

# Информационная технология моделирования человеко-машинных систем управления и подход к комплексированию математических моделей для ее совершенствования

Е. А. Лавров  
Сумский государственный университет  
Сумы, Украина  
prof\_lavrov@mail.ru

О. Е. Сирык  
Киевский национальный университет им. Т. Шевченко  
Киев, Украина  
lavrova\_olia@ukr.net

П. И. Падерно<sup>1</sup>, Е. А. Бурков<sup>2</sup>  
Санкт Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1</sup>pipaderno@list.ru, <sup>2</sup>eaburkov@gmail.com

Н. Б. Пасько  
Сумский национальный аграрный университет  
Сумы, Украина  
nbpasko@gmail.com

**Аннотация.** Описаны проблемы «человеческого фактора», расширяющиеся в связи с комплексной автоматизацией производства. Обоснована необходимость введения в состав систем управления специальных подсистем поддержки принятия решений с учетом необходимости адаптации техники к человеку-оператору. Обоснована целесообразность выбора в качестве базовой методологии исследования автоматизированных систем теории эргономического функционального подхода и сетевого моделирования процессов управления. Разработана компьютерная система решения основных задач поиска эргономических резервов повышения эффективности автоматизированных систем. Описаны основные математические модели, положенные в основу программного комплекса. Обоснована необходимость развития существующего комплекса аналитических моделей путем дополнения библиотеки моделей системами нечеткого экспертного оценивания и имитационного моделирования процессов человеко-машинного взаимодействия.

**Ключевые слова:** эргономика; «человек-машина»; система управления; человек-оператор; надежность; информационная система; вероятностная модель; нечеткая модель

## I. ВВЕДЕНИЕ

С внедрением высокоавтоматизированного управления производственными процессами возрастает производительность труда и, к сожалению, увеличиваются риски для окружающей среды и для здоровья людей [1–3]. Коренные изменения в технологиях управления сложными объектами ведут не только к уменьшению физических нагрузок на работающих людей, но и к увеличению

размеров ущербов, возникающих в результате ошибок, сбоев и аварий [4–6].

Человек не исчез полностью, как ожидалось, из контура управления, но, более того, с усложнением технологических процессов требует все большего внимания к организации деятельности. Полная замена человека автоматикой становится не только не эффективной, но и часто опасной [7]. Ответственность за результаты деятельности, напряженность этой деятельности, а также возможности стрессов и угроз здоровью, к сожалению, возрастают [8–9]. Аварии, ущербы и часто опасности для жизни и здоровья операторов сложных систем, связаны, как правило, с существующей практикой игнорирования так называемого «человеческого фактора» [10–12].

Ограниченность существующих методов поиска эргономических резервов повышения эффективности человеко-машинных процедур управления сложными объектами [13–14] требует разработки новых моделей и компьютерных средств оптимизации человеко-машинного взаимодействия.

## II. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эргономика как междисциплинарная наука, изначально призванная использовать достижения всех других наук о человеке и человеческой деятельности в системах «оператор-техника-среда», с революционным переходом управления к компьютерным технологиям не «успевает»

за «вызовами» информационного общества. А вызовы эти состоят в том, что кибернетические системы стали сложнейшими человеко-машинными системами (ЧМС) с рядом новых особенностей [11–13]:

- наличие нескольких уровней иерархии с множеством локальных человеко-машинных систем;
- большое количество (от нескольких человек до сотен человек) одновременно работающих операторов;
- жесткие временные ограничения на реализацию заявок и высокие требования к безошибочности реализации заявок.

Сложность таких систем обуславливает необходимость специальных мероприятий для обеспечения эргономического качества.

Исследованиями проблем «человеческого фактора» занято большое количество ученых (психологи, экономисты, эргономисты, кибернетики, медики и др.) [11, 14, 15]. Однако основной проблемой многих этих исследований является локальная направленность: антропометрия [11], организация рабочего места [11–12], влияние внешней среды [3, 11], закономерности обработки человеком информации [13–16], организация интерфейсов и юзабилити [14–16], режимы труда и отдыха [11, 14], психологические закономерности групповой деятельности [6, 11, 16], стимулирование безошибочности [6, 9, 16] и т.п.

Несмотря на важность каждого из этих исследований, практика проектирования и эксплуатации автоматизированных систем требует рекомендаций по целесообразным мероприятиям, направленным на повышение надежности алгоритмов управления с учетом надежности технических средств, программного обеспечения и человека-оператора (с возможностью анализа всех перечисленных и других актуальных влияющих факторов).

Таким образом, практическая целесообразность эффективности автоматизированного управления вызывает необходимость быстрого перехода от локальной «физической эргономики» к «организационной эргономике», обеспечивающей решение всех организационных задач эргономики автоматизированного управления (с учетом всех достижений «физической эргономики») [11]. Все задачи организации управления должны в режиме оперативного моделирования (типа «что будет, если?») решаться с учетом особенностей человека-оператора и всех влияющих на него факторов [16].

При этом доказано [17–19], что наиболее удобным с позиций организационной эргономики является функциональный подход (с учетом надежности структурных элементов), основы которого обозначены в научной школе «Функционально-структурная теория человеко-машинных систем» профессора А.И. Губинского [16]. В рамках этой теории разработаны теоретико-методологические основы моделирования деятельности операторов функциональными сетями (ФС) – графами,

описывающими логико-временные связи между операциями деятельности. В течение ряда лет, начиная с 1981, работоспособность моделей многократно проверена множеством исследователей, например [16, 17, 20], при проектировании различных видов операторской деятельности, в основном, операторов АСУ технологическими процессами.

Бурное развитие теории нечетких систем вызвало развитие (в рамках указанной научной школы) нечетких моделей описания человеко-машинного взаимодействия, например [2, 3], однако, к сожалению, поставленная [16] задача создания универсальной информационной среды моделирования человеко-машинных систем не решена.

Таким образом, определим задачу данного исследования:

*«Разработка метода создания комплекса компьютерно-ориентированных моделей для задач эргономического проектирования с возможностью учета различных вариантов имеющейся исходной информации о системе».*

### III. КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭРГОНОМИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

#### *Модели для описания и анализа функциональной сети*

Под формализованным описанием ФС будем понимать представление алгоритма функционирования (АФ) ЧМС структурной формулой, состоящей из элементов двух множеств  $M1$  и  $M2$ :

- $M1$  – множество элементов описания ФС, с помощью которых строится описание ФС с учетом событий, приводящих к возникновению, обнаружению и устранению ошибок;
- $M2$  – множество типов связей (операций описания) между элементами описания ФС (порядок следования, выходы и переходы).

Тогда получим модель описания ФС в общем виде:  $OFS ::= \langle EFS, SFS \rangle$ , где EFS – подмножество элементов описания из множества  $M1$ , а SFS – подмножество операций описания множества  $M2$ .

Процесс оценки ФС также зададим элементами двух множеств:  $M3$  – множество элементов оценивания, с помощью которых оценивается качество выполнения элементов описания ФС;  $M4$  – множество операций оценивания, т.е. операций над оценочными элементами, с помощью которых вычисляются вероятностно-временные характеристики всего АФ. К множеству  $M4$  относим библиотеку моделей для расчета показателей качества выполнения типовых функциональных структур (ТФС) и замены их на эквивалентные типовые функциональные единицы (ТФЕ). Введем взаимно-однозначное соответствие: во-первых, между элементами описания из  $M1$  и элементами оценивания из  $M3$ ; во-вторых, между операциями описания из  $M2$  и операциями оценивания из  $M4$ . Это дает возможность сделать оценку АФ формальной

процедурой: достаточно лишь описать АФ множествами M1 и M2, а затем выявить и заменить каждую операцию описания из множества M2 соответствующей оценочной операцией из множества M4.

Пример технологии такого оценивания приведен на рис. 1.

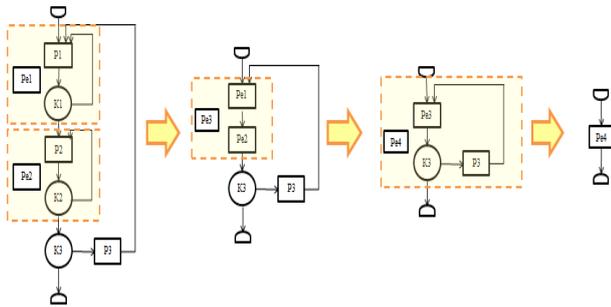


Рис. 1. Пример автоматического анализа (редукции функциональной сети) для фрагмента алгоритма деятельности оператора колл-центра телекоммуникационной компании (обозначения по [16]), подготовлено студенткой Михайленко Юлией

Такое оценивание в разработанном нами программном комплексе [18, 20] проводится автоматически. В результате получаем для заданной деятельности:

- Вероятность безошибочного завершения
- Математическое ожидание и дисперсия времени выполнения
- Вероятность своевременного выполнения

Для того, чтобы такое оценивание стало возможным необходимы (разработаны) следующие математические модели:

- $\mu_1$ -Модели исходов выполнения ТФЕ (рабочая операция, контроль функционирования, контроль работоспособности технических средств, контроль функционального состояния человека-оператора, организационный контроль и др. – всего 36 типов);
- $\mu_2$ -Модели результатов выполнения ТФС (всего 41ТФС);
- $\mu_3$ -Модели описания ТФЕ;
- $\mu_4$ -Модели описания ТФС;
- $\mu_5$ -Язык описания произвольной ФС;
- $\mu_6$ -Человеко-ориентированная модель диалога по вводу структуры ФС и формированию описания ФС;
- $\mu_7$ -Модели распознавания ТФС;
- $\mu_8$ -Модели редукции (замены распознанных ТФС эквивалентными ТФЕ);
- $\mu_9$ -Модели формирования исходных данных для операций ФС с учетом комплекса всех актуальных влияющих факторов;

- $\mu_{10}$ -Модели вариантного анализа ФС.

#### Анализ и пути совершенствования моделей

Приведенный в таблице анализ основных типов моделей, обеспечивающих информационную технологию, и некоторых не интегрированных до сих пор в единую систему моделей (имитационных и нечетких) позволяет сформулировать новую цель создания усовершенствованной системы компьютерного моделирования человеко-машинного взаимодействия с подсистемами имитационного и нечеткого моделирования.

ТАБЛИЦА 1 МОДЕЛИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ И ЗАДАЧИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Модель	Тип существующей модели	Недостатки, пути преодоления
$\mu_1$	Вероятностные модели	-
$\mu_2$	Вероятностные модели исходов, модели случайных величин времени	Сложность получения аналитических моделей для сложных ТФС с числом типов ошибок более 2 – использование имитационных моделей (на графе событий-типа Stateflow)
$\mu_3$	Предикатная	-
$\mu_4$	Предикатная	-
$\mu_5$	Система правил	-
$\mu_6$	Система алгоритмов	1. Отсутствует система правил автоматической генерации альтернативных вариантов в зависимости от условий среды – разработка нечеткой модели 2. Отсутствует распознавание изображений и голосовой ввод – нейросетевая и нечеткая система распознавания
$\mu_7$	Синтаксический анализатор	-
$\mu_8$	Система алгоритмов	-
$\mu_9$	Алгоритмы обработки баз данных с учетом поправочных коэффициентов	Отсутствуют модели обработки нечеткой информации – нейросетевые и нечеткие аппроксиматоры и экспертные системы например, с учетом квалификации, влияния среды [3], когнитивного комфорта (рис. 2) и т.п.
$\mu_{10}$	Однокритериальные и многокритериальные задачи дискретной оптимизации	1. Ограниченные возможности решения нечетких задач – разработка базы нечетких оптимизационных задач 2. Нет моделей для задач с очередями заявок – разработка базы моделей оптимизации с учетом моделей массового обслуживания (Интегрирование в систему инструментов Matlab и Simulink)

Пример, приведенный на рис. 2, лишь небольшая демонстрация возможности нечеткого оценивания параметров, которые возможно использовать в качестве аргументов для формирования исходных данных о надежности и времени выполнения человеком отдельных операций деятельности или для других задач, в т.ч. эргономической экспертизы [22].

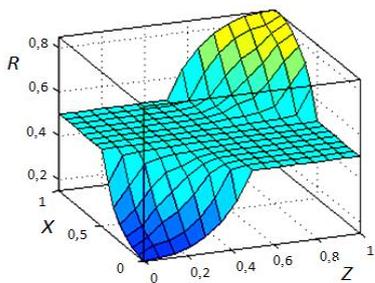


Рис. 2. Экспертная система [21] адаптивного управления в e-learning. Фрагмент поверхности правил нечеткого логического вывода для степени когнитивного комфорта (R) в зависимости от степени соответствия системы особенностям оператора по визуальной (X) и вербальной (Z) компоненте (подготовлено с участием Барченко Наталии)

#### IV. ВЫВОДЫ

Разработанный метод автоматизированного формирования, оценивания и оптимизации ФС, описывающих взаимодействие человека с техникой, позволяющий решать основные задачи эргономического обеспечения АСУ: распределение функций между человеком и техникой; распределение функций между операторами; проектирование информационных моделей и алгоритмов деятельности и др.

Появляющиеся новые возможности компьютерного моделирования сложных систем позволили разработать модели новых типов для эргономики – имитационные модели и модели нечеткого типа. Сформулированный подход к комплексному использованию разнородных моделей позволит существенно повысить эффективность компьютерной технологии.

Научная новизна состоит в том, что в отличие от существующих разработок, предложенный метод обеспечивает: 1) автоматический синтаксический анализ ФС; 2) возможность моделирования сложных типов функциональных структур с практически неограниченным количеством учитываемых типов ошибок; 3) возможность адаптации под различные варианты обеспеченности исходными данными для моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] R. Bloomfield, Safety-Critical Systems. The Next Generation [Text] / R. Bloomfield, J. Lala// IEEE Security & Privacy. 2013. vol. 11, Issue 4. P. 11–13. doi: 10.1109/MSP.2013.95.

[2] V.A. Sedov, N.A. Sedova and S.V. Glushkov. "The fuzzy model of ships collision risk rating in a heavy traffic zone." *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 8, pp. 453–458, 2016.

[3] A.P. Rotshtein. Selection of Human Working Conditions Based on Fuzzy Perfection *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, Vol. 57, No. 6, pp. 927–937.

[4] J. Yang, M. Yang, W. Wang and F. Li. "Online application of a risk management system for risk assessment and monitoring at NPPs." *Nuclear Engineering and Design*, vol. 305, pp. 200–212, 2016.

[5] A. Hassnain, Y. Yu, M.A. Shahzad, M.A. Ammar and T.Q. Ansari. "Available recovery time prediction in case of an accident scenario for NPP component." *Progress in Nuclear Energy*, vol. 97, pp. 115–122, 2017.

[6] P.C. Cacciabue. "Human error risk management for engineering systems: a methodology for design, safety assessment, accident investigation and training." *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 83, issue 2, pp. 229–269, 2014. doi: 10.1016/j.res.2003.09.013

[7] M.P. Xu et al. "Analysis of operator support method based on intelligent dynamic interlock in lead-cooled fast reactor simulator." *Annals of Nuclear Energy*, vol. 99, pp. 279–282, 2017.

[8] P.C. Li, L. Zhang, L.C. Dai and X.F. Li. "Study on operator's SA reliability in digital NPPs. Part 1: The analysis method of operator's errors of situation awareness." *Annals of Nuclear Energy*, vol. 102, pp. 168–178, 2017.

[9] M. Havlikovaa, M. Jirglb and Z. Bradac. "Human reliability in man-machine systems," *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1207–1214, 2015. doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.485

[10] P. Rothmorea, P. Aylwardb and J. Karnona. "The implementation of ergonomics advice and the stage of change approach." *Applied Ergonomics*, no. 51, pp. 370–376, 2015.

[11] J. Dul et al. "A Strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession." *Ergonomics*, vol. 55(4), pp. 377–395, 2012.

[12] T.A. Bentley et al. "The role of organisational support in teleworker wellbeing: A socio-technical systems approach." *Applied Ergonomics*, no. 52, pp. 207–215, 2016. doi: 10.1016/j.apergo.2015.07.019

[13] F. De Felice and A. Petrillo. "Methodological Approach for Performing Human Reliability and Error Analysis in Railway Transportation System." *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 3(5), pp. 341–353, 2011.

[14] M. Moghim, R. Stone, P. Rotshtein and N. Cooke, "Adaptive virtual environments: A physiological feedback HCI system concept" 2015 7th Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEEC), Colchester, 2015, pp. 123-128

[15] Y.A. Svistelnikov, A.A. Volosiuk and O.V. Voronina, "Shape and Color Coding: Recall Efficiency," 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICongRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 1441-1445.

[16] Адаменко А.Н., Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания [Текст]: справочник [Текст] / А.Н. Адаменко, А.Т. Ашероф, И.Л. Бердников и др.; под общ.ред. А.И. Губинского, В.Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993. 528 с.

[17] M.G. Grif, O. Sundui and E.B. Tsoy. "Methods of desingning and modeling of man-machine systems," in *Proc. of International Summer workshop Computer Science 2014*, 2014, pp. 38–40.

[18] E.A. Lavrov, P.I. Paderno, A.A. Volosiuk, N.B. Pasko and V.I. Kyzenko, "Automation of Functional Reliability Evaluation for Critical Human-Machine Control Systems," 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 144-147. doi: 10.1109/CTS48763.2019.8973294

[19] E.A. Lavrov, P.I. Paderno, A.A. Volosiuk, N.B. Pasko and V.I. Kyzenko, "Decision Support Method for Ensuring Ergonomic Quality in Polyergatic IT Resource Management Centers," 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 148-151. doi: 10.1109/CTS48763.2019.8973265

[20] E. Lavrov, A. Volosiuk, N. Pasko, V. Gonchar and G.Kozhevnikov. "Computer Simulation of Discrete Human-Machine Interaction for Providing Reliability and Cyber-security of Critical Systems," in *Proceedings of the Third International Conference Ergo-2018: Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (Ergo-2018) July 4–7, 2018, St. Petersburg Russia, 2018, pp. 67–70. doi:10.1109/ERGO.2018.8443846*

[21] E. Lavrov, N. Pasko, A. Tolbatov and N. Barchenko, "Development of adaptation technologies to man-operator in distributed E-learning systems," 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 88-91. doi: 10.1109/AIACT.2017.8020072

[22] E. Lavrov, O. Kупenko, T. Lavryk and N. Barchenko. "Organizational Approach to the Ergonomic Examination of E-Learning Modules". *Informatics in Education*, vol. 12, no. 1, 2013, pp. 107-124.