

На правах рукописи



Панилов Павел Алексеевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
КОГНИТИВНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ
ПРОГРАММНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ**

Специальность: 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре «Системы обработки информации и управления» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель **ЦИБИЗОВА Татьяна Юрьевна**
доктор педагогических наук, доцент, профессор
кафедры «Системы автоматического управления»

Официальные оппоненты: **ВОЛОСЕНКОВ Владимир Олегович**
доктор технических наук, профессор, главный
научный эксперт научно-методического центра
Акционерного общества «Концерн «Моринсис-
Агат»

ЗУЕВ Андрей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой квантовых информационных
технологий, практической и прикладной
информатики федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «МИРЭА - Российский
технологический университет»

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение
«Государственный научно-исследовательский
институт авиационных систем» (г. Москва)

Защита состоится «17» декабря 2026 года в 15:00 на заседании
диссертационного совета 24.2.331.19 в МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, зал Учёного совета ГУК
МГТУ им. Н.Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана и на сайте bmstu.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просьба
направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1,
Учёному секретарю диссертационного совета 24.2.331.19, кафедра ИУЗ.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.19
кандидат технических наук, доцент

С.А. Сакулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных программных системах пользовательский интерфейс является критически значимым компонентом, определяющим эффективность и безопасность взаимодействия. Рост функциональной сложности и появление адаптивных интерфейсов увеличивают когнитивную нагрузку на пользователя, что приводит к ошибкам, связанным не с программной некорректностью, а с особенностями восприятия и принятия решений.

Основы теории человеко-компьютерного взаимодействия заложены в трудах Card, Moran и Newell, предложивших модель процесса восприятия. Существенный вклад внесли Nielsen (эвристики юзабилити) и Shneiderman (принципы проектирования интерактивных систем). Теория когнитивной нагрузки разработана Sweller, вопросы влияния интерфейса на когнитивные процессы рассматривал Norman. Исследования динамики внимания и ограниченности когнитивных ресурсов проведены Kahneman и Simon.

В области тестирования программного обеспечения фундаментальные принципы разработали Myers, Beizer и Kaner, однако традиционные методы ориентированы на проверку функциональной корректности и лишь частично учитывают особенности пользовательского взаимодействия.

В отечественной школе вопросам человеко-машинного взаимодействия, эргономики и интеллектуальных методов посвящены работы Ажмухамедова И.М., Сергеева С.Ф., Гусева А.А., Гергет О.М., Шиболденкова В.А., Ковалева С.В., Рычкова В.А., Самойлова Д.Е., Смирнова О.В., Уткина Л.В., Макаренко С.И., Шульги Т.Э., Ясницкого Л.Н. и др. Исследования в области эргономики и когнитивных аспектов представлены работами Бодрова В.А., Леонтьева А.Н., Нурковой В.В., Мунипова В.М., Зинченко В.П., Ломова Б.Ф., Спасенникова В.В., Поспелова Д.А. и др.

Несмотря на значительное число исследований, большинство подходов ориентированы на статический анализ, экспертные оценки или анализ сценариев. Недостаточно исследованы динамика когнитивного состояния пользователя и методы выявления дефектов, проявляющихся при изменении когнитивной нагрузки. В современных высокоинтерактивных системах возникает необходимость разработки новых методов тестирования, учитывающих когнитивные особенности пользователя и динамический характер взаимодействия. Перспективным направлением является использование математических моделей когнитивных процессов и вероятностных методов прогнозирования поведения.

Таким образом, формализованный подход к когнитивно-ориентированному тестированию программных интерфейсов, учитывающий динамику когнитивного состояния пользователя и предкритические режимы, отсутствует. Его разработка является актуальной научной и практической задачей.

Объектом исследования является процесс взаимодействия пользователя с программным интерфейсом в условиях когнитивной нагрузки.

Предметом исследования являются методы, математические модели,

алгоритмы и программное обеспечение когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов, основанные на формализации динамики когнитивного состояния пользователя.

Целью исследования является повышение эффективности выявления интерфейсных дефектов за счет разработки формализованных методов когнитивно-ориентированного тестирования, учитывающих динамику когнитивного состояния пользователя.

Для ее достижения в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработана математическая модель динамики когнитивного состояния пользователя при взаимодействии с интерфейсом, учитывающая параметры когнитивной нагрузки, устойчивости и интенсивности событий;

2. Формализовано понятие фазовой структуры когнитивного состояния, включая определение предкритической и критической фаз взаимодействия;

3. Разработана вероятностная байесовская модель прогнозирования переходов между фазами когнитивного состояния на основе наблюдаемых интерфейсных событий;

4. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные модели и алгоритмы и обеспечивающее анализ когнитивной динамики и генерацию тестовых сценариев.

Область исследования соответствует п.п. 1 и 7 паспорта научной специальности 2.3.5 в части проектирования моделей, методов и алгоритмов тестирования программных систем (п. 1) и разработки программных средств человеко-машинных интерфейсов (п. 7).

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы математического моделирования динамических систем, вероятностного и байесовского анализа, методы интеллектуального анализа данных, элементы теории фазовых пространств, методы компьютерного и имитационного моделирования, а также технологии разработки программных систем и объектно-ориентированное программирование.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Предложен новый метод когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов, использующий фазовое представление взаимодействия в расширенном пространстве когнитивных состояний, отличающийся формализацией критериев выявления дефектов через анализ динамики когнитивной нагрузки и устойчивости пользователя в условиях неопределенности его поведения (п. 1 паспорта специальности 2.3.5);

2. Разработана математическая модель динамики когнитивного состояния пользователя, описываемая системой дифференциальных уравнений с параметрами информационной нагрузки, интенсивности событий и когнитивной устойчивости, отличающаяся введением показателя когнитивного риска и аналитического условия достижения критической фазы взаимодействия (п. 1 паспорта специальности 2.3.5).

3. Разработана когнитивно-байесовская модель оценки и прогнозирования фаз взаимодействия, отличающаяся использованием апостериорного распределения с учетом производных вектора состояния и энтропийных характеристик, обеспечивающая раннее выявление

предкритических режимов и прогнозирование риска ошибок до их проявления (п. 1 паспорта специальности 2.3.5).

4. Создан программный комплекс когнитивно-ориентированного тестирования, реализующий разработанные модели в виде модульной архитектуры с поддержкой рекуррентной оценки состояния, прогноза ошибок и адаптивной коррекции параметров под конкретного оператора, относящийся к программным средствам человеко-машинных интерфейсов (п. 7 паспорта специальности 2.3.5).

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке формализованной модели когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов, включающей фазовое представление взаимодействия, динамическое описание когнитивного состояния пользователя и вероятностную оценку риска перехода в критическую фазу. Предложенные модели расширяют существующие подходы к тестированию программных систем за счет интеграции когнитивной динамики в процедуру анализа пользователя.

Практическая значимость диссертации состоит в разработке программного обеспечения когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов, позволяющего выявлять предкритические режимы взаимодействия и прогнозировать вероятность пользовательских ошибок. Результаты работы могут быть использованы при тестировании сложных информационных систем, адаптивных пользовательских интерфейсов, систем поддержки принятия решений, а также при анализе пользовательских логов и повышении качества интерфейсных решений.

Положения, выносимые на защиту. Соискателем лично получены следующие основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Метод когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов программных систем, позволяющий выявлять пользовательские ошибки на основе анализа изменений когнитивного состояния пользователя в процессе взаимодействия;

2. Математическая модель динамики когнитивного состояния пользователя, описывающая влияние информационной нагрузки и интерфейсных событий на устойчивость взаимодействия;

3. Вероятностная модель оценки и прогнозирования перехода в критическую фазу, обеспечивающая раннее выявление повышенного риска пользовательской ошибки;

4. Алгоритмы и программный комплекс когнитивно-ориентированного тестирования, реализующие автоматизированную оценку состояния взаимодействия и прогноз возникновения пользовательских ошибок.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования обеспечивается анализом научных работ отечественных и зарубежных исследователей в области тестирования программных систем, когнитивного моделирования и вероятностных методов анализа данных; использованием корректного математического аппарата теории динамических систем и байесовского вывода; согласованностью теоретических положений с результатами вычислительных экспериментов; сопоставлением полученных оценок фаз взаимодействия с данными имитационного моделирования и

журналами пользовательских действий; воспроизводимостью результатов при изменении параметров модели и сценариев тестирования; а также практической реализацией разработанных алгоритмов в программном комплексе.

Апробация результатов. Основные результаты и положения диссертации представлены и обсуждались на: International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD) (Москва, 2025); Всероссийском конгрессе с международным участием «Русский инженер» (Москва, 2024, 2025); XIX Всероссийской научной конференции с международным участием «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ'2025) (Москва, 2025); III Всероссийской научной конференции «Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных» (ИИАСУ'24) (Москва, 2024); XVI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2023); VI Межакадемической конференции для аспирантов и молодых исследователей «Science, Engineering and Business» (Москва, 2024); Международной ИТ-конференции «Ключевые тренды развития искусственного интеллекта: наука и технологии» (Москва, 2023); International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) (Москва, 2024, 2025); International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon) (Сочи, 2025); а также на научных семинарах кафедры систем обработки информации и управления МГТУ им. Н.Э. Баумана. Разработанный программный комплекс применяется для оценки когнитивной нагрузки пользователей при работе с корпоративными системами в АО «Швабе», при тестировании новых версий человеко-машинных интерфейсов ПАО «Яковлев», в деятельности предприятия АО «Концерн «Моринсис-Агат», что подтверждается актами реализации.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задачи когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов программных систем; разработке математической модели динамики когнитивного состояния пользователя; формализации критических и предкритических фаз взаимодействия; построении вероятностной модели оценки и прогнозирования риска пользовательских ошибок; разработке алгоритмов когнитивно-ориентированного тестирования; создании архитектуры и программной реализации комплекса; проведении вычислительных экспериментов и анализе полученных результатов.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 40 научных трудах. В том числе в 13 изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем – 17,09 п.л./12,5 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 234 страницы. Диссертация содержит 64 рисунка, 16 таблиц. Список литературы включает 165 библиографических источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки математического и программного обеспечения когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов. Показано, что традиционные методы не учитывают динамику

когнитивного состояния пользователя. Обоснована необходимость формализации когнитивной нагрузки, устойчивости и фазовых переходов для выявления дефектов динамической природы. Определены объект и предмет, цель и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 выполнен анализ методов тестирования интерфейсов программных систем и подходов к формализации пользовательского взаимодействия. Целью анализа являлось выявление ограничений существующих инструментов с позиции их применимости к задачам выявления дефектов, обусловленных динамикой взаимодействия и изменением когнитивного состояния пользователя.

Рассмотрены функциональное, структурное, модельно-ориентированное и автоматизированное UI-тестирование. Установлено, что данные методы ориентированы на проверку корректности реализации логики интерфейса, достижимости состояний и выполнения сценариев. Формально интерфейс в рамках традиционного подхода представляется как дискретная динамическая система:

$$S_{sys}(t + 1) = T(S_{sys}(t), a(t)), \quad (1)$$

где $S_{sys}(t)$ – состояние программной системы, $a(t)$ – действие пользователя, T – функция перехода.

Пользователь рассматривается как внешний источник событий, характеристики восприятия, внимания и устойчивости к нагрузке не включаются в описание модели. Модельно-ориентированное тестирование и автоматизированные UI-тесты повышают воспроизводимость сценариев, но сохраняют статическое представление взаимодействия и не описывают накопительные эффекты когнитивной нагрузки.

Дополнительно проанализированы методы статистического анализа логов, машинного обучения и вероятностного моделирования. Задача анализа взаимодействия представлена как отображение

$$F: X(t) \in R^n \rightarrow S(t) \in S, \quad (2)$$

где $X(t)$ – вектор наблюдаемых параметров взаимодействия (временные характеристики действий, частота событий, параметры навигации, ошибки ввода и др.), $S(t)$ – состояние взаимодействия.

Классические статистические методы $S(t) = f(E[X(t)], Cov(X(t)))$ требуют стационарности данных и не позволяют корректно описывать фазовые переходы и кратковременные изменения состояния.

Методы машинного обучения $S(t) = g(X(t), \Theta)$ обладают высокой аппроксимационной способностью, но чувствительны к изменению распределений и ограниченно интерпретируемы.

Вероятностные и байесовские модели оценивают $P(S(t)|X(t))$, однако используют упрощенные марковские предположения $P(S(t + 1)|S(t))$, что не отражает накопление когнитивной нагрузки.

Рассмотренные когнитивные модели поведения описывают механизмы внимания, памяти и принятия решений, но не интегрированы в

формализованные процедуры тестирования и не обеспечивают количественную оценку риска возникновения интерфейсного дефекта.

Проведенный анализ позволил выявить методологический разрыв между формальными моделями тестирования, численными методами анализа данных и когнитивными представлениями пользовательского взаимодействия. Для его устранения в работе предлагается расширить пространство анализа путем введения когнитивного вектора состояния $z(t) = [I(t), E(t), A_p(t), S_c(t)]$.

Задача тестирования формулируется как оценка и прогноз вероятности возникновения дефекта $P(D_k | S_{sys}(t), z(t), \dot{z}(t))$, проявляющегося в ошибках пользователя, что позволяет учитывать динамику когнитивных параметров и состояние программной системы. На рисунке 1 приведена схема когнитивно-ориентированного тестирования интерфейса, показывающая переход от действий пользователя и интерфейсных событий к оценке состояния взаимодействия, прогнозу риска и выявлению ошибок.

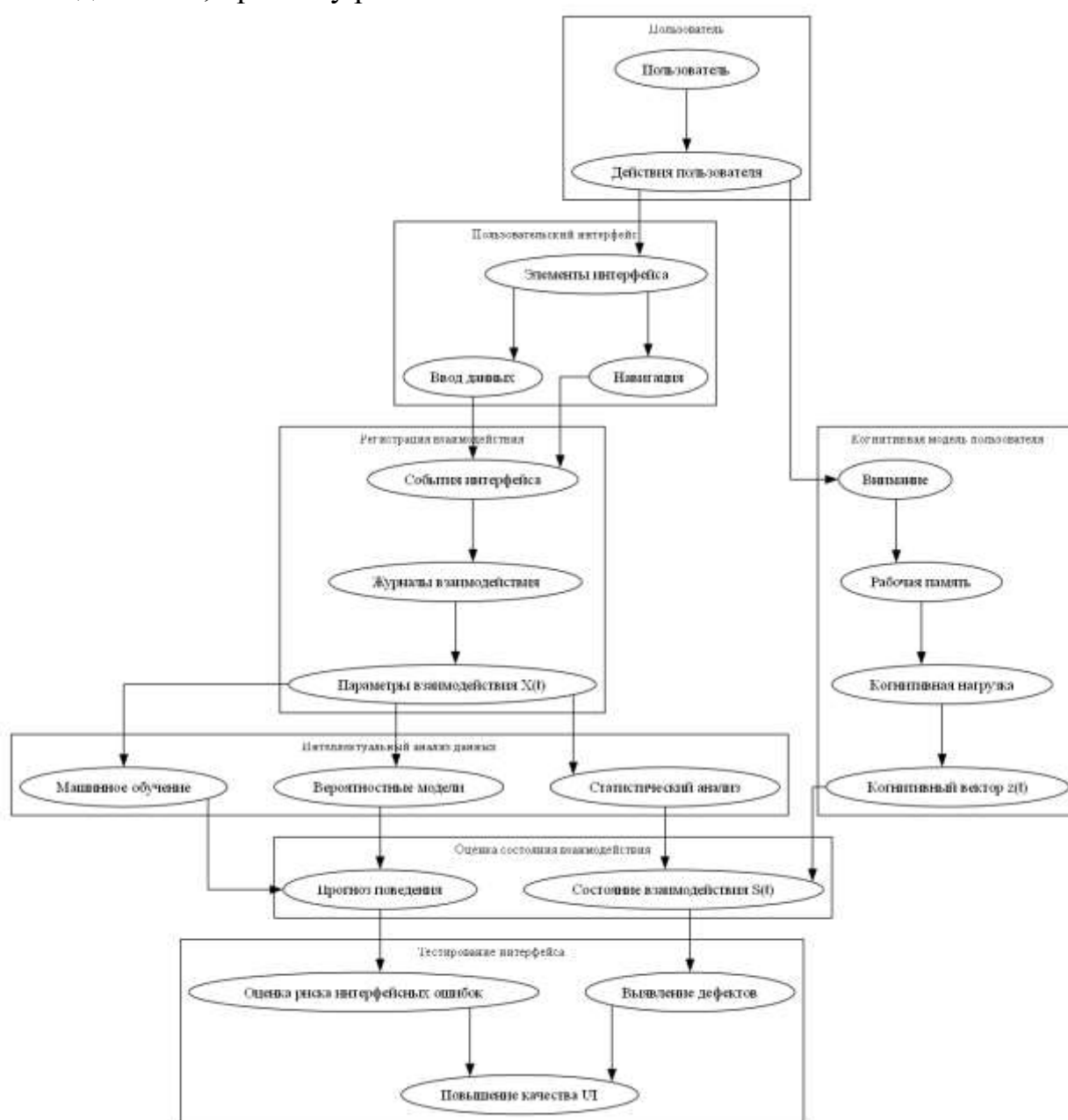


Рисунок 1. Схема когнитивно-ориентированного тестирования интерфейса

По результатам первой главы сформулированы условия, предъявляемые к методу когнитивно-ориентированного тестирования. Они включают необходимость фазового описания взаимодействия, учета производных параметров, интеграции детерминированного и вероятностного анализа и обеспечения интерпретируемости результатов. Эти условия определяют структуру математических моделей и алгоритмов, разработанных в последующих главах диссертационной работы.

В главе 2 разработана математическая модель когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов на основе расширенного представления когнитивного состояния пользователя и формализовано понятие критической фазы взаимодействия.

Базовым описанием является расширенный вектор когнитивного состояния пользователя

$$z(t) = [I(t), E(t), A_p(t), S_c(t)], \quad (3)$$

где $I(t)$ – информационная нагрузка (объем, плотность, сложность элементов), $E(t)$ – когнитивное напряжение (принятие решений, переключение контекста), $A_p(t)$ – интенсивность внешних воздействий (уведомления, прерывания), $S_c(t)$ – когнитивная устойчивость пользователя. Процесс взаимодействия интерпретируется как движение точки в пространстве когнитивных состояний, что позволяет анализировать совместную динамику когнитивных факторов, определяющих вероятность ошибок.

Эволюция когнитивного состояния описывается динамической системой

$$\dot{z}(t) = F(z(t), u(t)), \quad (4)$$

где $u(t)$ – поток интерфейсных событий и действий пользователя. Показано, что $S_c(t)$ является функцией накопленного воздействия других компонент, что приводит к эффектам инерционности и накопления перегрузки.

Выделены области пространства состояний, соответствующие различным режимам. Введены область допустимых когнитивных состояний и критическая поверхность. Критическая фаза определяется как временной интервал

$$W_c(t) = \{t | S_c(t) < S_{crit}\}, \quad (5)$$

в течение которого вероятность ошибки существенно возрастает. Порог S_{crit} зависит от типа интерфейса и характеристик пользователя.

Переход в критическую фазу определяется не только текущими значениями $z(t)$, но и их производными:

$$W_c = \{t | S_c(t) < S_{crit}, \dot{I}(t) > 0, \dot{E}(t) > 0\}, \quad (6)$$

что позволяет выявлять предкритические режимы до возникновения ошибки.

Для количественной оценки введена функция когнитивного риска

$$R(t) = \psi(I(t), E(t), A_p(t), S_c(t), \dot{z}(t)), \quad (7)$$

максимумы которой соответствуют минимальной устойчивости.

Критические фазы могут быть кратковременными, накопительными или комбинированными; выход из них асимметричен (требует больше времени), что важно для проектирования тестовых сценариев.

В модели выделены пять уровней: источники нагрузки, механизмы ее накопления, сценарии входа в критическую фазу, динамика выхода из нее и прикладное применение (выявление критических фаз и формирование тестовых сценариев), что связывает процессы формирования нагрузки, фазовые переходы и задачи когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов.

Каждая компонента $z(t)$ – агрегированная функция наблюдаемых параметров: $I(t) = f_I(X(t))$, $E(t) = f_E(X(t))$, $A_p(t) = f_A(X(t))$, а когнитивная устойчивость $S_c(t) = f_S(I(t), E(t), A_p(t))$ носит интегральный характер.

Динамика вектора $z(t)$ описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{I}(t) &= \alpha_I I(t) - \beta_{IE} E(t) - \beta_{IA} A_p(t), \\ \dot{E}(t) &= \alpha_E E(t) + \gamma_{EI} I(t) - \beta_{EA} A_p(t), \\ \dot{A}_p(t) &= u(t) - \delta A_p(t), \\ \dot{S}_c(t) &= \alpha_S S_c(t) - \eta_I I(t) - \eta_E E(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где коэффициенты $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ отражают внутренние когнитивные связи.

Анализ системы показывает разбиение фазового пространства на устойчивые и квазиустойчивые области. Выделены фазы: устойчивого взаимодействия, нарастающей перегрузки, предкритическая, критическая и фаза восстановления.

Для интегральной оценки введен функционал когнитивного равновесия

$$J(t) = \omega_I I^2(t) + \omega_E E^2(t) + \omega_A A_p^2(t) - \omega_S S_c^2(t), \quad (9)$$

рост которого интерпретируется как приближение к критической фазе, а локальные максимумы – как индикаторы фазовых переходов.

Разработан алгоритм когнитивно-ориентированного тестирования, реализующий переход от интерфейсных событий к фазовой интерпретации состояния и выявлению ситуаций с повышенной вероятностью пользовательских ошибок (Рисунок 2). Алгоритм включает формирование когнитивного состояния, анализ динамики, вычисление $J(t)$ и классификацию фаз. На вход алгоритма поступает поток интерфейсных событий, который преобразуется в последовательность значений $z(t)$. Для каждого шага вычисляются производные параметров состояния и функционал равновесия $J(t)$, что позволяет оценивать не только текущее состояние, но и направление его изменения. По пороговым значениям состояние относится к одной из пяти фаз: устойчивого взаимодействия, нарастающей перегрузки, предкритической, критической или восстановления. При обнаружении предкритической или критической фазы вычисляется функция когнитивного риска $R(t)$. Если ее значение превышает критический уровень R_c , это свидетельствует о повышенной вероятности ошибок пользователя. Результаты анализа сохраняются в базе знаний. Обратная связь обеспечивает адаптацию алгоритма к особенностям интерфейса и поведению пользователя. Таким образом, предложенная модель и реализующий ее алгоритм выступают основой для разработки методов прогнозирования критических фаз и их программной реализации в последующих главах.

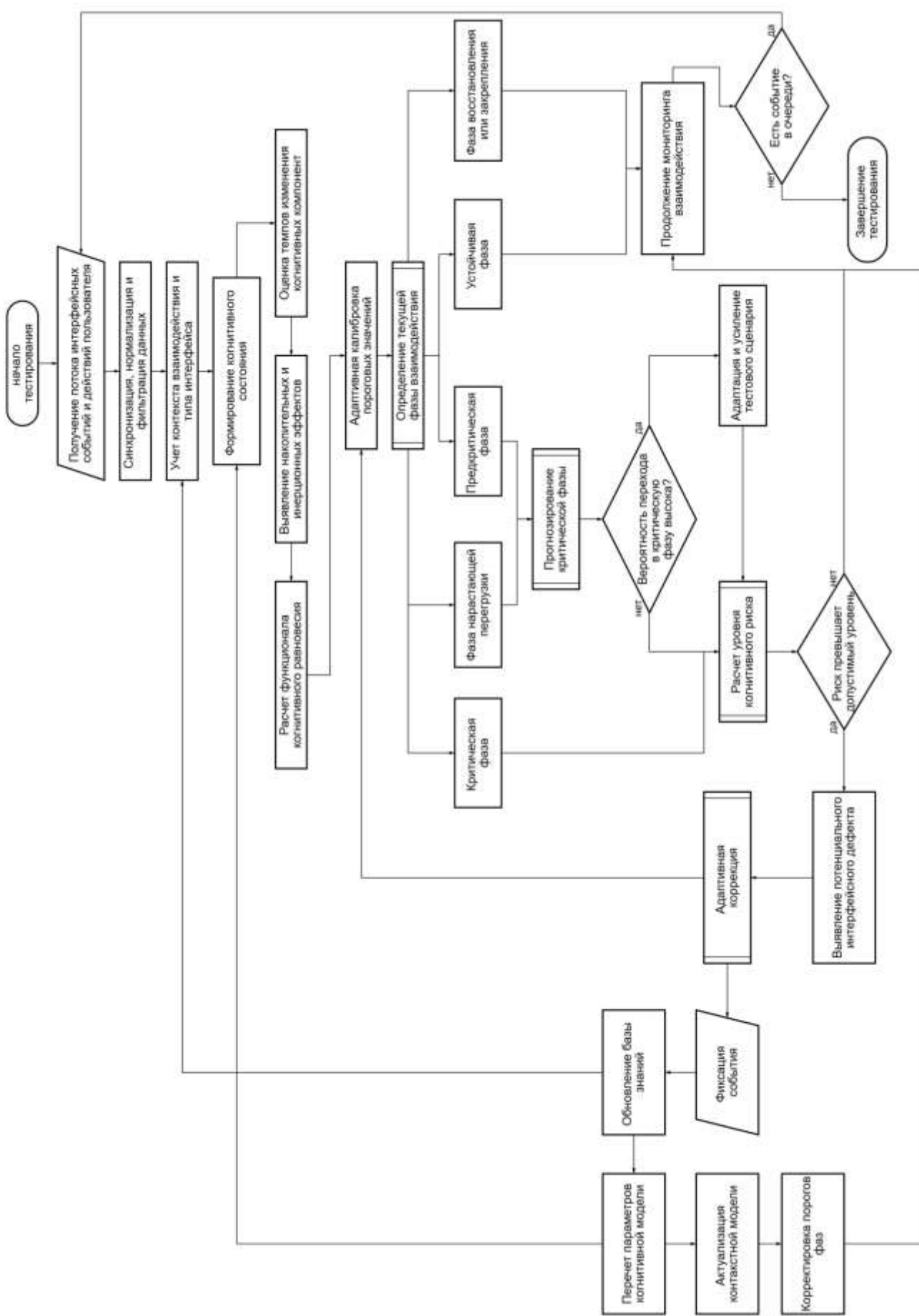


Рисунок 2. Алгоритм когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов с фазовой классификацией состояния

В главе 3 разработана вероятностная модель оценки и прогнозирования фаз взаимодействия пользователя с интерфейсом, основанная на байесовском представлении динамики расширенного когнитивного вектора. Цель – переход от детерминированного описания (глава 2) к вероятностной оценке текущего и будущего режимов взаимодействия с учетом неопределенности наблюдений, вариативности поведения пользователя и нелинейных эффектов накопления когнитивной нагрузки.

Фаза взаимодействия рассматривается как скрытая дискретная переменная $S(t) \in \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$, соответствующая режимам: устойчивое взаимодействие, нарастающая перегрузка, предкритическая фаза, критическая фаза, восстановление.

Вектор $z(t)$ выступает как наблюдаемый (частично) непрерывный процесс. Задача оценки формулируется как вычисление апостериорного распределения $P(S(t)|z(t), \dot{z}(t))$, что позволяет учитывать как текущее положение траектории, так и направление ее эволюции, обеспечивая переход от жесткого порогового критерия к вероятностной оценке риска дефекта.

Для формализации переходов введена динамическая байесовская сеть с вероятностью смены режима $P(S(t + \Delta t)|S(t), z(t))$. В отличие от классических марковских моделей, переходные вероятности зависят также от функционала когнитивного равновесия $J(t)$ и его производной, что учитывает накопленные эффекты и асимметрию входа/выхода из критической фазы.

Вероятность входа в критическую фазу задается нелинейной функцией

$$P_{crit}(t) = \sigma(\lambda_1 J(t) + \lambda_2 \dot{J}(t) - \theta(t)), \quad (10)$$

где $\sigma(\cdot)$ – сигмоидная функция, $\theta(t)$ – адаптивный порог. Критическая фаза трактуется как вероятностная область, где риск ошибки превышает допустимый уровень.

Разработан алгоритм прогнозирования критической фазы (Рисунок 3), включающий: оценку $J(t)$ и $\dot{J}(t)$; вычисление $P_{crit}(t)$; формирование переходных вероятностей; рекуррентный расчет $P(S(t + \tau)|z(t), \dot{z}(t), S(t))$ и прогнозной вероятности $P_{crit}(t + \tau)$. Включение производных $\dot{z}(t)$ повышает устойчивость прогноза при резких изменениях нагрузки, что важно для динамических интерфейсов.

Проведен энтропийный анализ распределения фаз:

$$H(t) = - \sum_k P(S_k(t)|z(t)) \log P(S_k(t)|z(t)). \quad (11)$$

Рост энтропии сопровождается приближением к фазовому переходу, что позволяет использовать ее как ранний индикатор предкритического состояния.

При выявлении потенциального дефекта активируется алгоритм адаптивной коррекции (Рисунок 4), выполняющий: анализ текущего фазового состояния и вероятности $P_{crit}(t)$; идентификацию характера роста нагрузки; коррекцию порога $\theta(t)$ и коэффициентов λ_1, λ_2 ; обновление априорных и переходных вероятностей. Коррекция выполняется итеративно до стабилизации оценки, с фиксацией события в базе знаний и калибровкой порогов.

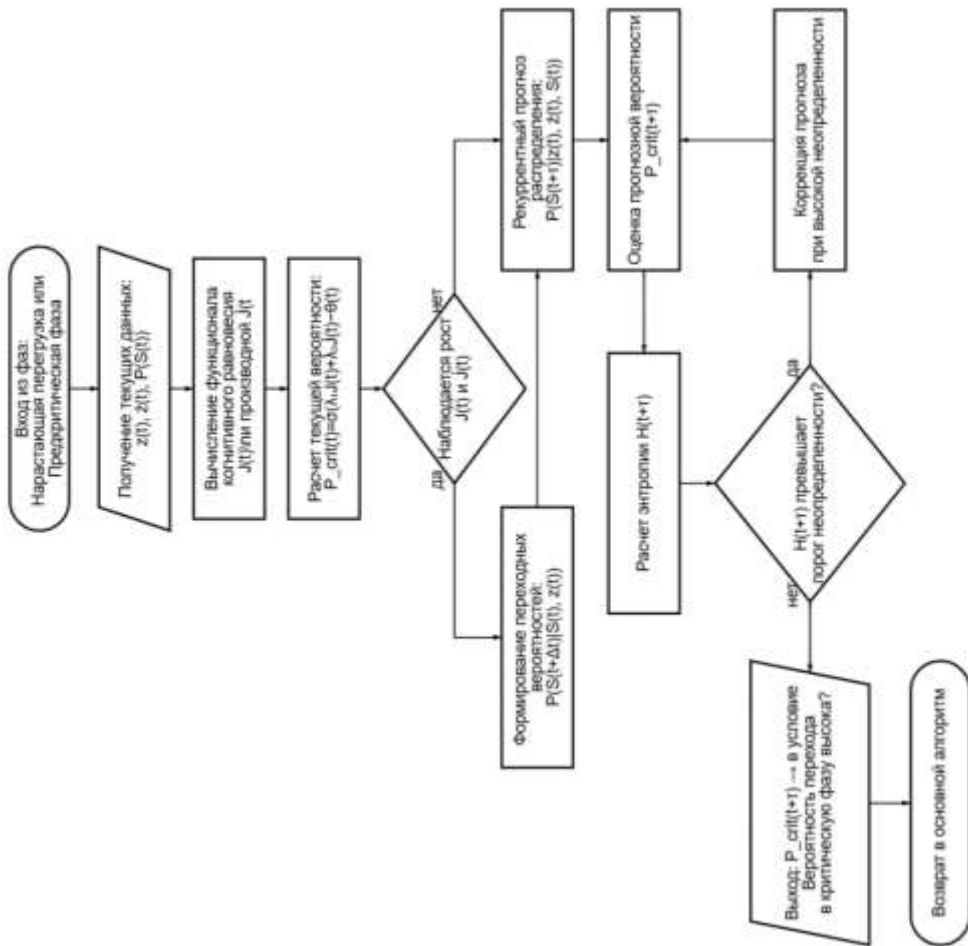


Рисунок 3. Алгоритм прогнозирования критической фазы когнитивного состояния

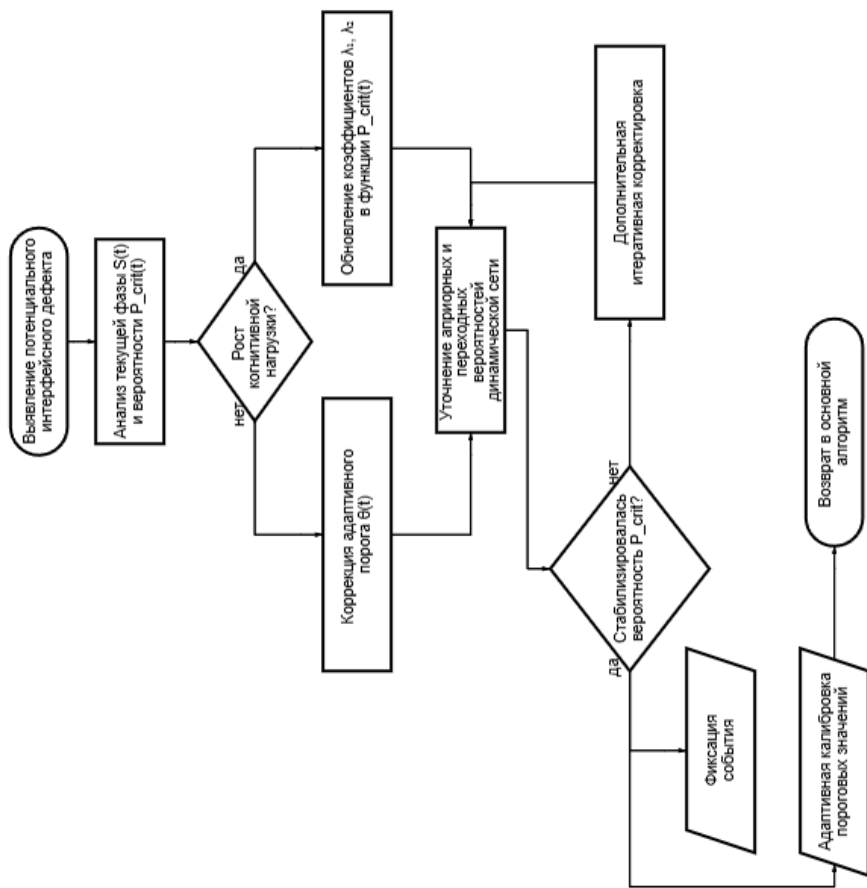


Рисунок 4. Алгоритм адаптивной коррекции параметров когнитивно-байесовской модели

В результате сформирована замкнутая когнитивно-байесовская модель, обеспечивающая: вероятностную оценку текущей фазы; прогноз перехода в критическую фазу; количественную оценку риска дефекта; адаптивную коррекцию параметров. Отличительной особенностью является явное включение фазовой динамики, производных когнитивных параметров и энтропийных характеристик в процедуру байесовского вывода, что позволяет выявлять предкритические режимы до возникновения фактической ошибки.

Полученные результаты формируют теоретическую основу для программной реализации метода в четвертой главе.

В главе 4 рассмотрены программная реализация разработанных методов когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов и результаты экспериментальной апробации. Цель – подтверждение практической реализуемости когнитивно-байесовской модели и оценка ее эффективности при выявлении предкритических и критических фаз взаимодействия, связанных с повышенной вероятностью пользовательских ошибок.

Разработано программное обеспечение, реализующее замкнутый контур: оценка текущего состояния → прогнозирование перехода в критическую фазу → адаптивная коррекция параметров.

Архитектура построена по модульному принципу и включает:

1. Модуль сбора и нормализации данных (формирование компонент $z(t)$);
2. Модуль детерминированной когнитивной динамики (расчет $z(t)$, $\dot{z}(t)$, фазовых индикаторов);
3. Вероятностный модуль байесовского вывода (апостериорное распределение фаз, $P_{crit}(t)$);
4. Модуль прогнозирования (распределение будущих фаз на горизонте τ , оценка вероятности дефекта);
5. Модуль адаптивной коррекции (настройка параметров модели);
6. Модуль аналитики и визуализации (фазовая траектория, динамика риска).

Система поддерживает рекуррентное обновление оценок в реальном времени, что позволяет работать как в режиме онлайн-тестирования, так и в режиме офлайн-анализа логов.

Алгоритм функционирует в виде рекуррентного цикла, на каждом шаге выполняется: обновление $z(t)$; вычисление детерминированной динамики; формирование априорного распределения фаз; байесовское уточнение; прогноз $P_{crit}(t + \tau)$; формирование сигнала о риске и фиксацию потенциального дефекта; адаптивную коррекцию параметров. Такое разделение обеспечивает устойчивость при шумных данных, вариативности поведения пользователя и резких изменениях нагрузки.

На рисунке 5 представлена архитектура программного комплекса и взаимодействие модулей.

Программный комплекс реализован в виде настольного приложения с графическим интерфейсом, обеспечивающим полный цикл когнитивно-ориентированного тестирования: от настройки параметров модели и генерации сценариев до визуализации результатов и экспорта данных.

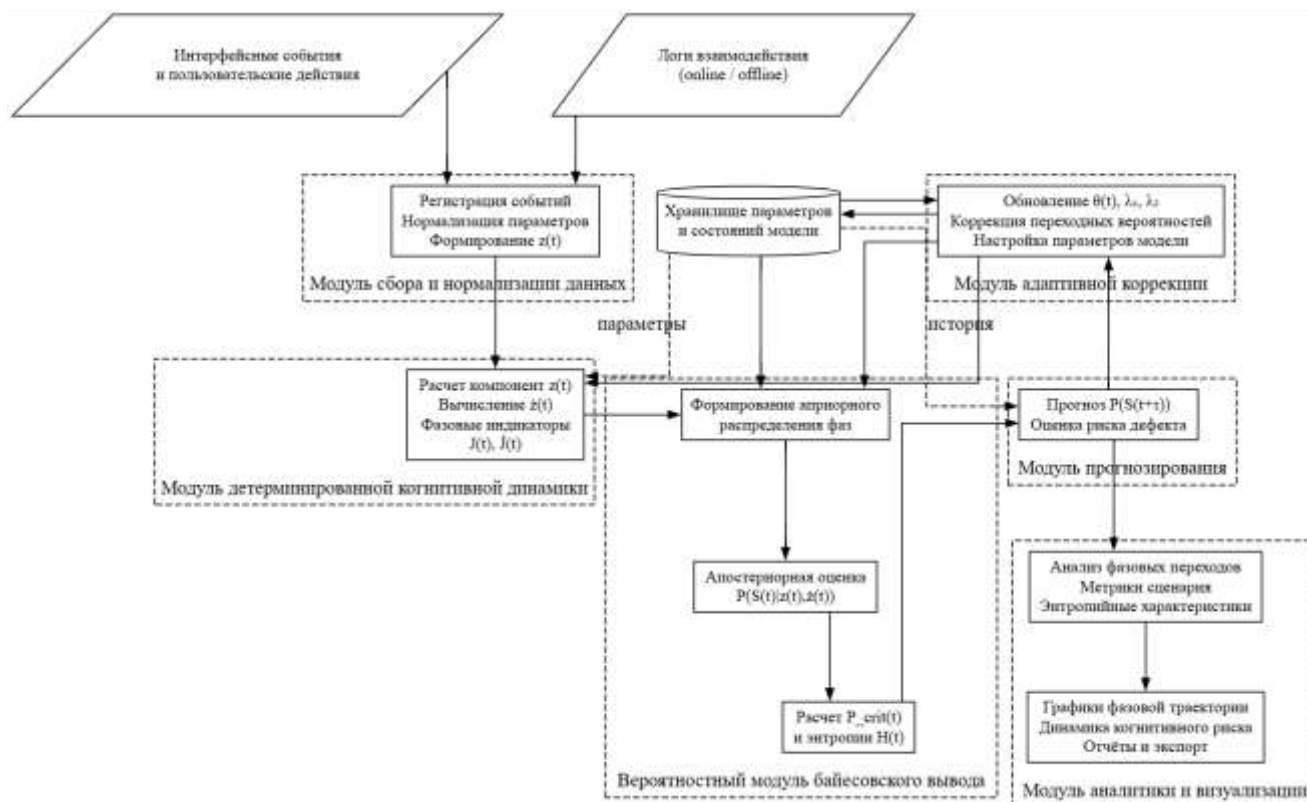


Рисунок 5. Архитектуры программного обеспечения когнитивного анализа и прогнозирования

Интерфейс организован по модульному принципу, где каждая вкладка соответствует определенному этапу анализа или функциональному модулю системы. На рисунке 6 представлен графический интерфейс.

Дополнительно предусмотрена интеграция с внешними устройствами (Bluetooth-пульсометры, датчики ЭКГ и другие биосенсоры), что позволяет в реальном времени учитывать физиологические показатели пользователя для комплексной оценки когнитивной нагрузки.

Эксперименты на синтетических данных (рост нагрузки, прерывания, переходы в предкритические и критические фазы, восстановление) подтвердили устойчивую оценку текущей фазы и раннее прогнозирование критической фазы.

Фазовые и энтропийные характеристики повысили чувствительность к предкритическим изменениям по сравнению с пороговыми методами.

Апробация в трех режимах – фоновом мониторинге САПР nanoCAD, офлайн-анализа логов образовательной платформы и длительного мониторинга группы пользователей – показала работоспособность в реальных условиях: точность классификации фаз составила 0,85, время упреждения около 4,2 мин.

Программный комплекс обеспечивает обработку динамически изменяющихся данных, поступающих в виде потока интерфейсных событий, количественную оценку когнитивного риска, интерпретируемую связь динамики когнитивных параметров с вероятностью ошибки пользователя, а также адаптивную настройку модели и порогов фазовых переходов в процессе мониторинга.



Рисунок 6. Интерфейс программного комплекса

В заключении сформулированы основные результаты исследования:

1. Проведен анализ статистических, машинных, вероятностных и когнитивных методов тестирования интерфейсов. Выявлены ограничения традиционных подходов при работе с динамическими, нестационарными и многопараметрическими данными: недостаточная чувствительность к предкритическим режимам и низкая интерпретируемость прогнозов.

2. Задача когнитивно-ориентированного тестирования формализована как оценка и прогнозирование фаз взаимодействия пользователя с интерфейсом на основе многопараметрических наблюдений с учетом динамики, взаимного влияния и накопительных эффектов когнитивной нагрузки.

3. Введено понятие расширенного когнитивного состояния в виде вектора $z(t) = [I(t), E(t), A_p(t), S_c(t)]$, агрегирующего информационную нагрузку, когнитивное напряжение, внешние воздействия и устойчивость пользователя, что позволило перейти к целостному фазовому описанию взаимодействия.

4. Исследована детерминированная динамика компонент когнитивного состояния, выявлены закономерности фазовых переходов, эффекты накопления и компенсации нагрузки. Обосновано введение критической фазы как режима с повышенной вероятностью пользовательской ошибки.

5. Разработана когнитивно-байесовская модель оценки и прогнозирования фаз, объединяющая детерминированное описание динамики расширенного когнитивного вектора и вероятностный вывод на основе динамической байесовской сети с фазозависимыми переходными вероятностями.

6. Предложен метод вероятностной оценки текущей фазы и прогнозирования входа в критическую фазу с использованием функционала когнитивного равновесия $J(t)$, его производных и энтропийных характеристик. Включение производных и энтропийного анализа повышает чувствительность модели к предкритическим изменениям.

7. Разработаны алгоритмы когнитивного анализа интерфейсных событий, фазовой идентификации, рекуррентного байесовского оценивания, прогнозирования перехода в критическую фазу и адаптивной коррекции параметров, обеспечивающие устойчивость оценки при шумных данных, вариативности поведения пользователя и изменении условий тестирования.

8. Спроектировано и реализовано программное обеспечение когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов, построенное по модульному принципу и реализующее замкнутый контур: оценка текущего состояния $\rightarrow$ прогнозирование перехода в критическую фазу $\rightarrow$ адаптивная коррекция параметров. Архитектура поддерживает онлайн-мониторинг и офлайн-анализ логов.

9. Проведена экспериментальная апробация предложенного подхода на синтетических и реальных сценариях, которая подтвердила его работоспособность в условиях динамически меняющегося взаимодействия пользователя с интерфейсом. Результаты апробации показали устойчивость оценок фазового состояния и интерпретируемость получаемых данных, а также

возможность их практического использования для мониторинга и анализа когнитивной нагрузки.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача разработки математического и программного обеспечения когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов на основе объединения динамического моделирования когнитивного состояния и вероятностного байесовского вывода.

Предложенные модели и алгоритмы обеспечивают:

1. Вероятностную оценку текущей фазы взаимодействия;
2. Прогноз перехода в критическую фазу до возникновения фактической ошибки;
3. Количественную оценку когнитивного риска интерфейсного дефекта;
4. Интерпретируемую связь между динамикой интерфейсных параметров и вероятностью ошибки в условиях неопределенности и нестационарности данных.

Результаты могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем тестирования, мониторинга и поддержки принятия решений в области проектирования интерфейсов, а также создают теоретическую основу для дальнейшего развития когнитивно-ориентированных методов анализа динамических многопараметрических данных.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Панилов П. А. Моделирование критических когнитивных состояний для предиктивного тестирования пользовательских интерфейсов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2026. Т. 20. № 1. (0,69 п.л.)

2. Панилов П. А. Когнитивно-ориентированное тестирование интерфейсов программных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2026. № 6. С. 67-84. (1 п.л.)

3. Панилов П. А., Бритвин Р. М., Комардин М. А. Интеллектуальная среда моделирования когнитивных архитектур: принципы, структура и применение // ИИАСУ'24 - Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: Сборник статей III Всероссийской научной конференции. В 3-х томах, Москва, 30 октября – 01 2024 года. Москва: Издательский дом КДУ. 2025. С. 513-522. (0,56/0,4 п.л.)

4. Панилов П. А. Использование методов нейроэволюции для автоматизации оптимизации алгоритмов киберзащиты в когнитивных информационных центрах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 11. С. 16-25. (0,56 п.л.)

5. 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. (0,69/0,5 п.л.)

6. Панилов П. А., Цибизова Т. Ю., Кочешков М. А. Развитие алгоритмов когнитивного моделирования для оптимизации принятия решений в системах

управления космическими комплексами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 6. С. 65-80. (0,94/0,7 п.л.)

7. Панилов П. А. Использование байесовских моделей и методов Монте-Карло для прогнозирования киберугроз // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 4. С. 79-88. (0,56 п.л.)

8. Панилов П. А. Когнитивный центр кибербезопасности критической инфраструктуры: гибридный подход с использованием графовых моделей и эволюционных алгоритмов // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2024. № 3(47). С. 55-67. (0,75 п.л.)

9. Панилов П. А. Когнитивные рефрейминги в предвидении и предотвращении мультиплексных угроз критической инфраструктуре // Виртуальная коммуникация и социальные сети. 2024. Т. 3. № 4(12). С. 316-325 (0,56 п.л.)

10. Цибизова Т. Ю., Панилов П. А., Кочешков М. А. Мониторинг безопасности системы защиты информации критической информационной инфраструктуры на основе когнитивного моделирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 6. С. 33-41 (0,5/0,4 п.л.)

11. Панилов П. А., Цибизова Т. Ю., Малахов Н. А. Когнитивное моделирование автономной системы управления беспилотным летательным аппаратом // Динамика сложных систем - XXI век. 2023. Т. 17, № 4. С. 5-11 (0,38/0,25 п.л.)

12. 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 (0,88/0,6 п.л.).

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026661071 Российская Федерация. Программа когнитивного анализа, обработки и прогнозирования состояний на основе многопараметрических данных: заявл. 22.01.2026 : опубл. 17.04.2026 / П. А. Панилов, Т. Ю. Цибизова.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026665634 Российская Федерация. Программа когнитивно-ориентированного тестирования интерфейсов: заявл. 24.04.2026: опубл. 25.05.2026 / П. А. Панилов.