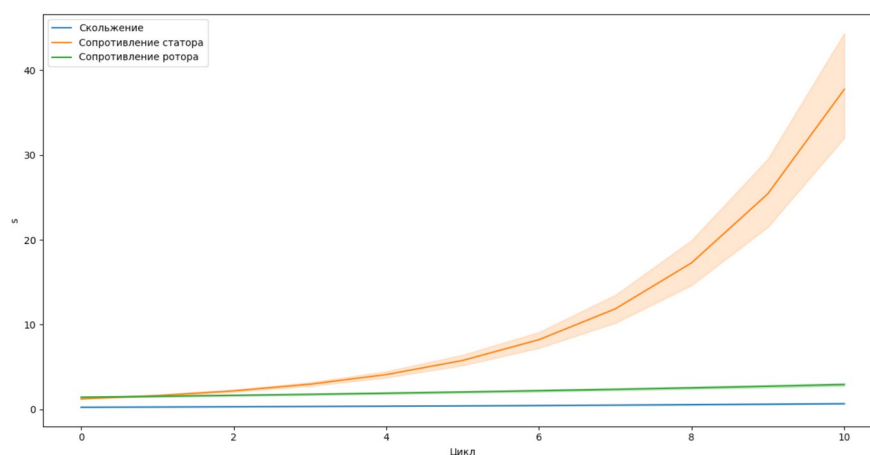


Рисунок 1 - Динамика изменения параметров скольжения и сопротивлений обмоток асинхронного двигателя в процессе циклического моделирования (N = 200, T = 10 циклов)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.92.1>

## Результаты и обсуждение

Предложенный критерий преадаптации позволяет количественно сравнить разные варианты реализации инженерного решения, в частности, оценить возможность реализации блока адаптивной подстройки параметров асинхронного электродвигателя, адаптивного по сопротивлению обмотки статора, для сохранения надежности. Реализация такого механизма управления позволяет снизить динамику роста отказов, что позволяет продлить период эксплуатации. Применение критерия преадаптации в данном случае позволяет выявить влияющие параметры и предложить направление модернизации дизайн-решения путем реализации новых аффордансов.

На практике блок адаптивной подстройки параметров асинхронного электродвигателя по данным изменения сопротивления обмотки статора может включать дизайн-решения по повышению надежности статора, реализации механизмов периодической диагностики и технического обслуживания, либо применению алгоритмов прогностического управления напряжением. Данные механизмы способны изменить кривую роста количества отказов, что согласуется с результатами исследований [23], [24]. Сочетание периодических испытаний и непрерывного контроля токов позволяет на ранней стадии обнаружить возрастание сопротивления статора и предотвратить аварийный отказ [25], а в работе [26] предложена адаптивная система fault-tolerant control (FTC) с оценкой параметров для компенсации последствий повреждений статора.

Описанные возможности были подтверждены в ходе имитационного моделирования. В частности, было проведено сравнение двух вариантов дизайн-решений, отличающихся тем, что во втором варианте был реализован блок адаптивной подстройки параметров асинхронного электродвигателя. На рисунке 2 представлен график накопления отказов в имитированной популяции асинхронных электродвигателей в условиях отсутствия преадаптации. По оси абсцисс отложено количество циклов моделирования (от 0 до 10), по оси ординат — количество экземпляров, вышедших за пределы допустимых параметров, таких как скольжение и сопротивление обмоток.

В интервале от 0 до 1 цикла количество отказов не превышает единичных значений, что свидетельствует о первоначальной устойчивости системы. Однако начиная со 2-го цикла фиксируется резкий рост отказов, указывающий на критический фазовый переход от стабильного состояния к деградации. В интервале между 2 и 6 циклами прирост

отказов сохраняет высокий темп, достигая к 6-му циклу значений порядка 140 экземпляров, что подтверждает наличие лавинообразного эффекта, характерного для поздней стадии износа технических систем.

С 7-го по 10-й цикл темп роста отказов замедляется, и кривая постепенно выходит на насыщение, что означает истощение ресурса основной части популяции: остаются лишь те экземпляры, чьи параметры изначально находились ближе к центру допустимого диапазона.

Таким образом, кривая демонстрирует типичное поведение деградирующей системы без компенсирующих механизмов, с ранним началом отказов и быстрым достижением насыщения, что подтверждает недостаточную устойчивость системы.

В целях выявления влияния механизмов аффорданской коррекции на динамику отказов была проведена серия имитационных экспериментов с активной адаптацией параметров в критическом интервале эксплуатационного старения. Для этого в модель цифрового двойника асинхронного электропривода была внедрена функция предиктивного реагирования, активируемая на промежутке с 2 по 6 цикл моделирования. Данная функция позволяет системе отслеживать эволюцию параметров, прогнозировать их поведение и корректировать режимы работы с целью удержания характеристик в допустимых пределах.

На рисунке 3 представлен график динамики накопления отказов в условиях адаптивной подстройки параметров. Кривая демонстрирует два режима работы. В интервале 0–6 циклов прирост отказов отсутствует, что обусловлено действием механизма адаптивной коррекции, активируемого в моделировании с 2 по 6 цикл. В этот период параметры системы стабилизируются, несмотря на начавшееся накопление эксплуатационных изменений, и не достигают критических уровней, что подтверждает высокую эффективность краткосрочного прогностического вмешательства в рамках модели аффорданской преадаптации.

Начиная с 7-го цикла, адаптивное воздействие в модели отключается, и кривая отказов приобретает ускоряющийся характер. Интенсивный рост наблюдается после 8-го цикла, когда накопленные отклонения параметров выходят за пределы допустимых значений, вызывая лавинообразное увеличение числа отказов. Это свидетельствует о переходе системы в фазу деградации, ранее сдерживаемую адаптацией.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают гипотезу о нелинейной динамике деградации технической системы и подчёркивают критическую роль своевременной адаптивной коррекции. Интервал 2–6 циклов следует рассматривать как ключевой для реализации механизмов управления режимами работы, направленных на предотвращение фазового перехода к массовым отказам. Полученная динамика наглядно демонстрирует необходимость регулярной актуализации прогностических алгоритмов.

Полученные результаты подтверждают, что при эксплуатационном старении асинхронного двигателя в первую очередь должен расти параметр сопротивления обмотки статора  $R_s$ , поскольку его увеличение обусловлено деградацией изоляции, окислением соединений, локальными перегревами и ухудшением теплопроводности, что делает  $R_s$  надёжным первичным индикатором старения.

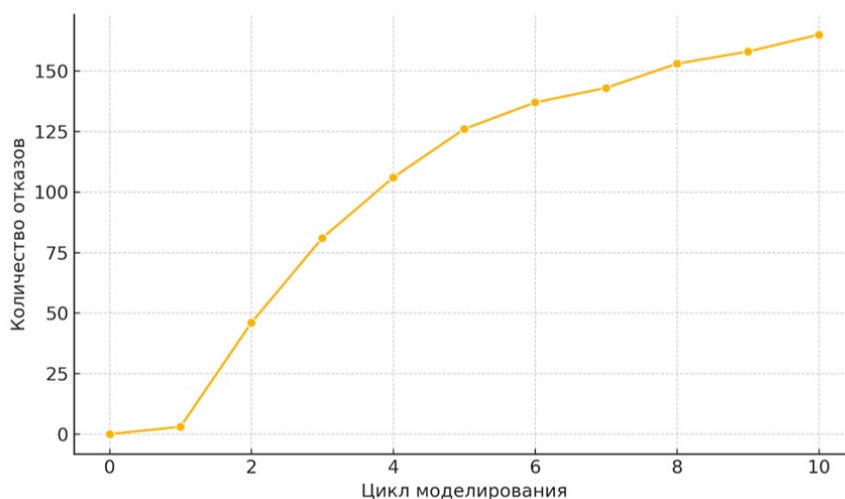


Рисунок 2 - Показатели надежности дизайн-решения без блока адаптации  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.92.2>

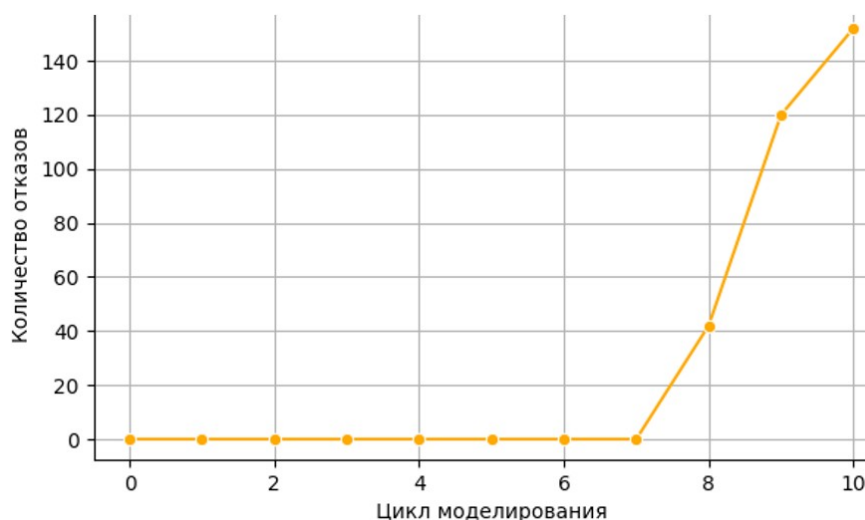


Рисунок 3 - Показатели надежности дизайн-решения с адаптацией в критическом интервале  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.92.3>

### Заключение

В работе предложен формализованный критерий преадаптации для сравнительного анализа перспективных инженерных решений в условиях разных требований эксплуатации. В основу критерия положено понятие аффорданса как измеримой характеристики функциональных возможностей технической системы, воспринимаемой в контексте назначения и условий ее применения. Показано, что увеличение числа потенциальных аффордансов без существенного изменения конструкции отражает способность системы к адаптации в соответствии с условиями эксплуатации.

Практическая реализация предложенного подхода проиллюстрирована на примере решения задачи анализа надежности асинхронного электродвигателя шнекового экструдера. Применение критерия преадаптации позволяет выделить влияющие на надежность параметры и определить направление поиска новых дизайн-решений. В рассмотренном примере был выявлен параметр сопротивления обмотки статора и механизм продления срока эксплуатации путем блока адаптивной подстройки параметров асинхронного электродвигателя.

Результаты имитационного моделирования подтвердили, что параметры сопротивления обмотки статора являются наиболее чувствительными к эксплуатационному старению и критичны для формирования прогностической модели. Преадаптация, реализованная через раннюю аффордансную диагностику и адаптивную модификацию цифровой модели, позволяет отсрочить наступление отказов и повысить устойчивость системы при переходе к новым режимам работы. Предложенный критерий может быть применен для обоснования решений в рамках цифрового инжиниринга, поддержки инженерного творчества, а также разработки интеллектуальных систем технической диагностики и управления ресурсом электромеханических объектов. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы при проектировании геофизических и геологических аппаратов и установок, в том числе при научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах направленных на повышение эффективности шнековых буровых установок.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Карлов А.Г. Особенности алгоритмов решения изобретательских задач и софта для поддержки процессов проектирования средств автоматизации инструментами ОТСМ-ТРИЗ технологий. / А.Г. Карлов, Н.А. Шпаковский // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. — 2018. — № 4. — С. 3–16.
2. Боровков А.И. Цифровой инжиниринг для создания изделий высокой степени технологической сложности на основе цифровых двойников. / А.И. Боровков, В.Ю. Кулемин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. — 2024. — № 3. — С. 98–104.
3. Карелов С.В. «Ловушка Гудхарта» для AGI: проблема сравнительного анализа искусственного интеллекта и интеллекта человека. / С.В. Карелов // Ученые записки Института психологии РАН. — 2023. — № 3 (3). — С. 5–22.

4. Асмолов А.Г. Преадаптация к неопределенности как стратегия навигации развивающихся систем: маршруты эволюции. / А.Г. Асмолов, Е.Д. Шехтер, А.М. Черноризов // Вопросы психологии. — 2017. — № 4. — С. 3–26.
5. Асмолов А.Г. Парадокс сосуществования адаптации и преадаптации в историко-эволюционном процессе. / А.Г. Асмолов, Е.Д. Шехтер, А.М. Черноризов // Вопросы психологии. — 2021. — № 4. — С. 3–20.
6. Ardila A. The Evolutionary Concept of “Preadaptation” Applied to Cognitive Neurosciences. / A. Ardila // *Frontiers in Neuroscience*. — 2016. — № 10. — DOI: 10.3389/fnins.2016.00103
7. Redko V. Towards constructing an autonomous agent-scientist. / V. Redko. // *Advances in Intelligent Systems and Computing*; edited by Boris M. Velichkovsky Pavel M. Balaban Vadim L. Ushakov — Cham: Springer, 2021. — P. 656–662. — URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-71637-0\\_75](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-71637-0_75). (accessed: 20.05.25). doi: 10.1007/978-3-030-71637-0\_75
8. Cattani G. Technological pre-adaptation, speciation, and emergence of new technologies: How Corning invented and developed fiber optics. / G. Cattani // *Industrial and Corporate Change*. — 2006. — № 15 (2). — P. 285–318. — URL: <https://doi.org/10.1093/icc/dtj016> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1093/icc/dtj016
9. Kim J. SSRN Electronic Journal [Electronic source] / J. Kim, D Jeong, J.-D. Lee // *Veiled Effort of Technological Innovation: Pre-adaptation*. — 2024. — URL: <https://ssrn.com/abstract=4901272>. (accessed: 20.05.25) doi: 10.2139/ssrn.4901272
10. Muthirayan D. Cognitive Preadaptation for Resilient Adaptive Control. / D. Muthirayan, P. P. Khargonekar. // *AIAA Scitech 2021 Forum*; — Reston, Va: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2021. — URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-0786>. (accessed: 20.05.25). doi: 10.2514/6.2021-0786
11. Dew N. Pre-adaptation, exaptation and technology speciation: A comment on Cattani (2006). / N. Dew // *Industrial and Corporate Change*. — 2007. — № 16 (1). — P. 155–160. — URL: <https://doi.org/10.1093/icc/dtl036> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1093/icc/dtl036
12. He Y. SSRN Electronic Journal [Electronic source] / Y. He, J.-D Lee, S. Lee // *Innovation Beyond Intention: Harnessing Exaptation for Technological Breakthroughs*. — 2024. — URL: <https://ssrn.com/abstract=5043999>. (accessed: 20.05.25) doi: 10.2139/ssrn.5043999
13. Gaddefors J. Regional development through entrepreneurial exaptation: Epistemological displacement, affordances, and collective agency in rural regions. / J. Gaddefors, S. Korsgaard, M. B. Ingstrup // *Journal of Rural Studies*. — 2019. — Vol. 74. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.10.010> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1016/j.jrurstud.2019.10.010
14. Bubeck S. arXiv [Electronic source] / S. Bubeck, V. Chandrasekaran, R. Eldan et al. // *Sparks of Artificial General Intelligence: Early experiments with GPT-4*. — 2023. — URL: <https://arxiv.org/abs/2303.12712>. (accessed: 20.05.25) doi: 10.48550/arXiv.2303.12712
15. Greeno J. G. Gibson’s affordances. / J. G. Greeno // *Psychological Review*. — 1994. — № 101 (2). — P. 336–342. — URL: <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.336> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1037/0033-295X.101.2.336
16. Heras-Escribano M. The Philosophy of Affordances / M. Heras-Escribano. — Cham: Palgrave Macmillan, 2019. — 232 p. — URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98830-6>. (accessed: 20.05.25). doi: 10.1007/978-3-319-98830-6
17. Иващенко А.В. Информационные технологии поддержки инженерного мышления в едином информационном пространстве предприятия / А.В. Иващенко, М.А. Терехин // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. — 2024. — Т. 13. — № 4 (68). — С. 46–54.
18. Ivanov D. V. Identification of parameters of induction motor with error of speed sensor. / D. V. Ivanov, I. L. Sandler, D. I. Mitroshin et al. // *Journal of Physics: Conference Series*; — Bristol: IOP Publishing, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2176/1/012027
19. Sandler I. L. Simulation of a Circular Interpolator Developed According to the Principle of Differential Analyzers on the Basis of Two Coordinate Electric Servo Drives with a Stepper Electric Motor. / I. L. Sandler, A. A Rudakov, S. A. Kolpashchikov et al. // *Russian Electrical Engineering*. — 2023. — Vol. 94. — № 10. — P. 736–741. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3103/S1068371223100097> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.3103/S1068371223100097
20. Сандлер И.Л. Моделирование кругового интерполятора, построенного по принципу дифференциальных анализаторов, на базе двухкоординатных следящих электроприводов с шаговым электродвигателем. / И.Л. Сандлер, А.А. Рудаков, С.А. Колпащиков и др. // *Электротехника*. — 2023. — № 10. — С. 39–44. — DOI: 10.53891/00135860\_2023\_10\_39
21. Иванов Д.В. Исследование влияния величины скорости на идентификацию параметров асинхронных двигателей со скоростной ошибкой, применяемых в АПК. / Д.В. Иванов, И.Л. Сандлер, С.И. Макаров и др. // *Вестник НГИЭИ*. — 2024. — № 6 (157). — С. 42–55. — DOI: 10.24412/2227-9407-2024-6-42-55
22. Ivanov D. V. On Instrumental Variable-Based Method for Identification of Permanent Magnet Synchronous Machine by Noisy Data. / D. V. Ivanov, I. L. Sandler, Z. Yakoub et al. // *2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*; — Usa (Ieee): IEEE, 2022. — P. 138–142. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9973900>. (accessed: 20.05.25). doi: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973900
23. Mamchur D. An analysis on induction motor reliability and lifetime estimation methods. / D. Mamchur, S. Husach // *Przegląd Elektrotechniczny*. — 2020. — Vol. 97. — № 12. — P. 218–221. — URL: <https://pe.org.pl/articles/2020/12/47.pdf> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.15199/48.2020.12.47
24. Kim J. Detection of High Resistance Contacts in the Electrical Distribution System during the Induction Motor Starting Transient. / J. Kim, S. B. Lee // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. — 2024. — Vol. 39. — № 4. — P. 2480–2489. — URL: <https://doi.org/10.1109/TEC.2024.3418853> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1109/TEC.2024.3418853
25. Байдюк М.А. Методы диагностики обмотки статора асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / М.А. Байдюк, К.В. Константинов // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. — 2023. — Т. 16. — № 8. — С. 87–98. — DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-87-98

26. Dybkowski M. Induction motor stator faults identification using modified MRAS type estimator. / M. Dybkowski, P. Majdański // *Przegląd Elektrotechniczny*. — 2023. — Vol. 99. — № 5. — P. 214–219. — URL: <https://pe.org.pl/articles/2023/5/37.pdf> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.15199/48.2023.05.37

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Karlov A.G. Osobennosti algoritmov resheniya izobretatel'skix zadach i softa dlya podderzhki processov proektirovaniya sredstv avtomatizatsii instrumentami OTSM-TRIZ tehnologij [Features Of Algorithms Of The Decision Of Inventive Problems And Software For Support Of Processes Of Designing Of Means Of Automation By Tools Otism-Triz-Techniques]. / A.G. Karlov, N.A. Shpakovskij // *Automation and Measurement in Mechanical Engineering and Instrument Engineering*. — 2018. — № 4. — P. 3–16. [in Russian]
2. Borovkov A.I. Cifrovoy inzhiniring dlya sozdaniya izdelij vy'sokoj stepeni texnologicheskoy slozhnosti na osnove cifrov'yx dvoynikov [Digital Engineering for the Creation of Products of High Degree of Technological Complexity Based on Digital Twins]. / A.I. Borovkov, V.Yu. Kulemin // *Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*. — 2024. — № 3. — P. 98–104. [in Russian]
3. Karelov S.V. «Lovushka Gudxarta» dlya AGI: problema sravnitel'nogo analiza iskusstvennogo intellekta i intellekta cheloveka [The "Goodhart's trap" for AGI: The Problem of Comparative Analysis of Artificial Intelligence and Human Intelligence]. / S.V. Karelov // *Proceedings of the Institute of Psychology of Russian Academy of Sciences*. — 2023. — № 3 (3). — P. 5–22. [in Russian]
4. Asmolov A.G. Preadaptatsiya k neopredelennosti kak strategiya navigatsii razvivayushhixsya sistem: marshruty e'volyuicii [Preadaptation to Uncertainty as a Strategy of Developing Systems Navigation: The Way of Evolution]. / A.G. Asmolov, E.D. Shexter, A.M. Chernorizov // *Psychological issues*. — 2017. — № 4. — P. 3–26. [in Russian]
5. Asmolov A.G. Paradoks sosushhestvovaniya adaptatsii i preadaptatsii v istoriko-e'volucionnom processe [The paradox of coexistence of adaptation and pre-adaptation in the historical-evolutionary process]. / A.G. Asmolov, E.D. Shexter, A.M. Chernorizov // *Psychology issues*. — 2021. — № 4. — P. 3–20. [in Russian]
6. Ardila A. The Evolutionary Concept of “Preadaptation” Applied to Cognitive Neurosciences. / A. Ardila // *Frontiers in Neuroscience*. — 2016. — № 10. — DOI: 10.3389/fnins.2016.00103
7. Redko V. Towards constructing an autonomous agent-scientist. / V. Redko. // *Advances in Intelligent Systems and Computing*; edited by Boris M. Velichkovsky Pavel M. Balaban Vadim L. Ushakov — Cham: Springer, 2021. — P. 656–662. — URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-71637-0\\_75](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-71637-0_75). (accessed: 20.05.25). doi: 10.1007/978-3-030-71637-0\_75
8. Cattani G. Technological pre-adaptation, speciation, and emergence of new technologies: How Corning invented and developed fiber optics. / G. Cattani // *Industrial and Corporate Change*. — 2006. — № 15 (2). — P. 285–318. — URL: <https://doi.org/10.1093/icc/dtj016> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1093/icc/dtj016
9. Kim J. SSRN Electronic Journal [Electronic source] / J. Kim, D Jeong, J.-D. Lee // *Veiled Effort of Technological Innovation: Pre-adaptation*. — 2024. — URL: <https://ssrn.com/abstract=4901272>. (accessed: 20.05.25) doi: 10.2139/ssrn.4901272
10. Muthirayan D. Cognitive Preadaptation for Resilient Adaptive Control. / D. Muthirayan, P. P. Khargonekar. // *AIAA Scitech 2021 Forum*; — Reston, Va: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2021. — URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-0786>. (accessed: 20.05.25). doi: 10.2514/6.2021-0786
11. Dew N. Pre-adaptation, exaptation and technology speciation: A comment on Cattani (2006). / N. Dew // *Industrial and Corporate Change*. — 2007. — № 16 (1). — P. 155–160. — URL: <https://doi.org/10.1093/icc/dtl036> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1093/icc/dtl036
12. He Y. SSRN Electronic Journal [Electronic source] / Y. He, J.-D Lee, S. Lee // *Innovation Beyond Intention: Harnessing Exaptation for Technological Breakthroughs*. — 2024. — URL: <https://ssrn.com/abstract=5043999>. (accessed: 20.05.25) doi: 10.2139/ssrn.5043999
13. Gaddefors J. Regional development through entrepreneurial exaptation: Epistemological displacement, affordances, and collective agency in rural regions. / J. Gaddefors, S. Korsgaard, M. B. Ingstrup // *Journal of Rural Studies*. — 2019. — Vol. 74. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.10.010> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1016/j.jrurstud.2019.10.010
14. Bubeck S. arXiv [Electronic source] / S. Bubeck, V. Chandrasekaran, R. Eldan et al. // *Sparks of Artificial General Intelligence: Early experiments with GPT-4*. — 2023. — URL: <https://arxiv.org/abs/2303.12712>. (accessed: 20.05.25) doi: 10.48550/arXiv.2303.12712
15. Greeno J. G. Gibson's affordances. / J. G. Greeno // *Psychological Review*. — 1994. — № 101 (2). — P. 336–342. — URL: <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.336> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1037/0033-295X.101.2.336
16. Heras-Escribano M. The Philosophy of Affordances / M. Heras-Escribano. — Cham: Palgrave Macmillan, 2019. — 232 p. — URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98830-6>. (accessed: 20.05.25). doi: 10.1007/978-3-319-98830-6
17. Ivashchenko A.V. Informatsionnie tekhnologii podderzhki inzhenernogo mishleniya v yednom informatsionnom prostranstve predpriyatiya [Engineering Creativity Support Information Technologies in Enterprise Solid Information Space] / A.V. Ivashchenko, M.A. Terekhin // *XXI vek: itogi proshlogo i problemi nastoyashchego plus [XXI Century: Outcomes of the Past and Challenges of the Present Plus]*. — 2024. — Vol. 13. — № 4 (68). — P. 46–54. [in Russian]
18. Ivanov D. V. Identification of parameters of induction motor with error of speed sensor. / D. V. Ivanov, I. L. Sandler, D. I. Mitroshin et al. // *Journal of Physics: Conference Series*; — Bristol: IOP Publishing, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2176/1/012027
19. Sandler I. L. Simulation of a Circular Interpolator Developed According to the Principle of Differential Analyzers on the Basis of Two Coordinate Electric Servo Drives with a Stepper Electric Motor. / I. L. Sandler, A. A Rudakov, S. A.

- Kolpashchikov et al. // Russian Electrical Engineering. — 2023. — Vol. 94. — № 10. — P. 736–741. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3103/S1068371223100097> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.3103/S1068371223100097
20. Sandler I. L. Modelirovanie krugovogo interpolatora, postroennogo po principu differencial'ny'x analizatorov, na baze dvuxkoordinatny'x sledyashhix e'lektroprivodov s shagovy'm e'lektrodvigatelem [Simulation of a Circular Interpolator Built According to the Principle of Differential Analyzers Based on Two-Axis Tracking Electric Drives with a Stepper Motor]. / I. L. Sandler, A. A. Rudakov, S. A. Kolpashchikov et al. // Electrotechnics. — 2023. — № 10. — P. 39–44. — DOI: 10.53891/00135860\_2023\_10\_39 [in Russian]
21. Ivanov D. V. Issledovanie vliyaniya velichiny' skorosti na identifikatsiyu parametrov asinxronny'x dvigatelej so skorostnoj oshibkoj, primenyaemy'x v APK [Influence of speed magnitude on parameter identification of induction motors with speed sensor error applied in agricultural machinery]. / D. V. Ivanov, I. L. Sandler, S. I. Makarov et al. // Bulletin of NGIJeI. — 2024. — № 6 (157). — P. 42–55. — DOI: 10.24412/2227-9407-2024-6-42-55 [in Russian]
22. Ivanov D. V. On Instrumental Variable-Based Method for Identification of Permanent Magnet Synchronous Machine by Noisy Data. / D. V. Ivanov, I. L. Sandler, Z. Yakoub et al. // 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA); — Usa (Ieee): IEEE, 2022. — P. 138–142. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9973900>. (accessed: 20.05.25). doi: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973900
23. Mamchur D. An analysis on induction motor reliability and lifetime estimation methods. / D. Mamchur, S. Husach // Przegląd Elektrotechniczny. — 2020. — Vol. 97. — № 12. — P. 218–221. — URL: <https://pe.org.pl/articles/2020/12/47.pdf> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.15199/48.2020.12.47
24. Kim J. Detection of High Resistance Contacts in the Electrical Distribution System during the Induction Motor Starting Transient. / J. Kim, S. B. Lee // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2024. — Vol. 39. — № 4. — P. 2480–2489. — URL: <https://doi.org/10.1109/TEC.2024.3418853> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.1109/TEC.2024.3418853
25. Baidyuk M. A. Metodi diagnostiki obmotki statora asinkhronnikh dvigatelei s korotkozamknutim rotorom [Diagnostic methods for stator winding of squirrel-cage induction motors] / M. A. Baidyuk, K. V. Konstantinov // Izvestiya SPbGETU «LETI» [Proceedings of SPbGJeTU «LJeTI»]. — 2023. — Vol. 16. — № 8. — P. 87–98. — DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-87-98 [in Russian]
26. Dybkowski M. Induction motor stator faults identification using modified MRAS type estimator. / M. Dybkowski, P. Majdański // Przegląd Elektrotechniczny. — 2023. — Vol. 99. — № 5. — P. 214–219. — URL: <https://pe.org.pl/articles/2023/5/37.pdf> (accessed: 20.05.25). — DOI: 10.15199/48.2023.05.37