

Моделирование критических когнитивных состояний для предиктивного тестирования пользовательских интерфейсов

П. А. Панилов

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Российская Федерация
Адрес: 105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1
panilovp.a@bmstu.ru

Аннотация

В статье предлагается когнитивно-ориентированный подход к предиктивному тестированию пользовательских интерфейсов, основанный на моделировании фазовой динамики взаимодействия пользователя с программной системой. В отличие от традиционных методов тестирования, ориентированных преимущественно на функциональную корректность и статические сценарии, предложенная модель рассматривает взаимодействие как нелинейный динамический процесс, описываемый системой уравнений вида $\dot{x}(t) = F(z(t), u(t))$, где $z(t)$ – вектор когнитивного состояния, а $u(t)$ – интерфейсные воздействия. Когнитивное состояние представлено расширенным вектором параметров, включающим информационную нагрузку, уровень напряжения, интенсивность внешних воздействий и когнитивную устойчивость. Введено понятие критической фазы когнитивного состояния, определяемой как область фазового пространства, в которой возрастает вероятность ошибок взаимодействия. Показано, что переход в критическое состояние обусловлен не только текущими значениями параметров, но и динамикой их изменения, что соответствует концепции ранних предупреждающих сигналов в теории нелинейных систем. Для количественной оценки уязвимости интерфейса разработана функция когнитивного риска $R(t) = \psi(z(t), \dot{x}(t))$, интерпретируемая как мера близости системы к границе устойчивости. Результаты моделирования демонстрируют возможность выявления предкритических состояний до возникновения явных ошибок пользователя. Предложенный подход обеспечивает переход от реактивного анализа дефектов к предиктивной оценке устойчивости взаимодействия и может служить основой для разработки интеллектуальных инструментов когнитивного тестирования интерфейсов.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, пользовательский интерфейс, предиктивное тестирование, фазовое пространство, нелинейная динамика, когнитивная устойчивость, фазовые переходы, устойчивость динамических систем

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Панилов П. А. Моделирование критических когнитивных состояний для предиктивного тестирования пользовательских интерфейсов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2026. Т. 22, № 1. С. 76-87. <https://doi.org/10.25559/SITITO.022.202601.76-87>

© Панилов П. А., 2026



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Modeling of Critical Cognitive States for Predictive Testing of User Interfaces

P. A. Panilov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
Address: 5, 2nd Baumanskaya St., building 2, Moscow 105005, Russian Federation
panilovp.a@bmstu.ru

Abstract

This paper proposes a cognitive-oriented approach to predictive testing of user interfaces based on modeling the phase dynamics of user–system interaction. Unlike traditional testing methods primarily focused on functional correctness and static interaction scenarios, the proposed framework considers interaction as a nonlinear dynamic process described by a system of differential equations of the form $\dot{x}(t) = F(z(t), u(t))$, where $z(t)$ represents the cognitive state vector and $u(t)$ denotes interface-driven stimuli. The cognitive state is modeled as an extended vector including information load, tension level, external influences, and cognitive stability. The concept of a critical cognitive phase is introduced and defined as a region of the phase space in which the probability of interaction errors significantly increases. It is shown that transitions to critical states depend not only on the current parameter values but also on their temporal derivatives, which corresponds to the concept of early warning signals in nonlinear dynamical systems. To quantitatively assess interface vulnerability, a cognitive risk function $R(t) = \psi(z(t), \dot{x}(t))$ is developed and interpreted as a measure of proximity to the stability boundary in phase space. Simulation results demonstrate the capability of the model to detect precritical states before explicit user errors occur. The proposed approach enables a transition from reactive defect analysis to predictive evaluation of interaction stability and provides a theoretical foundation for intelligent cognitive testing tools for software user interfaces.

Keywords: cognitive modeling, user interface, predictive testing, phase space, nonlinear dynamics, cognitive stability, critical states, bifurcation, cognitive risk function, early warning signals, phase transitions, dynamical system stability

Conflict of interests: The author declares no conflict of interests.

For citation: Panilov P.A. Modeling of Critical Cognitive States for Predictive Testing of User Interfaces. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2026;22(1):76-87. <https://doi.org/10.25559/SITITO.022.202601.76-87>



Введение

Современные программные системы характеризуются высокой сложностью пользовательских интерфейсов, значительным количеством сценариев взаимодействия и возрастающей когнитивной нагрузкой на пользователя. В условиях цифровой трансформации интерфейсы перестают быть статическими средствами ввода и отображения информации и превращаются в динамические среды принятия решений, в которых пользователь непрерывно адаптируется к изменяющимся условиям взаимодействия [1, 2]. В результате качество работы системы определяется не только корректностью алгоритмов и архитектуры программного обеспечения, но и особенностями когнитивной динамики пользователя, включая восприятие информации, распределение внимания, формирование ментальных моделей и принятие решений.

Традиционные методы тестирования программного обеспечения преимущественно ориентированы на проверку функциональной корректности, устойчивости к ошибкам и соответствия спецификациям. Даже современные подходы к тестированию пользовательских интерфейсов, включая *UI testing*, *usability testing* и *model-based testing*, в большинстве случаев рассматривают взаимодействие как последовательность дискретных действий или сценариев, не учитывая динамическую эволюцию когнитивного состояния пользователя во времени [3–5]. Это приводит к тому, что значительная часть дефектов взаимодействия — особенно возникающих при накоплении когнитивной нагрузки, переключении контекста или неоднозначности интерфейсных решений — остаётся вне зоны анализа.

С когнитивной точки зрения взаимодействие человека с программным интерфейсом представляет собой нелинейный динамический процесс, в котором состояние пользователя изменяется под влиянием интерфейсных событий, внешних факторов и собственной истории взаимодействия. Ограниченность внимания, инерционность когнитивных процессов и наличие эффектов накопления нагрузки приводят к тому, что одинаковые последовательности действий могут приводить к различным результатам в зависимости от предшествующего состояния пользователя. Это свидетельствует о необходимости перехода от статических моделей тестирования к представлению взаимодействия как динамической системы в расширенном пространстве состояний [6].

Одним из ключевых явлений в динамике когнитивного взаимодействия является существование критических состояний, характеризующихся снижением когнитивной устойчивости и повышенной вероятностью ошибок [7, 8]. В таких состояниях даже незначительные изменения интерфейса или дополнительная информационная нагрузка могут приводить к резкому ухудшению качества взаимодействия, ошибкам принятия решений и потере контекста пользователем. Несмотря на важность данного явления, существующие инженерные методы тестирования практически не используют формализованные модели критических когнитивных фаз и не позволяют предсказывать их возникновение [9].

В области когнитивного моделирования и теории динамических систем разработаны подходы к анализу фазовых переходов, устойчивости и нелинейных режимов поведения, однако их интеграция в задачи программной инженерии и тестиро-

вания пользовательских интерфейсов остаётся ограниченной [10, 11]. Существующие когнитивные архитектуры обладают высокой объяснительной способностью, но редко применяются в инженерной практике тестирования, тогда как методы машинного обучения зачастую обеспечивают высокую точность прогнозирования, но обладают ограниченной интерпретируемостью и не позволяют выявлять структурные причины возникновения критических состояний [12–14].

Таким образом, возникает методологический разрыв между когнитивными теориями взаимодействия человека и инженерными методами тестирования программных систем. Преодоление данного разрыва требует разработки математических моделей, способных описывать фазовую структуру когнитивного взаимодействия, формализовать критические состояния и обеспечивать количественную оценку риска ошибок на основе динамики когнитивных параметров [15].

В настоящей работе предлагается подход к моделированию критических когнитивных состояний пользователя на основе представления взаимодействия с программным интерфейсом как нелинейной динамической системы в фазовом пространстве когнитивных параметров. Вводится формализация критической когнитивной фазы, учитывающая не только текущие значения параметров состояния, но и их динамику, а также предлагается функционал когнитивного риска, позволяющий количественно оценивать уязвимые области взаимодействия и прогнозировать возникновение ошибок.

Основные научные результаты работы включают:

- формализацию пространства когнитивных состояний взаимодействия пользователя с интерфейсом;
 - определение критических когнитивных состояний как областей фазового пространства, связанных со снижением устойчивости;
 - введение функционала когнитивного риска, характеризующего вероятность ошибок вдоль траекторий взаимодействия;
 - разработку теоретических оснований предиктивного тестирования интерфейсов на основе анализа фазовой динамики.
- Предложенный подход позволяет интерпретировать тестовые сценарии как траектории в пространстве когнитивных состояний и рассматривать тестирование как задачу анализа устойчивости взаимодействия, что расширяет традиционные методы программной инженерии и открывает возможности для раннего обнаружения дефектов, связанных с когнитивной нагрузкой и динамикой взаимодействия.

Построение модели

В предлагаемом подходе взаимодействие пользователя с программным интерфейсом рассматривается как динамический когнитивный процесс, развивающийся во времени и характеризующийся взаимным влиянием внешних воздействий и внутренних состояний субъекта [16, 17]. В отличие от традиционных методов тестирования, ориентированных преимущественно на проверку функциональной корректности и заранее определённых сценариев использования, рассматриваемая модель акцентирует внимание на эволюции когнитивного состояния пользователя как ключевом факторе возникновения ошибок взаимодействия [18, 19].

Интерфейс трактуется как система генерации когнитивных стимулов, воздействующих на пользователя через информа-



ционную структуру, визуальное представление, последовательность действий и обратную связь [20]. Пользователь, в свою очередь, рассматривается как динамическая система, состояние которой изменяется под воздействием внешних событий и внутренних процессов переработки информации [21–23].

Таким образом, взаимодействие описывается как система со следующими компонентами:

- поток интерфейсных событий $u(t)$, определяющий внешние воздействия;
- скрытое когнитивное состояние пользователя $z(t)$;
- наблюдаемое поведение $x(t)$, включающее действия, задержки и ошибки;
- механизм обратной связи, при котором состояние пользователя влияет на последующие действия.

Формально процесс взаимодействия можно представить как отображение:

$$F: X(t) \rightarrow S(t),$$

где $X(t)$ — параметры взаимодействия, а $S(t)$ — когнитивное состояние пользователя.

Такое представление позволяет перейти от анализа отдельных событий к моделированию непрерывной динамики взаимодействия.

Для описания когнитивной динамики вводится расширенный вектор состояния:

$$z(t) = [I(t), E(t), A_p(t), S_c(t)],$$

где компоненты характеризуют различные аспекты когнитивного функционирования:

$I(t)$ — информационная нагрузка, отражающая сложность воспринимаемых элементов;

$E(t)$ — уровень эмоционального или ментального напряжения;

$A_p(t)$ — устойчивость и распределение внимания;

$S_c(t)$ — когнитивная устойчивость, определяющая способность пользователя поддерживать целостное понимание текущего контекста.

Вектор состояния рассматривается как элемент многомерного фазового пространства $\mathbb{R}^n$, в котором каждая точка соответствует определённой конфигурации когнитивных параметров.

Такое представление позволяет:

- описывать взаимодействие как траекторию в пространстве состояний;
- анализировать устойчивость динамики;
- выявлять области повышенной вероятности ошибок.

Параметры состояния могут оцениваться косвенно на основе наблюдаемых характеристик поведения пользователя, включая временные задержки, частоту исправлений, последовательность действий и другие поведенческие маркеры [24, 25]. Эволюция когнитивного состояния описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{z}(t) = F(z(t), u(t)),$$

где функция отражает зависимость изменения состояния от текущего положения системы и внешних воздействий интерфейса.

Нелинейность модели обусловлена несколькими факторами:

- насыщением когнитивных ресурсов;
- эффектами накопления нагрузки;

- нелинейной зависимостью внимания от сложности задач;
- существованием пороговых эффектов.

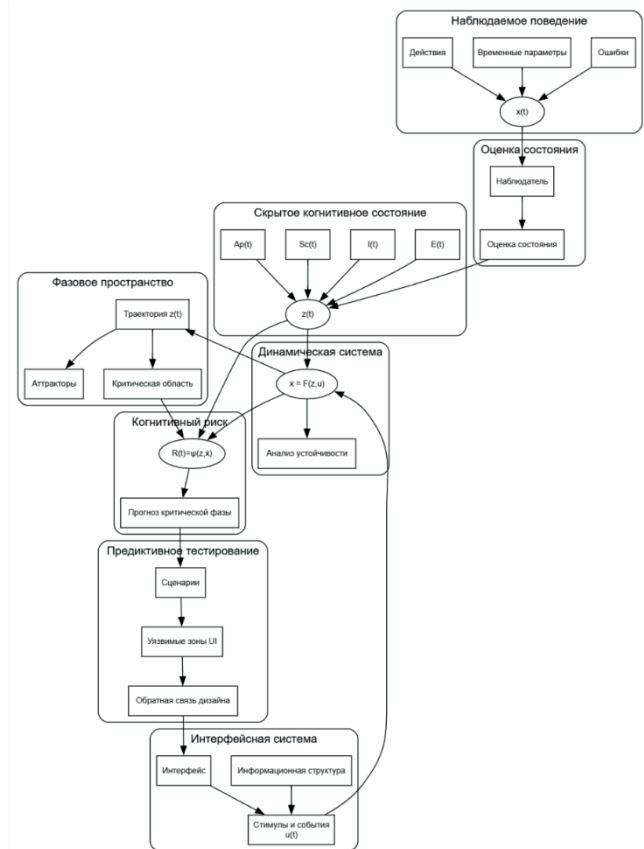
Для анализа устойчивости вводятся стационарные точки:

$$F(z^*, u) = 0,$$

которые соответствуют состояниям когнитивного равновесия. Вблизи таких точек система может демонстрировать устойчивую или неустойчивую динамику в зависимости от спектра якобиана функции FFF.

Структура взаимосвязей модели представлена на рис. 1.

Схема отражает архитектуру когнитивно-динамической модели взаимодействия пользователя с интерфейсом. Интерфейсные воздействия формируют управляющий сигнал, влияющий на скрытое когнитивное состояние пользователя, эволюция которого описывается нелинейной динамической системой. Наблюдаемое поведение используется для оценки состояния, после чего фазовое представление позволяет анализировать устойчивость траекторий и выявлять критические области. Вычисление функции когнитивного риска формирует предиктивный контур тестирования, замыкающийся обратной связью на структуру интерфейса.



Р и с. 1. Структурная схема динамической модели когнитивного состояния и предиктивного тестирования интерфейсов

Fig. 1. Structural diagram of a dynamic model of cognitive state and predictive testing of interfaces

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены автором.
Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the author.



Фазовое пространство когнитивных состояний

Представление взаимодействия в виде фазовой динамики позволяет использовать методы нелинейной динамики и теории устойчивости для анализа пользовательского поведения. Траектория описывает эволюцию состояния пользователя, а геометрия фазового пространства определяет возможные режимы взаимодействия [25,26].

Фазовое пространство обладает следующими ключевыми характеристиками:

- устойчивые области, соответствующие состояниям когнитивного равновесия, при которых пользователь эффективно взаимодействует с интерфейсом;
- переходные зоны, где наблюдается повышенная чувствительность к изменениям интерфейса;
- аттракторы, представляющие устойчивые режимы поведения пользователя (например, автоматизированное выполнение повторяющихся задач);
- области неустойчивости, в которых малые изменения внешних воздействий приводят к существенным изменениям поведения.

С точки зрения нелинейной динамики, устойчивость состояния определяется спектральными свойствами якобиана системы:

$$J = \frac{\partial F}{\partial z}$$

Анализ собственных значений якобиана позволяет определить локальную устойчивость траекторий и выявить потенциальные области перехода к неустойчивым режимам. Использование фазового пространства предоставляет ряд преимуществ:

1. позволяет интерпретировать пользовательские сценарии как геометрические траектории;
2. делает возможным выявление скрытых закономерностей взаимодействия;
3. обеспечивает основу для предиктивного анализа, основанного на положении системы относительно критических областей.

Одним из ключевых аспектов предлагаемой модели является введение понятия критических когнитивных состояний — областей фазового пространства, в которых система демонстрирует повышенную вероятность возникновения ошибок взаимодействия.

Критическая фаза определяется условием:

$$W_c = \{t | S_c(t) < S_{crit}\},$$

где S_{crit} — пороговое значение когнитивной устойчивости.

Однако в отличие от классических пороговых моделей, критическое состояние определяется не только текущими значениями параметров, но и их динамикой. В частности, важным индикатором приближения к критической фазе является скорость изменения состояния:

$$\dot{z}(t)$$

Быстрый рост информационной нагрузки или резкое снижение внимания могут служить предвестниками перехода даже при допустимых текущих значениях переменных. Это соответ-

ствует концепции ранних предупреждающих сигналов, широко используемой в теории нелинейных систем.

С точки зрения динамической теории, переход в критическую фазу может интерпретироваться как бифуркационный процесс, при котором система теряет устойчивость и переходит в новый режим функционирования. В контексте взаимодействия с интерфейсом такими переходами могут быть:

- внезапная потеря контекста задачи;
- увеличение количества ошибок;
- изменение стратегии взаимодействия;
- отказ от выполнения задачи.

Фазовые переходы сопровождаются рядом характерных признаков:

- ростом дисперсии параметров состояния;
- увеличением времени восстановления после ошибок;
- повышением энтропии распределения состояний;
- замедлением реакции системы.

Одним из ключевых элементов предлагаемой модели является введение функции когнитивного риска, предназначенной для количественной оценки вероятности возникновения ошибок взаимодействия в текущем состоянии системы. В отличие от традиционных подходов, основанных на фиксированных метриках usability, функция риска рассматривается как динамическая характеристика, зависящая от положения системы в фазовом пространстве и направления её движения.

Функция когнитивного риска определяется как отображение:

$$R(t) = \psi(z(t), \dot{z}(t)),$$

где:

$z(t)$ — текущий вектор когнитивного состояния;

$\dot{z}(t)$ — скорость изменения состояния;

$\psi(\cdot)$ — нелинейный функционал оценки риска.

Включение производной состояния является принципиальным отличием предлагаемого подхода. Практические наблюдения показывают, что переход в критическое состояние часто определяется не абсолютным уровнем когнитивной нагрузки, а динамикой её изменения. Например, резкое увеличение информационной сложности интерфейса может привести к ошибкам даже при умеренном уровне нагрузки.

Функция риска должна удовлетворять ряду требований:

- монотонность относительно критических параметров, таких как снижение когнитивной устойчивости;
- чувствительность к скорости изменений, позволяющая выявлять предкритические состояния;
- инвариантность к масштабу параметров, обеспечивающая корректность сравнения различных сценариев.

В общем виде функция риска может быть представлена как композиция:

$$R(t) = \sigma(w_1 I(t) + w_2 E(t) - w_3 S_c(t) + w_4 \|\dot{z}(t)\|),$$

где $\sigma(\cdot)$ — нелинейная функция активации (например, сигмоида), а w_i — коэффициенты важности параметров.

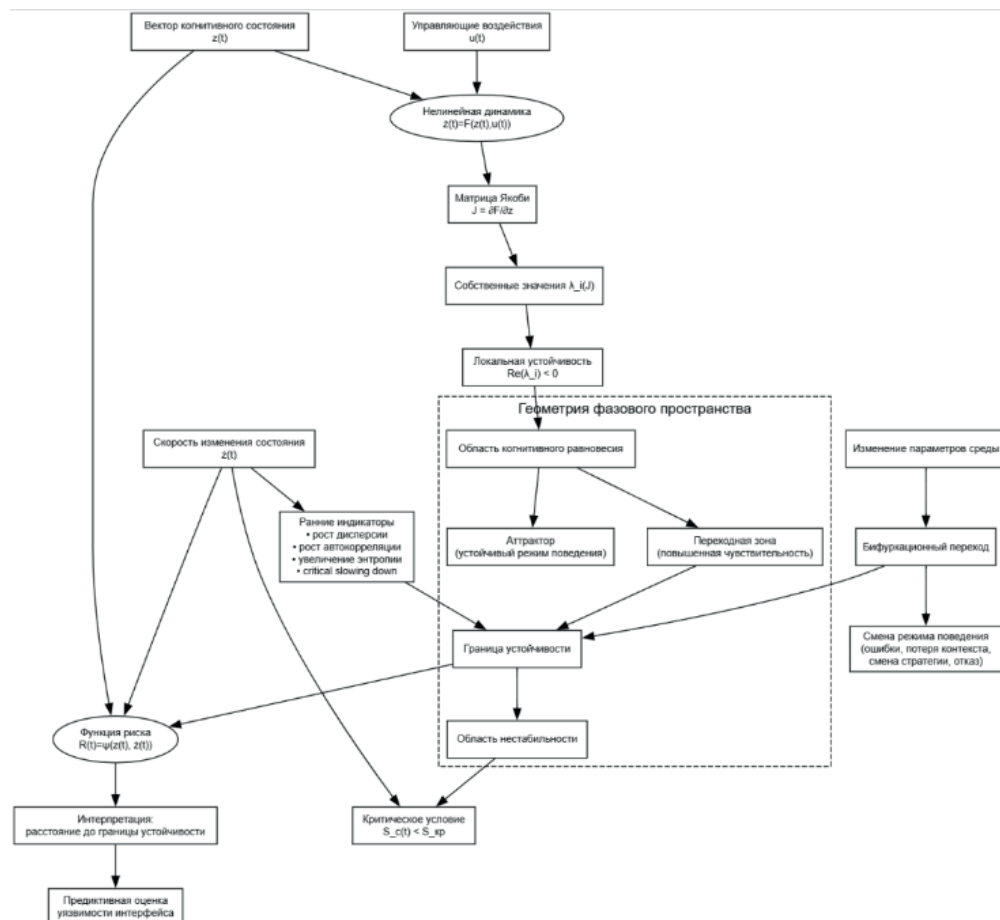
С точки зрения фазового анализа риск можно интерпретировать как функцию расстояния до границы устойчивости. При приближении траектории к критической области происходит рост значения $R(t)$, что позволяет использовать его как ранний индикатор фазового перехода.

Схема на Рис 2 отражает целостную структуру фазовой модели когнитивной динамики пользователя. Динамика описывается



нелинейной системой $\dot{z}(t) = F(z(t), u(t))$, устойчивость которой определяется спектром якобиана. Геометрия фазового пространства формирует области равновесия, переходные зоны и области неустойчивости. При изменении управляющих параметров возможен бифуркационный переход к критическому состоянию. Ранние предупреждающие сигналы и

скорость изменения состояния используются для построения функции когнитивного риска $R(t)$, интерпретируемой как мера близости к границе устойчивости. Модель обеспечивает переход от анализа состояний к предиктивной оценке уязвимости интерфейса.



Р и с. 2. Интегральная модель фазовой динамики, критических состояний и функции когнитивного риска

Fig. 2. Integral model of phase dynamics, critical states, and cognitive risk function

Метод предиктивного тестирования интерфейсов

На основе предложенной динамической модели разработан метод предиктивного тестирования интерфейсов, ориентированный на выявление потенциальных проблем взаимодействия до их проявления в виде ошибок пользователя.

Основная идея метода заключается в интерпретации пользовательских сценариев как траекторий в фазовом пространстве когнитивных состояний. Вместо анализа отдельных событий система рассматривает эволюцию состояния пользователя во времени, что позволяет выявлять скрытые закономерности и переходные процессы.

Метод включает следующие этапы:

1. Сбор данных взаимодействия

Регистрируются параметры поведения пользователя:

- последовательность действий;
- временные задержки;
- частота исправлений;
- реакции на изменения интерфейса.

Полученные данные формируют наблюдаемый вектор $x(t)$.

2. Оценка когнитивного состояния

На основе наблюдаемых данных выполняется восстановление скрытого состояния:

$$z(t) = \Phi(x(t)),$$

где $\Phi(\cdot)$ — оператор оценки состояния, реализуемый через вероятностную или динамическую модель наблюдения.

3. Прогноз динамики

Используя модель

$$\dot{z}(t) = F(z(t), u(t)),$$

выполняется прогноз будущих траекторий взаимодействия при заданных сценариях интерфейса.



4. Вычисление когнитивного риска

Для каждой точки траектории вычисляется функция риска $R(t)$, позволяющая выявлять:

- предкритические состояния;
- зоны нестабильности;
- сценарии с повышенной вероятностью ошибок.

5. Генерация тестовых сценариев

На основе анализа риска выполняется:

- приоритизация тестирования;
- поиск уязвимых элементов интерфейса;
- адаптивное формирование сценариев взаимодействия.

В отличие от традиционного *usability testing*, ориентированного на ретроспективный анализ поведения, предлагаемый метод обеспечивает прогнозирование потенциальных проблем и позволяет рассматривать тестирование как задачу анализа динамической устойчивости когнитивной системы.

Таким образом, интерфейс оценивается не только по фактическим ошибкам пользователей, но и по способности поддерживать устойчивые когнитивные траектории.

Результаты исследования

Для оценки предложенной динамической модели когнитивного состояния было проведено экспериментальное моделирование взаимодействия пользователя с интерфейсом в условиях изменяющейся когнитивной нагрузки. Целью эксперимента являлась демонстрация способности модели выявлять предкритические состояния и прогнозировать переходы в области повышенного когнитивного риска.

В качестве исследуемой системы рассматривался типовой сценарий взаимодействия с программным интерфейсом, включающий последовательность задач с возрастающей информационной сложностью. Такой сценарий отражает реальные условия эксплуатации интерфейсов, в которых пользователь сталкивается с постепенным увеличением нагрузки вследствие

усложнения задач или накопления когнитивного напряжения. Динамика взаимодействия моделировалась через последовательность интерфейсных воздействий $u(t)$, определяющих изменение информационной структуры среды. Вектор когнитивного состояния описывался ранее введённой моделью:

$$z(t) = [I(t), E(t), A_p(t), S_c(t)],$$

где параметры изменялись во времени согласно нелинейной динамике:

$$\dot{z}(t) = F(z(t), u(t)),$$

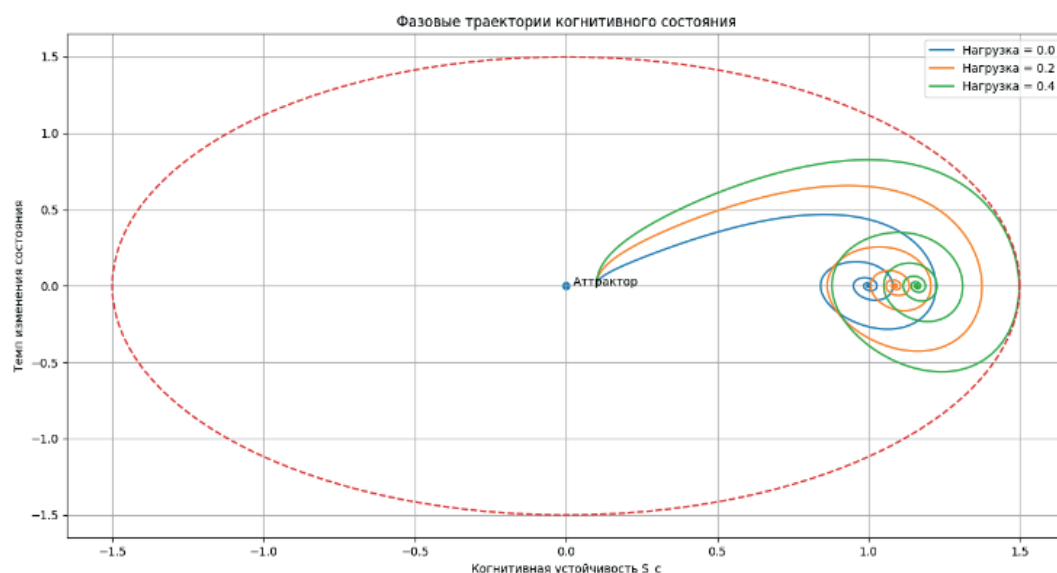
В эксперименте предполагалось, что рост информационной нагрузки приводит к постепенному снижению когнитивной устойчивости, однако переход в критическую фазу зависит также от скорости изменения состояния и накопительных эффектов.

Результаты моделирования были представлены в виде траекторий движения системы в фазовом пространстве когнитивных состояний. Такой подход позволяет визуализировать взаимодействие не как последовательность отдельных событий, а как непрерывный динамический процесс.

Фазовые траектории демонстрируют несколько характерных режимов:

- устойчивое движение в области когнитивного равновесия;
- постепенное смещение траектории к границе устойчивости при росте информационной нагрузки;
- появление нелинейных отклонений, свидетельствующих о снижении устойчивости системы;
- переход в критическую область, сопровождающийся резким изменением поведения.

В начальной фазе взаимодействия траектория стремится к устойчивому аттрактору, соответствующему эффективному выполнению задач пользователем. По мере увеличения сложности интерфейса траектория смещается в область переходных состояний, где система становится более чувствительной к внешним воздействиям (Рис. 3).



Р и с. 3. Фазовые траектории когнитивного состояния при росте информационной нагрузки

F i g. 3. Phase trajectories of the cognitive state under increasing information load

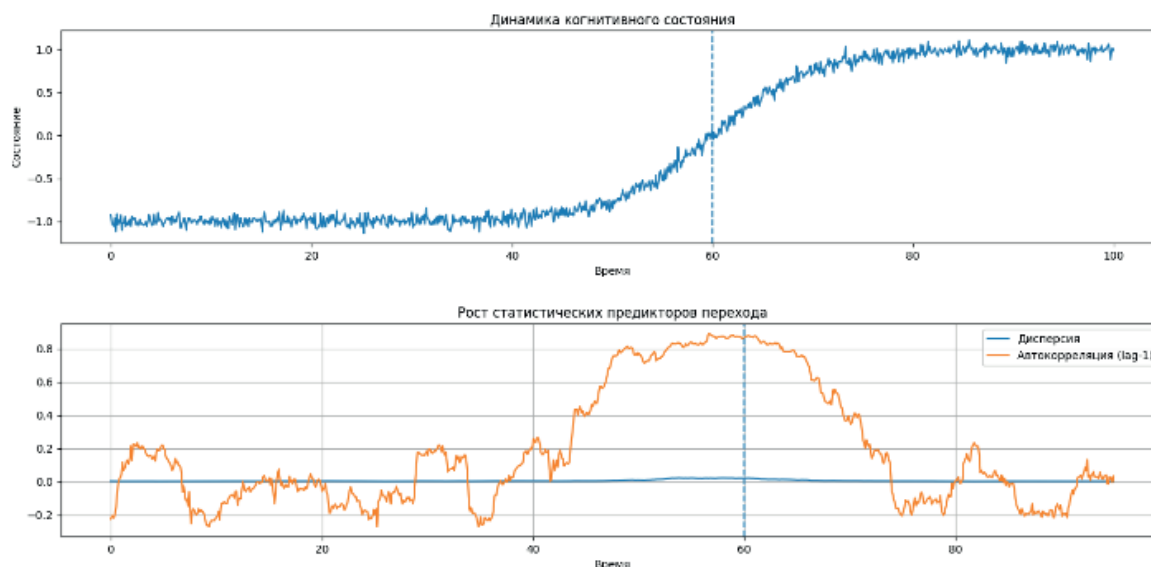


Особенно важным наблюдением является то, что приближение к критической области проявляется в изменении геометрии траектории — увеличении кривизны и снижении скорости возврата к устойчивому состоянию после возмущений. Это соответствует феномену “critical slowing down”, описанному в теории нелинейных динамических систем (Рис. 4).

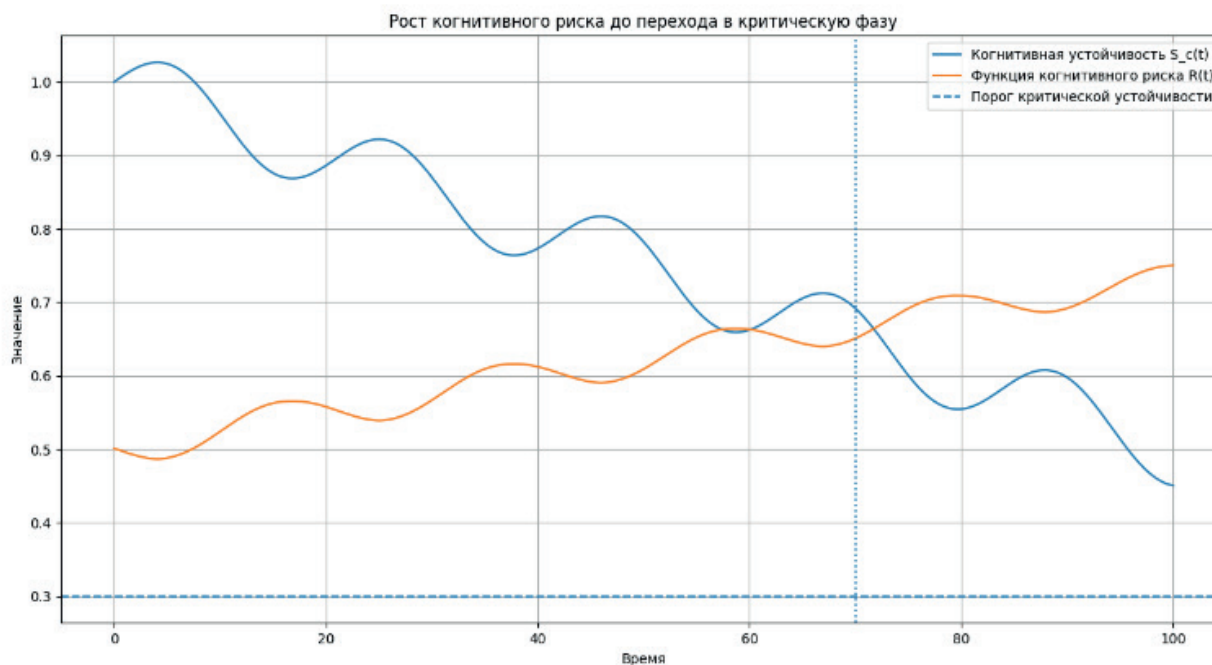
Для количественной оценки устойчивости взаимодействия была вычислена функция когнитивного риска:

$$R(t) = \psi(z(t), \dot{z}(t)).$$

Анализ временных рядов показал, что значение риска начинает возрастать задолго до возникновения явных ошибок пользователя (Рис. 5).



Р и с. 4. Проявление эффекта критического замедления
F i g. 4. The manifestation of the critical slowing down effect



Р и с. 5. Динамика функции когнитивного риска и выявление предкритических состояний
F i g. 5. Dynamics of the cognitive risk function and identification of pre-critical conditions



Это подтверждает гипотезу о существовании предкритических состояний, в которых система остаётся функционально работоспособной, но становится чувствительной к дополнительным нагрузкам.

Рост риска сопровождался следующими признаками:

- увеличением скорости изменения когнитивного состояния;
- снижением когнитивной устойчивости $S_c(t)$;
- повышением вариативности параметров внимания.

Таким образом, функция риска может рассматриваться как ранний индикатор потенциальных проблем взаимодействия. Использование фазового анализа позволило идентифицировать участки сценария взаимодействия, приводящие к переходу системы в критическое состояние. Такие зоны характеризуются комбинацией факторов:

- резкое увеличение информационной плотности интерфейса;
- необходимость частых переключений внимания;
- сложные последовательности действий без достаточной обратной связи.

В отличие от традиционных методов usability testing, выявляющих проблемы постфактум, предложенный подход позволяет обнаруживать потенциально проблемные элементы интерфейса на основе анализа динамики когнитивного состояния.

Обсуждение и заключение

Полученные результаты подтверждают корректность и практическую применимость предложенной фазовой модели когнитивной динамики взаимодействия пользователя с интерфейсом. В отличие от традиционных методов тестирования, ориентированных преимущественно на фиксацию функциональных ошибок и статических метрик удобства использования, разработанный подход рассматривает взаимодействие как непрерывный нелинейный динамический процесс.

Экспериментальное моделирование показало, что представление пользовательского поведения в виде траекторий в фазовом пространстве позволяет выявлять скрытые закономерности эволюции когнитивного состояния. Особое значение имеет возможность интерпретации сценариев взаимодействия как геометрических траекторий, приближающихся к границе устойчивости. Такой подход делает видимой структуру переходных режимов, которые в классических методах остаются латентными.

Анализ фазовых траекторий продемонстрировал наличие устойчивых областей, соответствующих состояниям когнитивного равновесия, а также переходных зон, характеризующихся повышенной чувствительностью системы к внешним воздействиям. При росте информационной нагрузки наблюдалось постепенное смещение траектории к границе устойчивости, что сопровождалось изменением её геометрии и снижением скорости возврата к аттрактору после возмущений. Данный эффект соответствует феномену критического замедления, широко описанному в теории нелинейных систем.

Существенным результатом является подтверждение существования предкритических состояний. В ходе моделирования было показано, что функция когнитивного риска начинает возрастать задолго до возникновения явных ошибок взаимодействия. Это означает, что система сохраняет формальную работоспособность, однако теряет устойчивость и становится уязвимой к дополнительным нагрузкам. Таким образом, риск

выступает не как реактивная метрика последствий, а как предиктивный индикатор приближения к фазовому переходу.

Введение в модель производной состояния $\dot{z}(t)$ позволило учесть динамические эффекты, которые игнорируются в пороговых моделях. Практически это означает, что резкие изменения параметров (например, скачкообразное увеличение информационной плотности интерфейса) могут инициировать переход в критическую область даже при допустимых текущих значениях переменных. Тем самым подтверждается гипотеза о том, что когнитивная нестабильность определяется не только уровнем нагрузки, но и скоростью её изменения.

Интерпретация перехода в критическую фазу как бифуркационного процесса обеспечивает строгую математическую основу анализа. Потеря устойчивости когнитивного состояния сопровождается изменением структуры аттракторов и формированием нового режима поведения, что проявляется в увеличении количества ошибок, смене стратегии действий или отказе от выполнения задачи. Такая трактовка позволяет связать инженерные наблюдения с аппаратами нелинейной динамики и теории устойчивости.

Предложенная функция когнитивного риска может быть интерпретирована как мера расстояния до границы устойчивости в фазовом пространстве. Это обеспечивает геометрическую и математическую согласованность модели и создаёт основу для количественного ранжирования сценариев интерфейсного взаимодействия по степени потенциальной уязвимости.

Теоретическая значимость работы заключается в интеграции методов нелинейной динамики, спектрального анализа и когнитивного моделирования в область тестирования пользовательских интерфейсов. Предложенный подход устраняет методологический разрыв между когнитивными теориями и инженерными процедурами тестирования.

Ключевыми научными результатами являются:

- формализация взаимодействия пользователя с интерфейсом как нелинейной динамической системы;
- введение фазового пространства когнитивных состояний с выделением областей устойчивости и нестабильности;
- интерпретация перехода к ошибочному поведению как бифуркационного процесса;
- разработка динамической функции когнитивного риска, учитывающей как положение системы, так и направление её движения.

Тем самым предлагается переход от статического анализа интерфейсов к динамической теории когнитивной устойчивости взаимодействия.

Практическая ценность подхода заключается в возможности:

- выявления предкритических состояний до появления явных ошибок;
- раннего обнаружения потенциально уязвимых элементов интерфейса;
- приоритизации тестирования на основе динамического риска;
- перехода от реактивного исправления дефектов к проактивному управлению когнитивной нагрузкой.

В отличие от классического usability testing, фиксирующего проблемы постфактум, предложенная модель позволяет анализировать устойчивость сценариев на этапе проектирования и моделирования.



Следует отметить ряд ограничений предложенной модели. Во-первых, экспериментальная часть основана на моделировании динамики, а не на эмпирических данных реальных пользователей. Во-вторых, параметры функции риска требуют калибровки для конкретных типов интерфейсов и пользовательских групп. В-третьих, текущая версия модели предполагает непрерывность когнитивной динамики и не учитывает возможные дискретные когнитивные переключения.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на:

- эмпирическую валидацию модели на основе пользовательских логов;
- расширение модели с учётом стохастических возмущений;
- использование байесовских методов для адаптивной оценки параметров;
- интеграцию модели в реальные инструменты автоматизированного тестирования.

Список использованных источников

- [1] Shin Y., Jung J., Choi S. The influence of scaffolding for computational thinking on cognitive load and problem-solving skills in collaborative programming // *Educ Inf Technol*. 2025. Vol. 30. P. 583-606. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13104-0>
- [2] Панилов П. А., Цибизова Т. Ю., Чернега Е. В. Разработка алгоритма управления когнитивными функциями в интеллектуальных системах безопасности // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. № 10. С. 47-61. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-10-47-48>
- [3] Oliva-Zamora M. Á., Mangiron C. How to create video games with cognitive accessibility features: a literature review of recommendations // *Univ Access Inf Soc*. 2025. Vol. 24. P. 2805-2818. <https://doi.org/10.1007/s10209-025-01231-5>
- [4] Paas F., Renkl A., Sweller J. Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments // *Educational Psychologist*. 2010. Vol. 38, issue 1. P. 1-4. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1
- [5] Wang T., Li S., Huang X., Examining students' cognitive load in the context of self-regulated learning with an intelligent tutoring system // *Educ Inf Technol*. 2023. Vol. 28. P. 5697-5715. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11357-1>
- [6] Панилов П. А., Цибизова Т. Ю., Применение технологий машинного обучения для управления многофакторными угрозами в интегрированной модели когнитивного центра безопасности на предприятии оборонно-промышленного комплекса // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2024. Т. 20, № 1, С. 70-81. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202401.70-81>
- [7] Dakhama A., Even-Mendoza K., Langdon W. Enhancing search-based testing with LLMs for finding bugs in system simulators // *Autom Softw Eng*. 2025. Vol. 32. Article number: 63. <https://doi.org/10.1007/s10515-025-00531-7>
- [8] Kowalczyk Z., Czubenko M. Cognitive motivations and foundations for building intelligent decision-making systems // *Artif Intell Rev*. 2023. Vol. 56. P. 3445-3472. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10255-9>
- [9] Piantadosi V., Scalabrino S., Serebrenik A. Do attention and memory explain the performance of software developers? // *Empir Software Eng*. 2023. Vol. 28. Article number: 112. <https://doi.org/10.1007/s10664-023-10316-9>
- [10] Putnoki A. M., Orosz T. Cognitive and artificial intelligence evaluation framework // *Artif Intell Rev*. 2026. Vol. 59. Article number: 98. <https://doi.org/10.1007/s10462-026-11493-x>
- [11] Chen T., Lin S., Wu J. Revisiting cognitive process-driven model with sentiment-infused user preference for recommendation // *J Intell Inf Syst*. 2025. Vol. 63. P. 2203-2235. <https://doi.org/10.1007/s10844-025-00980-2>
- [12] Gu R., Rojas J. M., Shin D. Software testing for extended reality applications: a systematic mapping study // *Autom Softw Eng*. 2025. Vol. 32. Article number: 56. <https://doi.org/10.1007/s10515-025-00523-7>
- [13] Valentini L., Weistroffer V., Grandi F. Digital toolkit for human-centered machine design: development and testing of an innovative system integrating virtual reality and HMI digital prototypes // *Int J Adv Manuf Technol*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16943-4>
- [14] Wang F., Tao C., Gao J. REDQT: a method for automated mobile application GUI testing based on deep reinforcement learning algorithms // *SOCA*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11761-024-00413-y>
- [15] Бирюков С. В. Анализ стратегий тестирования программного обеспечения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2008. № 1(78). С. 59-63. EDN: KNOCIH
- [16] Логачева Н. В., Ладонищева М. Л., Пузырева К. С. Важность тестирования программного обеспечения в процессе разработки программного обеспечения // *Инновационная наука*. 2022. № 2-2. С. 23-26. EDN: FXHOTN
- [17] Куценко С. М. Разработка автоматизированной системы тестирования программного обеспечения // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2023. № 11. С. 224-227. EDN: MUVEWM
- [18] Савкин М. К., Фотина Я. А. Тестирование программ методами черного и белого ящиков // *Вопросы радиоэлектроники*. 2017. № 11. С. 44-47. EDN: ZOWTYZ
- [19] Вилданова К. И. Выбор метода тестирования программного обеспечения // *Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии*. 2022. № 2. С. 31-37. EDN: ANTMVJ
- [20] Cognition in Software Engineering: A Taxonomy and Survey of a Half-Century of Research / F. Fagerholm [et al.] // *ACM Comput. Surv*. 2022. Vol. 54, issue 11s. Article number: 226. <https://doi.org/10.1145/3508359>
- [21] Нырков А. П., Юмашева Е. С., Кириков А. В. Оптимизация процесса тестирования на проникновение в АСУ технологическими процессами с использованием алгоритмов машинного обучения // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2024. Т. 16. № 3. С. 456-466. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2024-16-3-456-466>



- [22] Обзор исследований по применению методов машинного обучения для повышения эффективности фаззинг-тестирования / А. В. Козачок [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 4. С. 83-106. <https://doi.org/10.17308/sait.2021.4/3800>
- [23] Лапушкин А. Г., Гаврилов Д. А., Поткин О. А. Программное обеспечение для создания синтезированных данных и симулятор с обратной связью для тестирования алгоритмов машинного обучения // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 1. С. 95-108. EDN: AWRUAE
- [24] Hilbert D. M., Redmiles D. F. Extracting usability information from user interface events // ACM Comput. Surv. 2000. Vol. 32, No. 4. P. 384-421. <https://doi.org/10.1145/371578.371593>
- [25] Criticality in the brain: A synthesis of neurobiology, models and cognition / L. Cocchi [et al.] // Progress in Neurobiology. 2017. Vol. 158. P. 132-152. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2017.07.002>
- [26] Storey M. A. Theories, tools and research methods in program comprehension: past, present and future // Software Qual J. 2006. Vol. 14. P. 187-208. <https://doi.org/10.1007/s11219-006-9216-4>

Поступила 23.01.2026; одобрена после рецензирования 02.03.2026; принята к публикации 28.03.2026.

Об авторе:

Панилов Павел Алексеевич, ассистент кафедры систем автоматического управления факультета информатики и систем управления, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1), ORCID: <https://orcid.org/00090005-7663-5576>, panilovp.a@bmstu.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Shin Y., Jung J., Choi S. The influence of scaffolding for computational thinking on cognitive load and problem-solving skills in collaborative programming. *Educ Inf Technol*. 2025;30:583-606. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13104-0>
- [2] Panilov P.A., Tsbizova T.Yu., Chernega E.V. Development of an Algorithm for Managing Cognitive Functions in Intelligent Security Systems. *Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(10):47-61. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-10-47-48>
- [3] Oliva-Zamora M.Á., Mangiron C. How to create video games with cognitive accessibility features: a literature review of recommendations. *Univ Access Inf Soc*. 2025;24:2805-2818. <https://doi.org/10.1007/s10209-025-01231-5>
- [4] Paas F., Renkl A., Sweller J. Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments. *Educational Psychologist*. 2010;38(1):1-4. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1
- [5] Wang T., Li S., Huang X., Examining students' cognitive load in the context of self-regulated learning with an intelligent tutoring system. *Educ Inf Technol*. 2023;28:5697-5715. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11357-1>
- [6] Panilov P.A., Tsbizova T.Yu. Application of Machine Learning Technologies for Managing Multifactor Threats in an Integrated Model of a Cognitive Security Center at a Defense Industry Enterprise. *Modern Information Technologies and IT Education*. 2024;20(1):70-81. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202401.70-81>
- [7] Dakhama A., Even-Mendoza K., Langdon W. Enhancing search-based testing with LLMs for finding bugs in system simulators. *Autom Softw Eng*. 2025;32:63. <https://doi.org/10.1007/s10515-025-00531-7>
- [8] Kowalczyk Z., Czubenko M. Cognitive motivations and foundations for building intelligent decision-making systems. *Artif Intell Rev*. 2023;56:3445-3472. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10255-9>
- [9] Piantadosi V., Scalabrino S., Serebrenik A. Do attention and memory explain the performance of software developers? *Empir Software Eng*. 2023;28:112. <https://doi.org/10.1007/s10664-023-10316-9>
- [10] Putnoki A.M., Orosz T. Cognitive and artificial intelligence evaluation framework. *Artif Intell Rev*. 2026;59:98. <https://doi.org/10.1007/s10462-026-11493-x>
- [11] Chen T., Lin S., Wu J. Revisiting cognitive process-driven model with sentiment-infused user preference for recommendation. *J Intell Inf Syst*. 2025;63:2203-2235. <https://doi.org/10.1007/s10844-025-00980-2>
- [12] Gu R., Rojas J.M., Shin D. Software testing for extended reality applications: a systematic mapping study. *Autom Softw Eng*. 2025;32:56. <https://doi.org/10.1007/s10515-025-00523-7>
- [13] Valentini L., Weistroffer V., Grandi F. Digital toolkit for human-centered machine design: development and testing of an innovative system integrating virtual reality and HMI digital prototypes. *Int J Adv Manuf Technol*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16943-4>
- [14] Wang F., Tao C., Gao J. REDQT: a method for automated mobile application GUI testing based on deep reinforcement learning algorithms. *SOCA*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11761-024-00413-y>
- [15] Biryukov S.V., Analysis of Software Testing Strategies. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2008;(1):59-63. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: KNOCIH



- [16] Logacheva N.V., Ladonycheva M.L., Puzyreva K.S. The importance of software testing in the process of software development. *Innovative science*. 2022;(2-2):23-26. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: FXHOTN
- [17] Kutsenko S.M. Development of an automated software testing system. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2023;(11):224-227. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: MUVEWM
- [18] Savkin M.K., Fotina Ya.A. Black box and white box program testing abstract. *Questions of radio electronics*. 2017;(11):44-47. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZOWTYZ
- [19] Vildanova K.I. Choosing a software testing method. *Uchenyye zapiski Ul'yanovskogo gosudarstvennogo universiteta. Fundamental'nyye problemy matematiki i mekhaniki* = Scientific Notes of Ulyanovsk State University. Fundamental Problems of Mathematics and Mechanics. 2022;(2):31-37. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ANTMVJ
- [20] Fagerholm F., Felderer M., Fucci D., Unterkalmsteiner M., Marculescu B. Cognition in Software Engineering: A Taxonomy and Survey of a Half-Century of Research. *ACM Comput. Surv.* 2022;54(11s):226. <https://doi.org/10.1145/3508359>
- [21] Nyrkov A.P., Yumasheva E.S., Kirikov A.V. Optimization of the penetration testing process in automated process control systems using machine learning algorithms. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2024;16(3):456-466. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2024-16-3-456-466>
- [22] Kozachok A.V., Kozachok V.I., Osipova N.S., Ponomarev D.V. Overview of studies on the application of machine learning methods to improve the efficiency of fusing testing. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2021;(4):83-106. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17308/sait.2021.4/3800>
- [23] Lapushkin A.G., Gavrilo D.A., Potkin O.A. synthesized data creation software and feedback simulator for testing machine learning algorithms. *Nauchnoe Priborostroenie* = Scientific Instrumentation. 2023;33(1):95-108. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: AWRUAE
- [24] Hilbert D.M., Redmiles D.F. Extracting usability information from user interface events. *ACM Comput. Surv.* 2000;32(4):384-421. <https://doi.org/10.1145/371578.371593>
- [25] Cocchi L., Gollo L., Zalesky A., Breakspear M. Criticality in the brain: A synthesis of neurobiology, models and cognition. *Progress in Neurobiology*. 2017;158:132-152. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2017.07.002>
- [26] Storey M.A. Theories, tools and research methods in program comprehension: past, present and future. *Software Qual J.* 2006;14:187-208. <https://doi.org/10.1007/s11219-006-9216-4>

Submitted 23.01.2026; approved after reviewing 02.03.2026; accepted for publication 28.02.2026.

About the author:

Pavel A. Panilov, Assistant of the Chair of Automatic Control Systems, Faculty of the Computer Science and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya St., building 2, Moscow 105005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7663-5576>, panilovp.a@bmstu.ru

The author has read and approved the final manuscript.

