

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КОГНИТИВНОЙ НАГРУЗКИ ОПЕРАТОРА В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМАХ

Рудько В.Н.

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

Научный руководитель: Алефиренко В.М. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассмотрены основные методы оценки когнитивной нагрузки оператора при взаимодействии с человеко-машинными системами. Проведен сравнительный анализ субъективных, поведенческих и физиологических методов с точки зрения принципов их применения, преимуществ, ограничений и возможностей использования в сложных системах управления. Показано, что субъективные методы отличаются простотой применения, поведенческие позволяют оценивать влияние нагрузки на результаты деятельности оператора, а физиологические обеспечивают более объективную информацию о его состоянии и пригодны для мониторинга в реальном времени. Отмечено, что наиболее перспективным является комбинированный подход, объединяющий несколько методов оценки когнитивной нагрузки. Сделан вывод о значимости учета когнитивной нагрузки при проектировании адаптивных человеко-машинных интерфейсов и повышении надежности работы оператора в критических условиях.

Ключевые слова: когнитивная нагрузка, оператор, человеко-машинная система, методы оценки

Введение. Современные человеко-машинные интерфейсы широко применяются в различных системах управления. В таких системах оператору необходимо быстро воспринимать и обрабатывать большой объем информации, особенно в условиях ограниченного времени и высокой ответственности. В подобных ситуациях важную роль играет когнитивная нагрузка, от которой во многом зависит скорость реакции оператора, точность оценки ситуации и качество принимаемых решений [1–3].

В данной работе рассматриваются методы оценки когнитивной нагрузки оператора при взаимодействии с человеко-машинными системами. Основное внимание уделяется сравнению субъективных, поведенческих и физиологических методов, а также анализу их возможностей применения в сложных системах управления.

Основная часть. При работе с человеко-машинными интерфейсами оператору необходимо одновременно следить за несколькими параметрами системы, анализировать поступающую информацию и принимать решения. Такая деятельность требует значительных когнитивных ресурсов человека, включая внимание, память и процессы мышления. В результате возникает когнитивная нагрузка, которая может возрастать по мере усложнения задач и увеличения объема обрабатываемой информации [1–3].

На уровень когнитивной нагрузки влияет ряд факторов. К ним относятся количество отображаемых параметров, структура интерфейса, временные ограничения на принятие решений и степень автоматизации системы. Если оператору приходится одновременно контролировать большое количество данных, возрастает риск информационной перегрузки, что может привести к снижению эффективности работы и увеличению вероятности ошибок [1–3].

Для оценки когнитивной нагрузки используются различные методы. В большинстве исследований выделяют три основные группы методов: субъективные, поведенческие и физиологические. Они отличаются источниками информации и способом получения данных о состоянии оператора [2, 3].

Кроме того, уровень когнитивной нагрузки может меняться в зависимости от условий работы оператора. В ситуациях, когда требуется быстро принимать решения или работать в условиях повышенной ответственности, нагрузка значительно возрастает. Это может

приводить к снижению точности выполнения задач и увеличению количества ошибок. Поэтому анализ когнитивной нагрузки рассматривается как важный элемент исследования надежности человеко-машинных систем [2, 3].

Субъективные методы оценки когнитивной нагрузки основаны на самооценке оператора. Они позволяют определить, насколько сложной оператор считает выполняемую задачу и насколько сильным является умственное напряжение. Одним из наиболее распространенных инструментов является метод NASA-TLX, который широко используется при анализе взаимодействия человека с техническими системами. Преимуществом субъективных методов является простота применения и отсутствие необходимости в специальном оборудовании. Однако их результаты могут зависеть от особенностей оператора и условий выполнения задачи [2].

Поведенческие методы основаны на анализе действий оператора в процессе выполнения задач. В качестве показателей могут использоваться время реакции, количество ошибок, скорость выполнения операций и общая эффективность работы. При увеличении когнитивной нагрузки оператор обычно реагирует медленнее и допускает больше ошибок. Такие методы позволяют оценивать влияние нагрузки на деятельность человека, однако они отражают в основном внешние проявления когнитивного состояния [2, 3].

Физиологические методы основаны на регистрации различных биометрических показателей. К ним относятся электроэнцефалография, айтрекинг, анализ вариабельности сердечного ритма и кожно-гальванической реакции. Использование таких методов позволяет получить более объективную информацию о состоянии оператора и отслеживать изменения когнитивной нагрузки в процессе работы [1–3].

В последние годы все большее внимание уделяется применению носимых сенсоров. Они позволяют проводить мониторинг физиологических параметров оператора в условиях, приближенных к реальной работе системы. Например, электроэнцефалография используется для анализа активности мозга, а системы айтрекинга позволяют изучать направление взгляда и особенности зрительного внимания. Дополнительную информацию о состоянии оператора могут давать показатели сердечного ритма и электродермальной активности [2, 4].

Основным преимуществом физиологических методов является их объективность. Кроме того, современные технологии позволяют автоматически обрабатывать полученные данные, в том числе с использованием методов машинного обучения. Однако такие методы требуют специального оборудования и более сложной обработки результатов, что может ограничивать их применение в некоторых условиях [1, 2, 4].

Важно отметить, что каждый из методов имеет свои ограничения. Субъективные методы отражают восприятие оператора, поведенческие методы показывают результаты его деятельности, а физиологические методы характеризуют текущее состояние организма. Поэтому во многих исследованиях используется комбинированный подход, позволяющий получить более полную оценку когнитивной нагрузки [1–3].

Снижение когнитивной нагрузки также связано с правильной организацией человеко-машинного интерфейса. Удобное расположение элементов управления, структурированное представление информации и использование визуальных подсказок помогают оператору быстрее воспринимать данные и принимать решения. По этой причине при проектировании интерфейсов большое внимание уделяется учету когнитивных особенностей пользователя [1, 4].

Методы оценки когнитивной нагрузки различаются по точности, сложности применения и возможностям использования в реальных условиях. Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, поэтому выбор метода зависит от целей исследования и условий эксплуатации системы. Основные характеристики рассмотренных методов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов оценки когнитивной нагрузки оператора [1–3]

Метод	Основной принцип	Преимущества	Ограничения
Субъективные	Самооценка оператором уровня когнитивной нагрузки с использованием опросников и шкал (например, NASA-TLX)	Простота применения; отсутствие необходимости в специальном оборудовании; удобство при сравнении интерфейсов	Зависимость от индивидуального восприятия оператора; невозможность непрерывного мониторинга
Поведенческие	Анализ времени реакции, количества ошибок, скорости и эффективности выполнения задач	Позволяют оценить влияние нагрузки на выполнение задач; относительно просты в применении	Косвенная оценка когнитивного состояния; результаты зависят от сложности задания
Физиологические	Регистрация биометрических показателей (EEG, eye-tracking, HRV, кожно-гальваническая реакция и др.)	Более объективная оценка; возможность мониторинга в реальном времени	Требуется специальное оборудование; сложность обработки и интерпретации данных

Как видно из таблицы, субъективные методы отличаются наибольшей простотой применения, однако их результаты могут зависеть от индивидуального восприятия оператора. Поведенческие методы позволяют анализировать эффективность выполнения задач, но не всегда дают прямую информацию о состоянии когнитивных процессов. Наиболее объективные результаты обеспечивают физиологические методы, однако их применение связано с использованием специального оборудования и сложностью обработки данных.

Выбор метода оценки определяется целями исследования: субъективные и поведенческие подходы подходят для предварительного анализа, а физиологические методы – для точного мониторинга состояния оператора в реальном времени.

При выборе метода оценки когнитивной нагрузки важно учитывать не только его точность, но и условия практического применения. В лабораторных исследованиях, где имеется возможность контролировать внешние факторы и использовать специализированное оборудование, наибольший интерес представляют физиологические методы. Они позволяют регистрировать изменения состояния оператора в динамике и получать более объективные данные о протекании когнитивных процессов. Однако в реальных условиях эксплуатации сложных систем их использование может быть затруднено из-за чувствительности оборудования к помехам, необходимости калибровки и сложности интерпретации полученных сигналов [1–4].

Субъективные и поведенческие методы в этом отношении являются более доступными для практического применения. Субъективные шкалы позволяют быстро получить обобщенную оценку воспринимаемой нагрузки после выполнения задания, а поведенческие показатели дают возможность выявить влияние нагрузки на результативность деятельности оператора. Вместе с тем использование только одного метода не всегда позволяет в полной мере охарактеризовать текущее состояние человека. Например, увеличение времени реакции или количества ошибок может быть связано не только с ростом когнитивной нагрузки, но и с утомлением, стрессом, недостаточной подготовкой оператора либо особенностями организации интерфейса [2, 3].

Мультимодальный подход, совмещающий субъективные, поведенческие и физиологические данные, обеспечивает наиболее полную и достоверную оценку состояния оператора. Такой подход особенно актуален для интеллектуальных и адаптивных человеко-машинных систем, в которых результаты оценки когнитивной нагрузки могут использоваться для автоматической корректировки интерфейса, перераспределения функций между человеком и автоматикой, а также предупреждения оператора о риске перегрузки [1, 2, 4].

Перспективны адаптивные интерфейсы, динамически меняющие способ представления данных и степень автоматизации в зависимости от текущей нагрузки пользователя. Использование адаптивных интерфейсов позволяет снизить информационную перегрузку оператора, повысить эффективность восприятия информации и уменьшить вероятность ошибок при управлении сложными техническими системами.

Заключение. Проведенный анализ показал, что для оценки когнитивной нагрузки оператора в человеко-машинных системах могут применяться различные методы. Субъективные методы отличаются простотой применения, поведенческие методы позволяют анализировать результаты деятельности оператора, а физиологические методы дают более объективную информацию о состоянии человека и могут использоваться для мониторинга в реальном времени.

Наиболее эффективным подходом является использование нескольких методов одновременно. Комбинирование различных способов оценки позволяет получить более точное представление о состоянии оператора и повысить надежность анализа. Перспективным направлением развития человеко-машинных систем является также внедрение адаптивных интерфейсов, которые могут учитывать уровень когнитивной нагрузки пользователя и снижать риск информационной перегрузки.

Список литературы

- 1 Ioniță, A.-R. Mind, Machine, and Meaning: Cognitive Ergonomics and Adaptive Inter-faces in the Age of Industry 5.0 / A.-R. Ioniță, D.-C. Anghel, T. Boudouh // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 7703. – DOI: 10.3390/app15147703.
- 2 Iarlori, S. An Overview of Approaches and Methods for the Cognitive Workload Estimation in Human–Machine Interaction Scenarios through Wearables Sensors / S. Iarlori, D. Perpetuini, M. Tritto [и др.] // *BioMedInformatics*. – 2024. – Vol. 4. – С. 1155–1173. – DOI: 10.3390/biomedinformatics4020064.
- 3 Abbas, A. N. Analyzing State of Operators and the Impact of AI-Enhanced Decision Support in Control Rooms: A Human-in-the-Loop Specialized Reinforcement Learning Framework / A. N. Abbas, C. W. Amazu, J. Mietkiewicz [и др.] // *arXiv*. – 2024. – arXiv:2402.13219.
- 4 Johnson, C. J. Cognitive Workload Considerations for Human–Machine Integrated Formations / C. J. Johnson, A. R. Marathe. – Aberdeen Proving Ground : DEVCOM Army Research Laboratory, 2025. – 22 с. – ARL-TN-1248.

UDC 331.101.1:004.5

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING OPERATOR COGNITIVE WORKLOAD IN HUMAN–MACHINE SYSTEMS

Rudzko V.N.

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

Alefrenko V. M. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The article examines the main methods for assessing an operator’s cognitive workload in human–machine systems. A comparative analysis of subjective, behavioral, and physiological methods is carried out in terms of their application principles, advantages, limitations, and suitability for use in complex control systems. It is shown that subjective methods are easy to apply, behavioral methods make it possible to assess the impact of workload on operator performance, and physiological methods provide more objective information about the operator’s state and are suitable for real-time monitoring. It is noted that the most promising approach is a combined one that integrates several cognitive workload assessment methods. The paper concludes that taking cognitive workload into account is important for the design of adaptive human–machine interfaces and for improving operator reliability under critical conditions.

Keywords: cognitive workload, operator, human–machine system, assessment methods