

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТИМУЛАМИ В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА

Ильясова М.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Прудник А.М. - к.т.н., доцент, доцент кафедры ИПиЭ

Аннотация. В статье рассматривается подход к повышению эффективности человеко-машинных систем за счет внедрения алгоритма адаптивного управления стимулами трудовой деятельности оператора. Предложена система метрик (временных, точностных и интенсивных), формирующих нестационарный временной ряд производительности. Описан алгоритм детекции спадов работоспособности на основе метода «скользящего окна» и экспоненциального сглаживания, обеспечивающий динамическую настройку порогов срабатывания. Представлена логическая матрица выбора управляющих воздействий, позволяющая индивидуализировать стимуляцию и минимизировать эффект сенсорной адаптации.

Ключевые слова: человеко-машинная система, оператор, адаптивное управление, временной ряд, производительность труда, алгоритм детекции аномалий, эргономика

Введение. Эффективность функционирования современных эргатических систем во многом определяется качеством управления контуром «человек-машина». Одной из критических проблем в эксплуатации таких систем является нестабильность функционального состояния оператора, вызванная монотонией или высокой интенсивностью информационного потока. В этих условиях традиционные, статичные методы стимулирования трудовой деятельности оказываются недостаточно эффективными, поскольку они не учитывают динамику индивидуальных показателей работоспособности и эффект привыкания к управляющим воздействиям [1].

Современные исследования в области адаптивной автоматизации и «умного» стимулирования (Incentive Engineering) указывают на необходимость перехода к проактивным моделям управления на основе обратной связи [2]. Ключевой научно-технической задачей здесь является разработка алгоритма, способного в реальном времени идентифицировать фазы снижения производительности и подбирать адекватный тип воздействия. Решение данной задачи требует применения методов анализа временных рядов производительности и психофизиологических показателей оператора, что позволяет прогнозировать негативные тренды в его деятельности [3].

Разработка алгоритма адаптивного управления стимулами на основе анализа временных рядов позволяет реализовать гибкое взаимодействие в системе «человек-компьютер» (Human-Computer Interaction, HCI). Это обеспечивает динамическую коррекцию интенсивности и формы стимуляции, что критически важно для поддержания надежности и отказоустойчивости сложных интеллектуальных систем в условиях длительных рабочих циклов.

Основная часть. Для реализации адаптивного управления необходимо определить вектор параметров, формирующих временной ряд деятельности оператора. В рамках исследования выделены три группы метрик [4]:

1 Временные метрики (T): время реакции на аварийный сигнал, среднее время выполнения единичной технологической операции.

2 Точностные метрики (E): коэффициент совершения ошибок (отношение ошибочных действий к общему числу манипуляций), величина отклонения регулируемого параметра от уставки.

3 Интенсивные метрики (I): количество обработанных информационных сигналов в единицу времени.

Интегральный показатель производительности в момент времени t можно представить в виде функции:

$$P(t) = w_1 \cdot \bar{T}(t) + w_2 \cdot \bar{E}(t) + w_3 \cdot \bar{I}(t),$$

где w_i – весовые коэффициенты, определяемые спецификой конкретной человеко-машинной системы.

Основой предлагаемой системы является алгоритм, работающий по принципу «скользящего окна» анализа данных. Алгоритм включает следующие этапы:

1 Сбор данных: непрерывная фиксация метрик $P(t)$ и формирование временного ряда.
2 Детекция аномалий: сравнение текущего значения $P(t)$ со средним значением за предыдущий период (P_{avg}). Если $P(t) < (P_{avg} - \sigma)$, где σ – среднее квадратичное отклонение, система идентифицирует фазу снижения работоспособности.

3 Классификация состояния: анализ тренда (убывающий, пульсирующий, стабильно низкий).

4 Выбор стимула: на основе выявленного состояния система выбирает тип воздействия из базы данных стимулов:

- когнитивный стимул: изменение цветовой схемы интерфейса или подача звукового сигнала;
- геймифицированный стимул: вывод промежуточного рейтинга или достижение «контрольной точки»;
- информационный стимул: актуализация инструкции или подсказка ИИ-ассистента.

5 Оценка отклика: анализ изменения производительности после подачи стимула для корректировки базы правил алгоритма (самообучение).

Для реализации адаптивного управления стимулами деятельность оператора рассматривается как нестационарный временной ряд $\{P_t\}_{t=1}^N$. Ключевой задачей алгоритма является сепарация случайных флуктуаций производительности от значимых трендов утомления или потери концентрации.

В работе применяется метод экспоненциального сглаживания для прогнозирования краткосрочных изменений [5]:

$$S_t = \alpha \cdot P_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1},$$

где S_t – сглаженное значение производительности, а α – коэффициент адаптации ($0 < \alpha < 1$).

Высокое значение α позволяет системе быстро реагировать на резкие сбои (например, пропуск аварийного сигнала), в то время как низкое значение фильтрует случайные кратковременные задержки, не требующие вмешательства.

Адаптивность системы обеспечивается за счет динамического изменения весов стимулов в зависимости от истории откликов конкретного оператора. Предлагаемый алгоритм реализует логику «стимул-реакция» в рамках замкнутого контура:

1 Детекция паттерна: алгоритм выявляет характер снижения показателей (например, «дрейф» – медленное увеличение времени реакции или «провал» – резкий рост количества ошибок).

2 Адаптивное весовое распределение: система хранит массив эффективностей стимулов $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Если на визуальный стимул (мигание интерфейса) оператор перестал реагировать, его вес e_1 понижается, и система выбирает альтернативное воздействие (например, аудиосигнал или изменение сложности задачи).

3 Предотвращение сенсорной адаптации: алгоритм ограничивает частоту подачи однотипных стимулов, чтобы избежать привыкания («замыливания»), что является критически важным для поддержания бдительности в ЧМС [6].

Для верификации удобства использования системы был использован метод System Usability Scale (SUS) [7]. Операторы оценивали интерфейс системы стимулирования по 10

критериям, что позволило выявить «узкие места». Например, чрезмерную агрессивность некоторых визуальных стимулов, вызывающую раздражение и, как следствие, вторичное снижение производительности.

Дополнительно проводился качественный анализ отзывов с использованием контент-анализа. Это позволило сформировать «библиотеку предпочтительных воздействий», где для каждого типа личности оператора (по результатам предварительного тестирования) определен свой набор эффективных стимулов.

На рисунке 1 представлена визуализация работы разработанного алгоритма адаптивного мониторинга. Синяя линия показывает динамику интегрального показателя производительности оператора (P_t), красная пунктирная линия – динамический порог срабатывания. Закрашенные области демонстрируют моменты, когда производительность падает ниже порога, что является триггером для подачи стимулирующего воздействия. Использование скользящего окна позволяет системе адаптироваться к индивидуальным флуктуациям оператора, пересчитывая порог в реальном времени, что наглядно иллюстрирует реализацию принципа адаптивности системы.

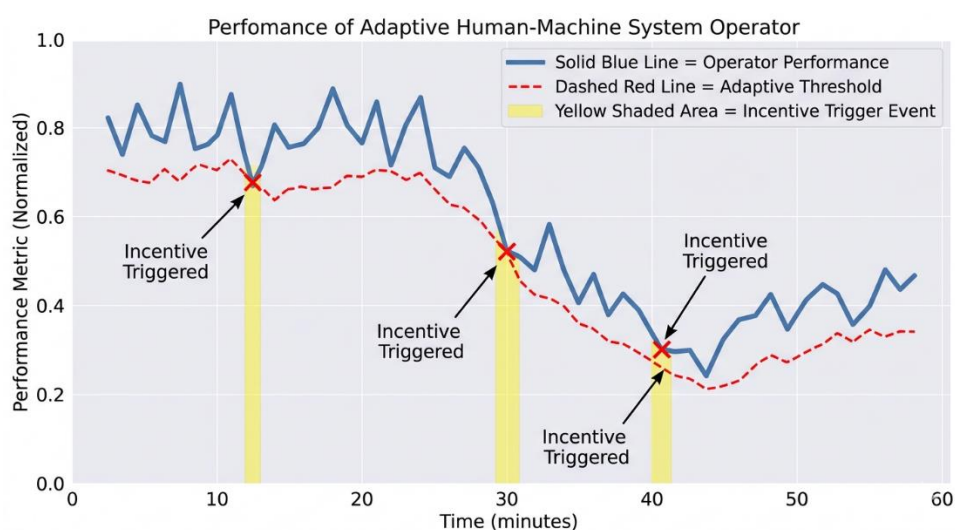


Рисунок 1 – Динамика показателей производительности оператора

Для автоматизации выбора стратегии стимулирования разработана логическая матрица (таблица 1), сопоставляющая характер изменения временного ряда с типом воздействия. Выбор осуществляется на основе анализа двух параметров: глубины спада производительности (ΔP) и градиента его изменения (∇P).

Таблица 1 – Стратегии стимулирования

Характер изменения (Паттерн)	Вероятное состояние оператора	Рекомендуемый тип стимула
Медленный дрейф вниз	Нарастающее утомление, монотония	Информационный: Смена задачи, ИИ-подсказка
Резкий единичный провал	Потеря концентрации, отвлечение	Когнитивный: Звуковой сигнал, мигание рамки
Пульсирующая динамика	Высокая когнитивная нагрузка, стресс	Геймифицированный: Промежуточный рейтинг

Предложенная классификация позволяет минимизировать риск «информационного шума», подавая стимул только в те моменты, когда он действительно необходим для стабилизации системы. Это обеспечивает высокую адаптивность за счет того, что база правил системы корректируется по результатам анализа отклика оператора на предыдущие воздействия.

Заключение. В ходе проведенного исследования разработаны научно-методические основы построения адаптивной системы стимулирования трудовой деятельности операторов.

На основе анализа временных рядов производительности предложен алгоритм, позволяющий в реальном времени идентифицировать фазы снижения работоспособности и реализовывать персонализированное управляющее воздействие. Благодаря использованию алгоритма обратной связи, управляющие воздействия перестают быть статичными и трансформируются в гибкий инструмент поддержания надежности человеко-машинного взаимодействия.

Практическая ценность предложенных решений заключается в возможности их программной реализации в составе интеллектуальных интерфейсов и тренажерных комплексов. Сочетание количественных метрик производительности с качественным анализом пользовательского опыта (SUS-тестирование) обеспечивает высокую степень персонализации стимулов, что критически важно для предотвращения сенсорной адаптации. Внедрение подобных адаптивных модулей в реальные системы управления позволит существенно повысить эффективность деятельности операторов за счет проактивного купирования рисков, связанных с человеческим фактором.

Список литературы

1. Zahmat Doost, E. *Enhancing Human-Autonomous System Interaction and Team Dynamics in Automated Driving Systems (ADS)* / E. Zahmat Doost, J. Gorman // *Proceedings of the AAAI Symposium Series*. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 127–130.
2. Zhang, Y. *Adaptive Incentive Engineering in Citizen-Centric AI* / Y. Zhang, J. Stein [et al.] // *Proceedings of the 23rd International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*. 2024. P. 2684–2692..
3. Yang, X. J. *Toward Quantifying Trust Dynamics: How People Adjust Their Trust After Moment-to-Moment Interaction With Automation* / X. J. Yang, C. Schemanske, C. Searle // *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2021. Vol. 65, No. 8. P. 1591–1606.
4. Gubskiy, Andrew. *Экспертная оценка деятельности операторов эргатических систем* / Andrew Gubskiy // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2013. № 1. С. 60–65.
5. Лукашин, Ю. П. *Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов* / Ю. П. Лукашин. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.
6. Sheridan T., Parasuraman R. (2005) *Human-Automation Interaction*. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*. 1 (1), 89–129. DOI: 10.1518/155723405783703082.
7. Grier R., Bangor A., Kortum P., Peres S. (2013) *The System Usability Scale*. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 57 (1), 187–191.

UDC 004.588.2

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE INCENTIVE CONTROL ALGORITHM IN HUMAN-MACHINE SYSTEMS BASED ON OPERATOR PERFORMANCE TIME SERIES ANALYSIS

Ilyasova M.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Prudnik A.M. - Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the Department of EPE

Annotation. The article considers an approach to increasing the efficiency of human-machine systems by implementing an algorithm for adaptive control of operator labor activity incentives. A system of metrics (time, accuracy, and intensity) forming a non-stationary time series of performance is proposed. A performance drop detection algorithm based on the «sliding window» method and exponential smoothing is described, providing dynamic adjustment of trigger thresholds. A logical matrix for choosing control actions is presented, which allows personalizing stimulation and minimizing the effect of sensory adaptation.

Keywords: human-machine system, operator, adaptive control, time series, labor productivity, anomaly detection algorithm, ergonomics