

# Автоматизация оценки функциональной надежности в критических человеко-машинных системах управления

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

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

П. И. Падерно<sup>1</sup>, А. А. Волосюк<sup>2</sup>  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
<sup>1</sup>pipaderno@list.ru, <sup>2</sup>aavolosiuk@gmail.com

В. И. Кизенко  
Институт педагогики национальной академии  
педагогических наук Украины  
Lab\_didaktika@bgtir.net

**Аннотация.** Рассмотрены задачи повышения функциональной надежности критических эрготехнических систем. Описаны принципы человеко-системного подхода к задачам обеспечения надежности сложных систем. Предложена основанная на аппарате функциональных сетей научной школы проф. Губинского Анатолия Ильича концепция автоматизации моделирования процессов функционирования критических систем. Разработана информационная технология моделирования человеко-машинного взаимодействия и представлены ее основные возможности. Программный комплекс предназначен для использования при проектировании и эксплуатации критических информационных систем.

**Ключевые слова:** критическая система; система «человек-машина»; система управления; человек-оператор; эргономика; функциональная надежность; автоматизация; информационная система

## I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы лавинообразно увеличивается количество систем, нарушения в функционировании которых могут приводить к авариям, значительным экономическим и экологическим потерям, создавать угрозы человеческим жизням [1–3]. Такие системы обычно называют *критическими*. Цена отказов и ошибок в таких системах часто очень велика [4–6].

Критические системы, как правило, являются сложными программно-техническими комплексами с различной степенью участия в процессах управления людей-операторов [7]. При этом, несмотря на огромные успехи автоматизации и прогресс роботизации производства, роль человека-оператора не только не уменьшается, но и существенно растет [8–9]. Отказы и сбои в работе критической системы могут быть обусловлены различными особенностями [10–12]:

- технических средств;

- программного обеспечения;
- людей-операторов;
- организации взаимодействия между структурными элементами;
- внешней среды.

Учитывая сложность и многовариантность организации всех этих структурных и функциональных элементов, а также их взаимное влияние друг на друга, исследования в области надежности критических систем систематически проводятся рядом исследователей [1–3, 11–14], однако в общем виде задача оценки и обеспечения эффективности критических систем с учетом их человеко-машинного характера до сих пор не решена.

## II. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большинство исследований в области критических систем ориентированы на задачи обеспечения надежности и эффективности их функционирования [1–3, 11–14]. Однако в большинстве случаев решаются локальные задачи проектирования и эффективной эксплуатации отдельных структурных или функциональных элементов. В тоже время, если цель состоит в том, чтобы повысить надежность и эффективность системы, необходимо рассматривать разнообразные аспекты во взаимосвязи [1, 11–15]. При этом, поскольку человек остается наиболее важным и уязвимым элементом системы (является, с одной стороны, источником ошибок, а с другой стороны, обеспечивает возможность существенного увеличения надежности), наиболее целесообразным является человеко-системный подход [16–18] к организации исследований в области критических систем.

Учет «человеческого фактора» в сложных человеко-машинных системах осуществляется посредством анализа [9–11, 16–18]:

- квалификации;
- характеристик рабочего места;
- мотивации;
- влияния условий труда;
- структуры деятельности;
- функционального состояния оператора;
- других характеристик.

Наиболее полно концепция человеко-системного подхода реализована в системе методов функционально-структурной теории эрготехнических систем [16–18], ядром которой является функционально-структурный метод оценки деятельности оператора [16]. При этом обеспечен учет как функциональной структуры, так и параметров структурных элементов (технических средств, программного обеспечения, информационного обеспечения, человека-оператора). Задача обеспечения надежности функционирования критических систем, таким образом, сводится к задачам [16, 17]:

- построения функциональных сетей, соответствующих алгоритмам управления;
- формирования надёжно-временных характеристик для отдельных операций функциональных сетей;
- редукции (оценки надёжно-временных характеристик) функциональных сетей;
- выбора рациональных:
  - структур функциональных сетей;
  - функциональных назначений структурных элементов.

Оперативное управление критическими системами требует on-line получения таких оценок и поддержки решений по организации деятельности оперативного персонала.

К сожалению, имеющиеся разработки [9–11, 16, 17] не позволяют получать такие on-line оценки. Снять такое ограничение удалось после разработки моделирующего программного комплекса [18–19], основным достижением которого стала возможность автоматической редукции функциональной сети.

Для применения разработанных моделей и средств в практике управления критическими системами необходимо снять ряд оставшихся существенных ограничений и допущений [16–19], связанных с невозможностью:

- моделирования сложного диалогового взаимодействия, выявленного в критических системах;
- учета (в исходных данных) всего комплекса влияющих на деятельность человека-оператора факторов
- on-line оптимизации процессов человеко-машинного взаимодействия.

Таким образом, в данной работе ставится задача разработки моделей и информационной технологии, обеспечивающих автоматизированное оценивание надежности процессов управления в критической системе с учетом комплекса особенностей эрготехнической автоматизированной системы.

### III. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМАХ

#### *Формирование библиотеки типовых функциональных единиц*

Особенности критических систем, которые выявлены [18–21] при изучении систем управления магистральными газопроводами, электростанций, химических предприятий и т.п. позволили предложить расширенную (в сравнении с существующей библиотекой [16]) номенклатуру типовых функциональных единиц (ТФЕ). Расширение проведено за счет введения новых моделей ТФЕ контроля, например:

- $K_v$  – векторный контроль функционирования (оценивает эффективность обнаружения ошибок и сбоев разных типов);
- $K_{fst}$  – контроль функционального состояния человека-оператора (проводится во время деятельности с целью корректирования организации режимов работы);
- $K_{org}$  – организационный контроль (оценивает организационную готовность к реализации функций).

#### *Формирование библиотеки типовых функциональных структур*

Исследование реальных процессов человеко-машинного взаимодействия в критических системах позволило дополнить существующую библиотеку [16, 17] типовых функциональных структур (ТФС) новыми ТФС (9 новых ТФС), некоторые примеры приведены на рис. 1–2.

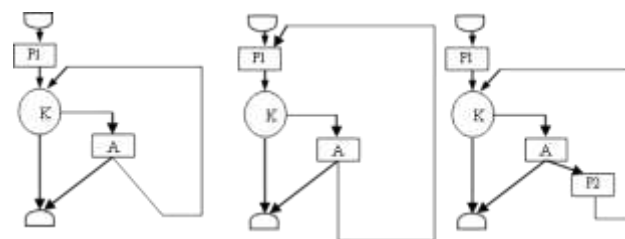


Рис. 1. Циклические ТФС с двух-вариантным выбором в соответствии с результатами самоконтроля (нотация по [16])

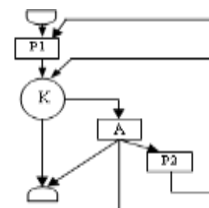


Рис. 2. Циклическая ТФС с трёх-вариантным выбором в соответствии с результатами самоконтроля (нотация по [16])

Для всех новых ТФС разработаны модели для оценки:

- вероятности безошибочного выполнения (в случае векторной ошибки – для каждого типа ошибки);
- математического ожидания и дисперсии времени выполнения.

*Формирование системы правил компьютерно ориентированного описания и анализа функциональной сети*

Удобство хранения структуры функциональной сети в компьютере обеспечено разработкой специального языка описания функциональной сети, который отвечает требованиям:

- наличие моделей для всех ТФЕ;
- возможность описания всех типов возможных связей между ТФЕ;

- возможность автоматического формирования описания на основе диалога с пользователем ( на естественном языке);
- возможность сопоставления ТФЕ надежность-временных характеристик их выполнения;
- возможность автоматического анализа функциональной сети (пошаговой идентификации ТФС) вплоть до «сворачивания» сети до одной рабочей ТФЕ;
- возможность модификации описания функциональной сети в процессе редукции (замены описания описанием эквивалентной ТФЕ).

Пример редукции функциональной сети приведен на рис. 3 (распознавание и оценивание проводится полностью автоматически, без участия человека).

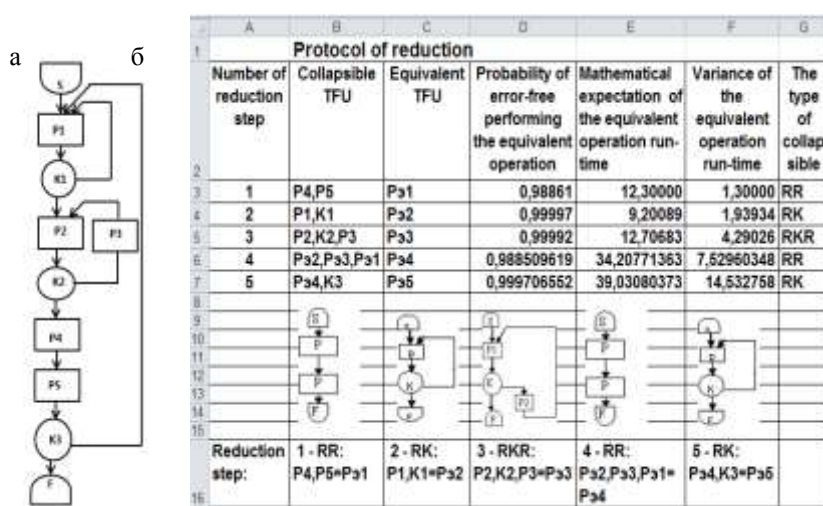


Рис. 3. Пример (из практики поддержки деятельности операторов магистрального газопровода; материалы предоставлены слушателем магистратуры Кошарой В.С.): а – функциональная сеть; б – протокол редукции (проведено автоматически)

Аналогично проводятся расчеты по всем альтернативным вариантам организации функционирования.

*Технология формирования исходных данных для оценивания*

При формировании исходных данных учитываются:

- параметры рабочего места, характеристики технического и программного обеспечения, особенности интерфейсов;
- влияние факторов среды;
- подготовленность оператора;
- степень когнитивного комфорта;
- функциональное состояние оператора;
- операционно–темповая напряженность деятельности. Исходные данные могут:
- задаваться непосредственно пользователем;

- выбираться из баз данных системы;
- прогнозироваться на основе анализа аналогичных сеансов работы (решения задачи аппроксимации).

*Технология выбора оптимальных вариантов функционирования*

Для удобства принятия решений сформирован банк наиболее часто встречающихся задач оптимизации (более 120 различных постановок – однокритериальных и многокритериальных).

Среди показателей, используемых при формировании целевых функций и ограничений [20–21]:

- вероятность безошибочного выполнения;
- вероятность своевременного выполнения;
- вероятность своевременного и безошибочного выполнения;

- экономические потери от ненадежности (с учетом всех возможных ошибок и отказов);
  - степень когнитивного комфорта оператора;
  - показатели информационной нагрузки (средняя очередь заявок к оператору, коэффициент работы в условиях очереди, коэффициент загрузки, и др.);
  - расход ресурсов (финансы, время и др.);
  - другие.
- Предусмотрена процедура выбора одной из возможных заранее сформированных моделей и использования ее в имеющейся проблемной ситуации.

*Общая характеристика информационной технологии оценки эффективности управления в критических человеко-машинных системах*

Разработанная нами информационная технология обеспечивает:

- диалоговое формулирование проблемной ситуации;
- информационное обеспечение моделирования;
- собственно моделирование, включая вариантный анализ;
- выбор оптимальных вариантов человеко-машинного взаимодействия.

#### *Апробация*

Информационная технология апробирована и продемонстрировала конструктивность подхода при проектировании ряда критических систем и в процессах оперативного управления технологическими процессами (банковские информационные системы, расчетные центры, химические комбинаты, системы управления магистральными газопроводами и др.)

#### IV. ВЫВОДЫ

Разработанные модели и компьютерная технология развивают возможности человеко-системного подхода и аппарата функциональных сетей школы проф. Губинского А.И. и обеспечивают:

- информационное обеспечение анализа;
- оперативное оценивание вариантов;
- оптимизацию человеко-машинного взаимодействия в критических системах.

Новизна результатов состоит в том, что в отличие от известных моделей и средств:

- обеспечено моделирование новых современных видов сложного диалогового взаимодействия с учетом всех возможных видов нарушений и способов контроля критической системы;

- обеспечено формирование исходных данных для процессов моделирования с учетом комплекса всех влияющих факторов, в т.ч. операционно-темповой напряженности, влияния условий труда, особенностей групповой деятельности, характеристик технического и программного обеспечения и т.п.;
- обеспечен автоматический синтаксический анализ и редукция функциональных сетей, описывающих функционирование критической системы;
- сформирован банк оптимизационных задач для выбора параметров процесса функционирования критической системы, ориентированный на решение разнообразных задач, направленных на минимизацию потерь от ненадежности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Bloomfield R. 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] 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.
- [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, J. Wang, M. Yang, W. Wang, Y. Bai, Y., and Y. Song. "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. doi: 10.1016/j.apergo.2015.06.013
- [11] J. Dul, R. Bruder, P. Buckle, P. Carayon, P. Falzon and W. S. Marraset. "A Strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession." *Ergonomics*, vol. 55(4). – pp. 377–395, 2012. doi: 10.1080/00140139.2012.661087
- [12] T. A. Bentley, S. T. T. Teo, L. McLeod, F. Tana, R. Bosua and M. Gloet. "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. Drakaki and P. Tzionas. "Manufacturing Scheduling Using Colored Petri Nets and Reinforcement Learning." *Applied Sciences*, vol. 7, no. 2, p. 136, 2017. doi:10.3390/app7020136
- [15] G.L. Tortorella, L.G.L. Vergara and E.P. Ferreira. "Lean manufacturing implementation: an assessment method with regards to socio-technical and ergonomics practices adoption." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp.1–12, 2016.
- [16] Адаменко А.Н., Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания [Текст]: справочник [Текст] / А.Н. Адаменко, А.Т. Ашеро́в, И.Л. Берднико́в 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. Lavrov and N. Pasko. "Automation of Assessing the Reliability of Operator's Activities in Contact Centers that Provide Access to Information Resources," in *Proceedings of the 14th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer*, vol. I: Main Conference. Kyiv, Ukraine, May 14–17, 2018, pp.445–448.
- [19] 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
- [20] E. Lavrov, N. Pasko, A. Tolbatov and V. Tolbatov. "Cybersecurity of distributed information systems. The minimization of damage caused by errors of operators during group activity," in *Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT-2017)*, 2017, pp. 83–87. doi:10.1109/AIACT.2017.8020071
- [21] E. Lavrov, N. Pasko and V.Borovyk. "Management for the operators activity in the polyergatic system. Method of functions distribution on the basis of the reliability model of system states," in *Proceedings of International Scientific and Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PICS&T-2018)*, 2018, pp. 423–429. doi:10.1109/INFOCOMMST.2018.8632102