

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 681.3.01

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРОВ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ*

К.А. Пупков

Кафедра кибернетики и мехатроники
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, д. 6, Москва, Россия, 117923

Рассматриваются проблемы оценивания психофизиологического состояния человека-оператора, работающего в контуре управления динамическим объектом, по экспериментальным данным. В качестве интегральной оценки психофизиологического состояния предлагается использовать чистое запаздывание оператора, состоящее из времен зрительного восприятия, оценивания ситуационного изменения визуальной информации и принятия решения к действию, сумма которых называется длительностью латентного периода. Кроме того, рассматривается запаздывание, отражающее моторную деятельность оператора.

Делается вывод, что суммарное запаздывание может быть эффективной интегральной оценкой психофизиологических параметров и состояния человека-оператора.

Ключевые слова: человек-оператор, система «человек-машина», интегральная оценка, психофизиологическое состояние

Получение интегральных параметрических оценок, характеризующих психофизиологическое состояние операторов человеко-машинных систем управления, представляет собой актуальную проблему.

Актуальность решения проблем, связанных с необходимостью оценивания психофизиологического состояния человека-оператора, обусловлена тем, что качество и надежность функционирования человеко-машинных системы управления, т.е. систем, в контур управления которых входит в качестве управляющего функциональным компонентом человек-оператор, во многом зависят от его психофизиологического состояния.

* Отраженные в работе результаты исследований были выполнены при поддержке РФФИ, Проект № 15–08–00184.

Человеко-машинные системы управления предназначены в основном для управления сложными техническими объектами, техническими системами, транспортными средствами и технологическими процессами, нарушение процессов нормального функционирования которых может привести к человеческим жертвам, разрушению высокотехнологичного, дорогостоящего оборудования, техногенным, нарушающим экологию катастрофам и т.д.

Благодаря собственному естественному интеллекту, а также своим профессиональным навыкам, приобретенным в процессе обучения и работы в контуре управления системы, человек-оператор способен на основе предъявляемой ему в визуальной форме измерительной или иной информации оперативно оценивать текущую ситуацию и генерировать командные сигналы на исполнительную и другие подсистемы человеко-машинной системы управления.

Очевидно, что качество и эффективность функционирования человека-оператора во многом зависят от его индивидуальных особенностей, уровня его профессиональной подготовки для работы в системе, текущего психофизиологического состояния, характеристик используемых средств визуализации информационных сигналов, продолжительности и интенсивности его работы в непрерывном режиме [1] и т.д.

Таким образом, формирование и определение экспериментальными методами некоторых интегральных оценок, характеризующих потенциальные возможности человека-оператора выполнять свои профессиональные функции в составе человеко-машинной системы, представляет собой актуальную и достаточно сложную научно-техническую проблему.

В работе рассматриваются и анализируются методы, методологии и технические средства экспериментального определения значений параметрических интегральных оценок, отражающих как динамические особенности и характеристики человека-оператора, так и его текущее внутреннее психофизиологическое состояние.

Рассмотрим основные принципы организации динамических человеко-машинных систем управления, а также выявим особенности динамических свойств человека-оператора, оказывающие наиболее существенное влияние на динамические свойства всего замкнутого человеко-машинного контура управления в целом.

Блок-схема, отражающая обобщенную структуру динамической человеко-машинной системы управления, представлена на рис. 1.

Система работает следующим образом. Динамическое состояние объекта управления оценивается с помощью соответствующих измерителей.

Информационные сигналы с измерителей поступают на системные средства преобразования, визуализации и отображения информации. Человек-оператор наблюдает предъявляемую ему в визуальной форме информацию и генерирует с помощью органов «ручного» управления командные сигналы на исполнительную подсистему системы управления так, чтобы реализовать цель управления.

Динамические свойства динамических человеко-машинных систем управления существенно зависят от вносимого оператором запаздывания, на которое оказы-

вают влияние многие факторы, в частности степень его тренированности, психофизиологическое состояние, динамические свойства объекта управления, характеристики предъявляемого оператору визуального информационного сигнала и т.д.



Рис. 1. Блок-схема динамической человеко-машинной системы управления

Поэтому в качестве интегральных оценок психофизиологического состояния оператора и параметров предлагается использовать значения запаздывания τ^{OP} , вносимого оператором в динамический процесс реализации функций управления.

Рассмотрим и проанализируем на детализованном уровне общую структуру процесса восприятия оператором предъявляемых ему визуальных информационных сигналов и генерации необходимых сигналов управления. Этот процесс включает в себя следующие основные этапы:

- 1) восприятие факта ситуационного изменения визуального информационного сигнала;
- 2) осмысление вероятного причинно-следственного содержания факта изменения ситуационного информационного сигнала;
- 3) принятие решения о необходимости генерации эффективного управляющего командного воздействия на объект управления;
- 4) генерация управляющих биопотенциалов на соответствующие мышцы опорно-двигательной системы человека-оператора для создания механических воздействий на органы управления человеко-машинной системы;
- 5) изменение положения органов управления и формирование управляющего командного сигнала управления на элементы исполнительной подсистемы системы управления.

Этап восприятия факта ситуационного изменения визуального информационного сигнала имеет некоторую минимальную, но конечную продолжительность $\Delta\tau_{ЗР}$, которая может быть представлена в виде следующих компонент:

- временной интервал восприятия зрительными рецепторами изменения визуальной информации $\Delta\tau_{ЗР}^P$;
- временной интервал формирования интегрированного зрительного информационного образа $\Delta\tau_{ЗР}^O$;
- передача зрительного информационного образа в соответствующие отделы головного мозга $\Delta\tau_{ЗР}^П$.

Таким образом, временной интервал зрительного восприятия оператором изменения визуального информационного сигнала может быть представлен в виде

$$\Delta\tau_{3P} = \Delta\tau_{3P}^P + \Delta\tau_{3P}^O + \Delta\tau_{3P}^П$$

Приведенный выше структурный анализ инерционных составляющих канала восприятия оператором зрительной информации подтверждаются экспериментальными данными, которые говорят о том, что человек-оператор перестает воспринимать изменяющуюся визуальную информацию в том случае, если частота ее изменения превышает частоту $f_{ВИ} = 10-15$ Гц.

Очевидно, что составляющие временного интервала восприятия изменений визуальной информации $\Delta\tau_{3P}^P$, $\Delta\tau_{3P}^O$, $\Delta\tau_{3P}^П$ зависят от характеристик и особенностей используемых средств визуализации информации, от индивидуальных свойств зрительной системы человека-оператора, а также его психофизиологического состояния.

Определение оценок значений параметров $\Delta\tau_{3P}^P$, $\Delta\tau_{3P}^O$, $\Delta\tau_{3P}^П$ возможно экспериментальными методами с использованием специального высокотехнологичного оборудования, позволяющего выполнять измерения параметров сигналов на уровне биопотенциалов.

Экспериментальное определение значений оценок параметров $\Delta\tau_{3P}^P$, $\Delta\tau_{3P}^O$, $\Delta\tau_{3P}^П$ представляет собой сложный и тонкий процесс. Тем не менее эти оценки могут быть использованы для отбора операторов человеко-машинных систем, обладающих минимальным временем реакции на изменения зрительной информации, а также для обоснованного выбора средств визуализации информации с целью минимизации времени реакции оператора на ситуационное изменение визуальной информации $\Delta\tau_{3P}$.

Этап осмысления вероятного причинно-следственного содержания факта изменения ситуационного информационного сигнала и принятия решения о необходимости генерации эффективного управляющего командного воздействия на объект управления имеет продолжительность, которая определяет длительность так называемого латентного периода $\Delta\tau_{Л}$, который равен временному интервалу от момента изменения внешнего воздействия на человека до момента окончания принятия решения и генерации управляющего сигнала.

Очевидно, что длительность латентного периода $\Delta\tau_{Л}$ представляет собой более общую, интегральную оценку психофизиологических параметров и характеристик человека-оператора, поскольку

$$\Delta\tau_{Л} = \Delta\tau_{3P} + \Delta\tau_{ПР}$$

где $\Delta\tau_{ПР}$ — временной интервал, необходимый для оценивания ситуационного изменения визуальной информации и принятия решения к действию.

Таким образом, оценка значения временного интервала латентного периода $\Delta\tau_{Л}$ позволяет оценить интегрально как оценки такого важного психофизиологического показателя, как скорость восприятия оператором изменений визуальной информации, оценки, характеризующие интеллектуальные, умственные

способности оператора, а также оценки, отражающие степень его профессиональной подготовленности и тренированности.

Оценки длительности латентного периода $\Delta\tau_{\text{л}}$ могут быть получены достаточно просто экспериментальными методами. В частности, в [1] получение статистических оценок значений запаздывания Δt использовалось для исследования влияния продолжительности работы оператора в режиме непрерывного слежения за потоками информационных сигналов на электронных средствах визуализации информации на эффективность и качество выполнения оператором своих профессиональных функций.

Этапы генерации управляющих биопотенциалов на соответствующие мышцы опорно-двигательной системы человека-оператора для создания механических воздействий на органы управления человеко-машинной системы, изменение положения органов управления и формирование управляющих командных сигналов на элементы исполнительной подсистемы системы управления отражают моторную, двигательную деятельность человека оператора.

Процесс генерации управляющих сигналов на элементы исполнительной подсистемы человеко-машинной системы управления также является инерционным, и для оценивания его временных характеристик могут использоваться оценки различных параметров.

В частности, математические динамические модели человека оператора в одной из своих простых форм представления могут иметь вид

$$W_{\text{оп}}(s) = \frac{K_{\text{оп}} e^{-s\Delta\tau_{\text{л}}}}{T_{\text{оп}}^{\text{м}} s + 1},$$

где $T_{\text{оп}}^{\text{м}}$ — моторная, механическая постоянная времени оператора.

В качестве другой оценки продолжительности двигательной, моторной фазы деятельности человека-оператора, имеющей интегральный характер, может быть использована некоторая эквивалентная постоянная моторного, двигательного запаздывания

$$\Delta\tau_{\text{м}} \cong 3T_{\text{оп}}^{\text{м}},$$

которая отражает значение временного интервала между моментом генерации управляющих биопотенциалов на соответствующие мышцы опорно-двигательной системы человека-оператора до момента требуемого отклонения органов «ручного» управления человеко-машинной системы.

Очевидно, что оценка значения постоянной моторного запаздывания $\Delta\tau_{\text{м}}$ позволяет интегрально оценить оценки психофизиологических параметров, характеризующих инерционные свойства опорно-двигательной системы человека-оператора с учетом эргономических и инерционных характеристик органов ручного управления, а также оценки, отражающие степень его профессиональной подготовленности и тренированности.

Оценки параметра $\Delta\tau_{\text{м}}$ могут быть получены путем обработки экспериментальных данных, полученных с помощью достаточно «тонких» измерений на

уровне биопотенциалов с помощью измерительного высокотехнологичного оборудования.

Вместе с тем экспериментальное исследование и оценивание значений параметра $\Delta\tau_M$ может позволить отбирать в качестве операторов человеко-машинных систем операторов с минимальным временем моторной составляющей запаздывания.

Кроме того, детальный анализ значений оценок психофизиологического параметра $\Delta\tau_M$ может позволить найти наиболее оптимальные эргономические и конструктивные решения органов ручного управления с целью минимизации моторной составляющей вносимого оператором в контур управления динамического запаздывания.

Полная интегральная составляющая оценки психофизиологических параметров человека оператора, характеризующих его временные характеристики, может быть представлена величиной эквивалентного запаздывания оператора τ_{OP} , которая выражается через значения его психофизиологических параметров:

$$\tau_{OP} = \Delta\tau_L + \Delta\tau_M.$$

Таким образом, величина эквивалентного запаздывания τ_{OP} действительно может быть использована в качестве высокоэффективной интегральной параметрической оценки психофизиологических параметров и внутреннего психофизиологического состояния человека-оператора.

Рассмотрим теперь некоторые методологические проблемы, связанные с получением оценок значений параметра τ_{OP} экспериментальными методами.

Экспериментальное определение величины эквивалентного запаздывания человека-оператора τ_{OP} возможно как с помощью прямых измерений значений τ_{OP} , так и с помощью косвенных методов оценивания, путем обработки результатов прямых измерений физических переменных, связанных с параметром τ_{OP} . Рассмотрим некоторые из этих методов более подробно.

Один из возможных прямых методов экспериментального получения оценок значений τ_{OP} предполагает подачу на средства визуализации последовательности прямоугольных импульсов со случайными периодом и длительностью.

Оператор, работая в режиме слежения, наблюдает скачкообразные изменения внешнего информационного сигнала и отклоняет органы ручного управления так, чтобы отследить изменение информационного сигнала во времени специальным маркером. Таким образом, величина вносимого человеком-оператором запаздывания τ_{OP} может быть оценена непосредственно. Графики на рис. 2, а иллюстрируют реализацию данного метода.

Возможны и другие методы получения оценок величины запаздывания τ_{OP} с использованием прямых измерений.

Необходимо отметить, однако, что прямые методы получения оценок параметров, характеризующих психофизиологическое состояние человека-оператора, обладают существенным недостатком, который состоит в том, что оператору предъявляются тестовые информационные сигналы, являющиеся детерминированными процессами.

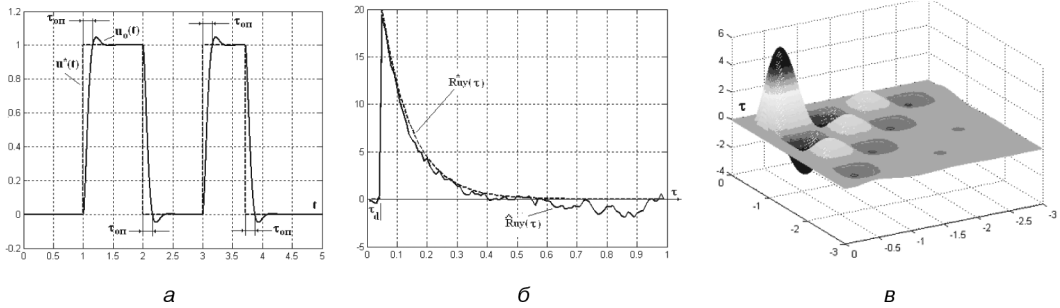


Рис. 2. Экспериментальное оценивание величины запаздывания оператора

Вместе с тем в реальных условиях при работе человека-оператора в динамическом режиме в контуре управления человеко-машинных систем управления предъявляемый оператору визуальный информационный сигнал может изменяться случайным образом.

В этом случае наиболее точными и эффективными методами получения оценок величины запаздывания оператора $\tau_{\text{ОП}}$ являются методы, основанные на получении косвенных оценок величины запаздывания по результатам статистического оценивания параметров и моделей операторов.

Одним из возможных статистических методов экспериментального оценивания величины запаздывания оператора $\tau_{\text{ОП}}$ является метод, предполагающий предъявление оператору некоторого случайно изменяющегося во времени визуального с ограниченным частотным спектром сигнала и определением статистической корреляционной взаимосвязи между входным информационным сигналом и реакцией оператора на входное воздействие, которая представляет собой сигнал, считываемый с органов ручного управления.

Структура исследовательского комплекса для экспериментального определения интегральных оценок параметров психофизиологического состояния человека-оператора статистическими методами может быть представлен в виде блок-схемы вида (рис. 3).

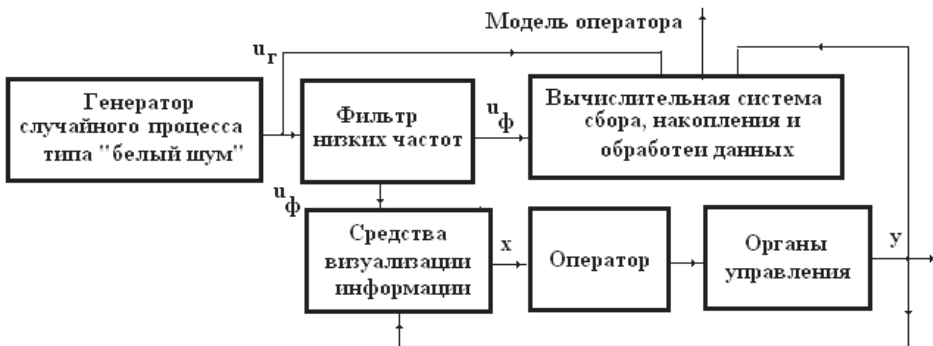


Рис. 3. Структура исследовательского комплекса

Оценка величины запаздывания оператора $\tau_{\text{ОП}}$ может быть определена через значения функции взаимной корреляции. Функция взаимной корреляции вы-

числяется на основе результатов статистической обработки массивов полученных в ходе эксперимента входных-выходных выборок

$$R_{uy}(\tau_j) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N (u_i - m_u)(y_{i+j} - m_y).$$

Графики на рис. 2, б иллюстрируют реализацию данного статистического метода экспериментального оценивания параметра $\tau_{\text{ОП}}$.

Необходимо отметить, что многие характеристики и параметры человека-оператора имеют нелинейный характер. Это значит, что реализация экспериментальных методов определения интегральных параметрических оценок психофизиологического состояния оператора может позволить получить наиболее адекватные значения искомых оценок в том случае, если используемые для решения этой проблемы методы оценивания ориентированы на получение значений параметров динамических систем в классе их нелинейных моделей.

Один из возможных способов оценивания нелинейных моделей человека-оператора основывается на использовании моделей в форме G -функционалов Винера [2].

В результате цифровой обработки экспериментальных данных можно получать значения ядер G -функционалов Винера, которые будут отражать динамические свойства человека-оператора с учетом присущих ему нелинейностей.

Выражения для первых трех G -функционалов Винера можно представить в виде

$$G_0[h_0, u(t)] = h_0 = \text{const};$$

$$G_1[h_1, u(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} h_1(\tau_1) u(t - \tau_1) d\tau_1;$$

$$G_2[h_2, u(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1) h_2(\tau_2) u(t - \tau_1) u(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 - c^2 \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_2) d\tau_2.$$

Графики на рис. 2, в иллюстрируют реализацию статистического метода экспериментального оценивания параметра $\tau_{\text{ОП}}$ на основе вычисления G -функционалов Винера и анализа сечения его ядра $h_2(\tau_1, \tau_2)$.

Очевидно, что для решения проблем получения интегральных оценок психофизиологического состояния человека-оператора прямыми или косвенными статистическими методами необходима специальная материальная техническая база, основу которой составляют средства цифровой вычислительной техники, средства визуализации информационных сигналов, органы ручного управления, измерительные и информационно-преобразующие устройства.

Рассмотренная выше методология решения проблем получения интегральных оценок запаздывания оператора $\tau_{\text{ОП}}$ ориентирована на реализацию с использованием специального исследовательского комплекса.

Были предложены архитектуры вариантов исследовательского комплексов [3; 4], предназначенных как для тренинга операторов человеко-машинных систем управления, проведения исследований их динамических характеристик, так и для оценивания параметров, характеризующих их психофизиологическое состояние.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чаусов Д.Н., Петухов И.В., Беляев В.В., Богачев К.А., Курасов П.А. Программно-аппаратный комплекс для оценки эффективности деятельности операторов // Вестник МГОУ. Серия «Физика-математика». 2014. № 2.
- [2] Основы кибернетики. Теория кибернетических систем / под ред. К.А. Пупкова. М.: Высшая школа, 1976.
- [3] Пупков К.А. Гибридный тренажерно-диагностический исследовательский комплекс // Труды научно-практической конференции «Инженерные системы». М.: РУДН, 2013.
- [4] Пупков К.А. Применение интеллектуальных технологий для диагностировании психофизиологического состояния человека-оператора // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Инженерные системы 2015». М.: РУДН, 2015.

ELEMENTAL ESTIMATION OF OPERATORS' PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE IN MAN-MACHINE CONTROL SYSTEMS

К.А. Pupkov

Cybernetics and mechatronics department
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

A problems of operators' psychophysiological parameters estimation in man-machine systems is considered. To estimate the psychophysiological parameters it is proposed to use a pure time delay of operator and motor activity delay. It is show that integral delay may be effective integral estimation for man — operator state and its psychophysiological parameters.

Key words: man-operator, man-machine system, integral estimation, psychophysiological state

REFERENCE

- [1] Chausov D.N., Petukhov I.V., Belyaev V.V., Bogachev K.A., Kurasov P.A. The hardware-software system for evaluating the performance of the operators // Bulletin MGOU. Series “Physics and mathematics”, 2014. № 2. [Chausov D.N., Petukhov I.V., Belyaev V.V., Bogachev K.A., Kurasov P.A. Programmno-apparatny kompleks dlya otsenki effektivnosti deyatelnosti operatorov // Vestnik MGOU. Seriya «Fizika-matematika». 2014. № 2.]
- [2] The basics of cybernetics. The theory of cybernetic systems / Ed. K.A. Pupkova. M.: Higher School, 1976. [Osnovy kibernetiki. Teoriya kiberneticheskikh system / pod red. K.A. Pupkova. M.: Vysshaya shkola, 1976.]

- [3] Pupkov K.A. Hybrid research complex for training and diagnostics. Proceedings of the scientific-practical conference “Engineering Systems”. Peoples’ Friendship University of Russia, 2013. [Pupkov K.A. Gibridny trenazherno–diagnostichesky issledovatel’skiy kompleks. Trudy nauchno–prakticheskoy konferentsii «Inzhenernye sistemy». M.: RUDN, 2013.]
- [4] Pupkov K.A. The use of intelligent technologies for the diagnosis of psycho-physiological state of the human operator. Proceedings of the VIII International scientific-practical conference “Engineering Systems 2015”. M.: Peoples’ Friendship University of Russia, 2015. [Pupkov K.A. Primeneniye intellektualnykh tekhnologiy dlya diagnostirovaniya psikhofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka–operatora. Trudy VIII Mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii «Inzhenernye sistemy 2015». M.: RUDN, 2015.]