

УДК 65.011.56

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ

М.Г. Гриф, Н.Д. Ганелина, Е.Б. Цой

Новосибирский государственный технический университет

В статье рассмотрены модели, методы и технологии автоматизации проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории и обобщенного структурного метода проф. А.И. Губинского. Приведены основные понятия и определения функционально-структурной теории и методов последовательной оптимизации процесса функционирования человеко-машинных систем. Предложен способ расширения области использования функционально-структурной теории человеко-машинных систем за счет интеграции оптимизационных моделей процесса функционирования человеко-машинных систем с методом имитационного моделирования, так как функционально-структурную теорию можно применять только для процессов без последствий и при отсутствии зависимых операций. Предлагается способ устранения данного ограничения путем интеграции технологии проектирования процесса функционирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории с методом имитационного моделирования тех участков процесса, для которых не выполняются указанные выше требования функционально-структурной теории. Каждый альтернативный процесс функционирования человеко-машинной системы задается в виде функциональной сети и представляется состоящим из ряда формализованных единиц – типовых функциональных единиц и их типовых комбинаций – типовых функциональных структур. Множество альтернативных процессов человеко-машинных систем описывается в виде альтернативного графа. При решении оптимизационной задачи учитываются показатели эффективности, качества и надежности человеко-машинных систем. Разработанная гибридная экспертная система имеет расширенный функционал, позволяющий строить все изоморфные представления альтернативного графа; генерировать в ручном и автоматическом режиме конкретный алгоритм направленного перебора; проводить эффективное распараллеливание алгоритма направленного перебора для многопроцессорных и многоядерных ЭВМ. Предлагаемый алгоритм интеграции функционально-структурной теории и имитационного моделирования дает возможность для выделенных участков процесса, не представимых в рамках функционально-структурной теории, провести имитационное моделирование показателей эквивалентного блока.

Ключевые слова: функционально-структурная теория, человеко-машинная система, множество альтернатив, автоматизация проектирования, имитационное моделирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-70-78

Введение

Разработка технологий проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем по показателям эффективности, качества и надежности (ЭКН) является одним из доминирующих направлений в исследовании и автоматизации проектных работ, управления объектами и принятия решений. Системы интеллектуальной поддержки принятия решений помогают человеку проанализировать большой объем информации, учесть экспертные оценки групп специалистов, сформулировать множество возможных вариантов решения и спрогнозировать их последствия, получить обоснование для выбора. Стремление повысить адекватность используемых моделей за счет привлечения все большего числа учитываемых факторов и расширение множества альтернатив создают объектив-

ные трудности для выбора оптимального варианта выполнения процесса функционирования ЧМС, поэтому возрастает актуальность подходов к оптимальному проектированию ЧМС, обеспечивающих возможность генерации и быстрого анализа достаточно большого числа альтернатив. Анализ используемых моделей ПФ ЧМС показывает, что наиболее универсальными из них являются функционально-структурная теория и обобщенный структурный метод проф. А.И. Губинского. Так, в [1–4] получили развитие модели, методы и технологии последовательной оптимизации процессов функционирования ЧМС по показателям эффективности, качества и надежности на основе ФСТ. Однако указанный подход имеет существенное ограничение, так как ФСТ можно применять только для процессов без последствия и при отсутствии зависимых операций.

В настоящей статье представлены результаты исследования способа устранения указанного ограничения путем интеграции технологии проектирования ПФ ЧМС на основе ФСТ с методом имитационного моделирования тех участков процесса, для которых не выполняются указанные выше требования ФС.

1. Методы оптимального проектирования ПФ ЧМС на основе ФСТ

Под процессом функционирования ЧМС понимается логико-временная последовательность действий и операций эргатических и неэргатических элементов системы, устойчивая к возмущениям и ведущая к достижению поставленной цели (или целей) функционирования [1–3]. ПФ ЧМС протекает во взаимосвязанных пространствах: элементов ЧМС E , выполняемых функций F , состояний ЧМС S , происходящих событий W и показателей ЧМС Q .

Непосредственно в основу способа оценки вероятностных показателей эффективности, качества и надежности процесса функционирования ЧМС – вероятности правильного (безошибочного) выполнения B , среднего времени T и средних затрат (дохода) V от выполнения, вероятности своевременного выполнения $P(t < T_d)$ положены вероятностный граф, а также правила его редукции (укрупнения).

Рассмотрим способы задания оптимизационной модели ПФ ЧМС на основе функциональной сети с использованием множеств элементов ЧМС, выполняемых функций и операций. Использование при проектировании ПФ ЧМС функционально-структурной теории и обобщенного структурного метода А.И. Губинского предполагает, что каждый альтернативный процесс функционирования ЧМС задается в виде функциональной сети (ФС) и представляется состоящим из ряда формализованных единиц – типовых функциональных единиц (ТФЕ) и их типовых комбинаций – типовых функциональных структур (ТФС) (рис. 1). Множество альтернативных процессов ЧМС пользователь описывает в виде альтернативного графа (рис. 2).

Задача оптимизации (обобщенная задача динамического программирования) ставится следующим образом:

$$\begin{aligned} K_{\text{ЭКН}}(A) &\rightarrow \text{extr}, \\ A &\in M_d \subseteq M_a, \end{aligned} \quad (1)$$

где $K_{\text{ЭКН}}(A)$ – критерий оптимальности для сочетаний критериев ЭКН; M_d – множество допустимых альтернатив, альтернативные варианты процесса – M_a .

Вероятностные и нечеткие показатели эффективности, качества и надежности процесса (алгоритма) функционирования: $B(A)$, $T(A)$, $V(A)$, $P(t < T_d)(A)$, $\tilde{B}(A)$, $\tilde{T}(A)$ и $\tilde{V}(A)$.

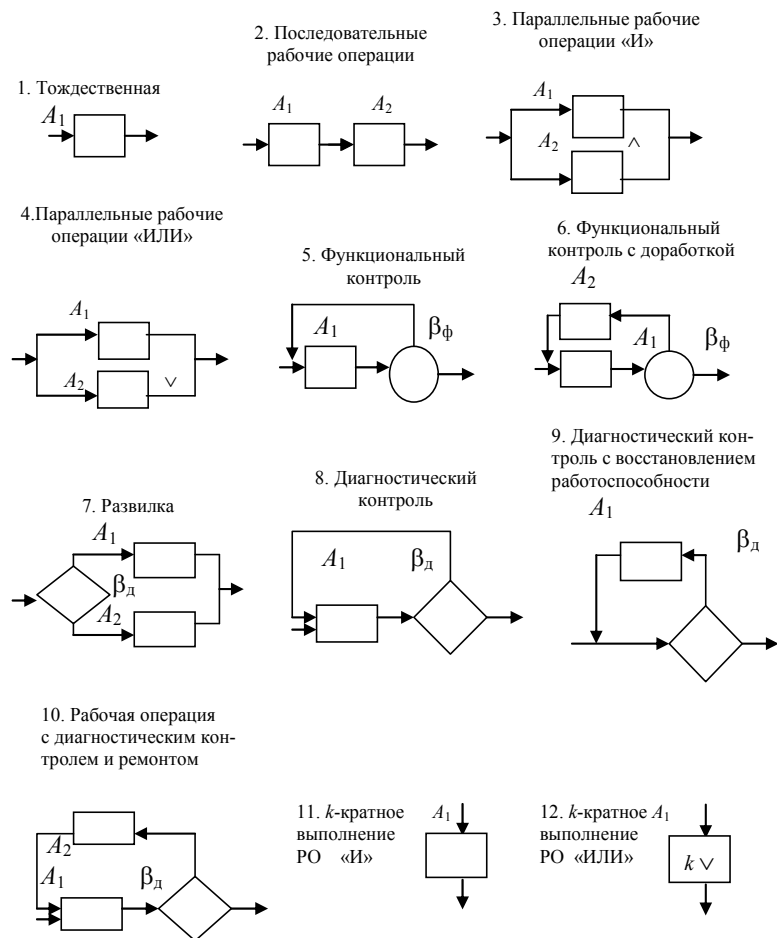


Рис. 1 – Типовые функциональные структуры

Fig. 1 – Basic functional structures

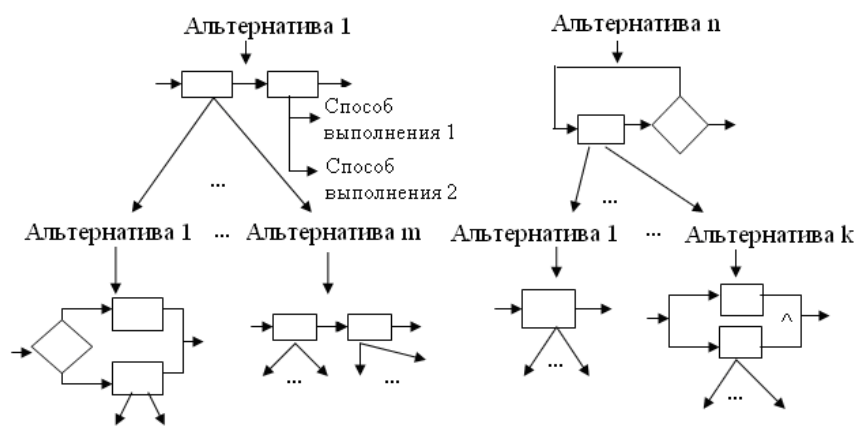


Рис. 2 – Альтернативный граф для ПФ ЧМС

Fig. 2 – Alternative graph for HMS FP

В таблице приведены некоторые из возможных постановок задач оптимизации с показателями $B(A)$, $T(A)$ и $V(A)$. Здесь $P_{\text{ogr}}(A)$ – ограничения на совместимость способов выполнения компонентов альтернатив в виде предиката – «Если $P_{\text{ogr}}(A)$ есть «Истина», то A удовлетворяет ограничениям задачи».

Скалярные и векторные задачи оптимизации с показателями $B(A)$, $T(A)$, $V(A)$
Scalar and vector optimization problems with efficiency indexes $B(A)$, $T(A)$, $V(A)$

Критерий	Ограничения	Примечания
$B(A) \rightarrow \max$ $A \in M_d$	$V(A) \leq V_d$ $T(A) \leq T_d$ $P_{\text{ogr}}(A)$	$V_d \geq 0$ $T_d \geq 0$
$T(A) \rightarrow \min$ $A \in M_d$	$V(A) \leq V_d$ $B(A) \geq B_d$ $P_{\text{ogr}}(A)$	$V_d \geq 0$ $B_d \in [0,1]$
$V(A) \rightarrow \min$ $A \in M_d$	$T(A) \leq T_d$ $B(A) \geq B_d$ $P_{\text{ogr}}(A)$	$T_d \geq 0$ $B_d \in [0,1]$
$F_1 = c_1 B(A) - c_2 T(A) -$ $- c_3 V(A) \rightarrow \max$	$P_{\text{ogr}}(A)$	$c_i \geq 0, i = 1 \dots 3$

Под операцией $O \equiv O(F, E, Q)$ понимается процесс выполнения функции F элементом E в состоянии ЧМС S , Q – показатели эффективности, качества и надежности.

Отдельный процесс функционирования ЧМС (функциональная сеть) представляется в виде суперпозиции ТФС:

$$O_z = \text{ТФС}_i(O_{i_1}, O_{i_2}, \dots, O_{i_k}), \quad (2)$$

где $\text{ТФС}_i \in M_{\text{ТФС}}$, O_{i_j} – простая или составная операция. Две операции с совпадающей функцией $F - O(F, E_1, Q_1)$ и $O(F, E_2, Q_2)$ являются альтернативными («параметрическими») способами выполнения операции O , так же как и составные операции $O = \text{ТФС}_i(O_{i_1}, O_{i_2}, \dots)$ и $O = \text{ТФС}_s(O_{s_1}, O_{s_2}, \dots)$, $i \neq s$ – «структурными».

В [4] разработан метод последовательной оптимизации ПФ ЧМС на модели ФС в рамках общей схемы метода последовательного анализа вариантов с пошаговым конструированием частичных решений. Конкретный алгоритм пошагового конструирования определяется правилом выбора частичных решений (подсетей) $\mathcal{Q}$, подлежащих развитию на каждом шаге, и набор тестов ξ , осуществляющих отсев тех из них, которые не могут быть достроены до оптимальных. Вариация параметров $\mathcal{Q}$ и ξ приводит к различным алгоритмам метода последовательного

анализа вариантов применительно к задачам оптимизации ПФ ЧМС на функциональных сетях.

Наиболее полно рассмотренные выше модели и методы оптимального проектирования ПФ ЧМС первоначально были реализованы в виде гибридной экспертной системы (ГЭС) ИНТЕЛЛЕКТ-2, функционирующей на ПЭВМ типа IBM PC в операционной среде Win32, языки программирования C++Builder и Visual Prolog.

В настоящее время разработана новая версия указанной ГЭС проектирования человеко-машинных систем и принятия решений ИНТЕЛЛЕКТ-3, которая, в отличие от ИНТЕЛЛЕКТ-2, обладает новыми принципиально важными для пользователя возможностями: вставлять альтернативные ТФС в участок ФС, ограниченный двумя дугами; строить все изоморфные представления альтернативного графа; генерировать в ручном и автоматическом режиме конкретный алгоритм направленного перебора; проводить эффективное распараллеливание алгоритма направленного перебора для многопроцессорных и многоядерных ЭВМ.

2. Интеграция оптимизационных моделей ПФ ЧМС с методом имитационного моделирования

В [5] была впервые предложена схема интеграции метода оптимального проектирования ПФ ЧМС на основе ФСТ с методом имитационного моделирования показателей эффективности, качества и надежности отдельных участков процесса, которые нельзя описать функциональной сетью.

Суть предлагаемого подхода состоит в следующем [6–7].

1. Множество альтернатив ПФ ЧМС описывается одной из популярных и наглядных нотаций описания бизнес-процессов – EPC. Данная нотация дополняется специальным блоком для задания альтернативных участков ПФ ЧМС (рис. 3).

2. В каждом блоке, аналогичном ТФЕ в ФС, задаются вероятности исходов выполнения (правильно, ошибка) как функции от различных факторов, например, освещенность рабочего места, квалификация работника и т. п. Кроме того, задаются и формулы для вычисления (изменения) значений факторов в процессе выполнения данного блока.

3. Проводится анализ множества альтернатив ПФ ЧМС на предмет выделения в нем участков, которые нельзя описывать моделью ФС. Так, например, если для линейного участка процесса находится фактор, влияющий на исходы первой и последней операции, то весь участок нельзя описывать ФС. Или для циклического участка процесса выясняется, что фактор на входе в цикл может изменяться внутри цикла.

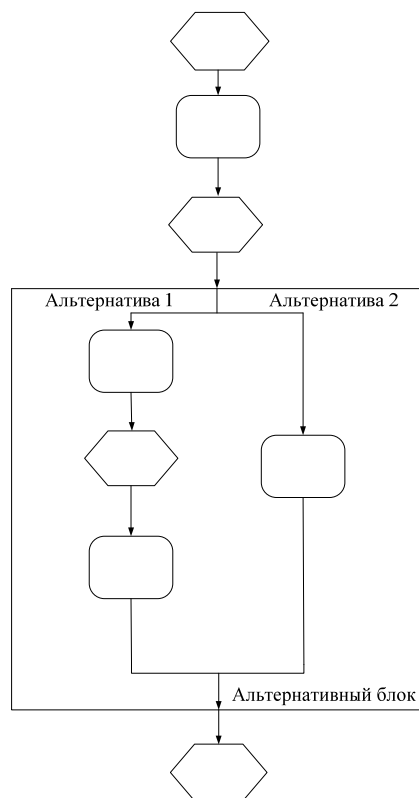


Рис 3. – Пример участка описания процесса с альтернативным блоком

Fig. 3 – Example of a fragment of process description with an alternative case

4. Для выделенных участков процесса, не представимых ФС, проводится имитационное моделирование показателей эквивалентного блока – $B(A)$, $T(A)$ и $V(A)$, который и заменит данный участок. Необходимо заметить, что данный блок, как правило, является альтернативным (рис. 3).

5. После того как во множестве альтернатив ПФ ЧМС, описанного в системе нотаций ЕРС, не останется участков непредставимых ФС, производится трансляция нотаций ЕРС в ФС.

6. Решение задач оптимального проектирования ПФ ЧМС на модели ФС осуществляется в ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3.

Рассмотрим более подробно нотацию описания бизнес-процессов ЕРС [8].

Бизнес-процесс представляет собой последовательность связанных операций с указанием исполнителей и материалов, задействованных в той или иной операции. Одной из наиболее наглядных и понятных неподготовленному пользователю нотаций является ЕРС (Event-driven Process Chain, событийная цепочка процессов), разработанная Институтом информационных систем Университета Саарланда (Германия) в сотрудничестве с компанией SAP AG. Ключевая особенность ЕРС диаграмм – описание бизнес-процесса как последовательности чередующихся событий и функций. Ниже представлены элементы, которые могут быть использованы в описании бизнес-процесса.

Диаграмма процесса в нотации ЕРС представляет собой упорядоченную комбинацию событий и функций. Для каждой функции могут быть определены начальные и конечные события, участники, исполнители, материальные и документальные потоки, сопровождающие ее, а также проведена декомпозиция на более низкие уровни.

В своем полном варианте нотация ARIS ЕРС содержит очень большое количество графических элементов. Поэтому при выполнении проектов создаются так называемые «методические фильтры» (в рамках «соглашений по моделированию»), которые ограничивают количество типов элементов, доступных пользователям при создании схем процессов. В некоторых средствах моделирования нотация ARIS ЕРС сразу реализована с минимально необходимым набором элементов. Однако даже в этом случае неопытные пользователи создают схемы такой сложности, которые потом невозможно однозначно воспринять. К таким схемам требуется подробный текстовый комментарий (либо наличие аналитика, способного объяснить схему).

Нотация ARIS ЕРС поддерживается многими современными средствами моделирования бизнес-процессов.

Программный комплекс имитационного моделирования ПФ ЧМС разработан для операционной системы Windows, написан на языке C# с использованием библиотеки Microsoft .NETFramework 2.0 и компонента построения диаграмм MicrosoftVisio. Компиляция выполнена в среде объектно-ориентированного программирования MicrosoftVisualStudio 2010. Применяется совместно с ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3.

Заключение

Предложен способ расширения области использования ФСТ ЧМС за счет интеграции оптимизационных моделей ПФ ЧМС с методом имитационного моделирования, так как ФСТ можно применять только для процессов без последействия и при отсутствии зависимых операций. Предлагается способ устранения данного ограничения путем интеграции технологии проектирования ПФ ЧМС основе ФСТ с методом имитационного моделирования тех участков процесса, для которых не выполняются указанные выше требования ФСТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Губинский А.И., Евграфов В.Г.** Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: справочник. – М.: Машиностроение, 1993. – 528 с.
2. **Губинский А.И.** Надежность и качество функционирования эргатических систем. – Л.: Наука, 1982. – 270 с.
3. **Губинский А.И., Евграфов В.Г.** Эргономическое проектирование судовых систем управления. – Л.: Судостроение, 1977. – 224 с.
4. **Гриф М.Г., Цой Е.Б.** Автоматизация проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе метода последовательной оптимизации. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 264 с.
5. **Гриф М.Г., Никитюк А.А.** Проектирование и оптимизация бизнес-процессов на основе аппарата функциональных сетей // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы 11 международной научно-методической конференции, Воронеж, 10–11 февраля 2011 г.: в 3 т. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2011. – Т. 1. – С. 209–212.
6. **Grif M.G., Sundui O., Tsoy E.B.** Methods of designing and modeling of man-machine systems // International Summerworkshop Computer Science 2014: proceedings of International Summerworkshop, Germany, Chemnitz, 7–13 Juli 2014. – Chemnitz: Fakultät at für Informatik (TU Chemnitz), 2014. – S. 38–40. – (Chemnitzer Informatik-Berichte; CSR–14–01).
7. **Grif M.G., Sundui O., Tsoy E.B.** Selecting the method of maintenance and elimination of network failures in the National University of Mongolia // News of Science and Education. – 2014. – N 14 (14). – P. 116–123.
8. **Шеер А.В.** ARIS – моделирование бизнес-процессов: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2009. – 224 с.

METHODS AND MODELS OF OPTIMAL DESIGN FOR HUMAN-MACHINE SYSTEMS BASED ON THE FUNCTIONAL STRUCTURAL THEORY

Grif M.G., Ganelina N.D., Tsoy E.B.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper considers models, methods and techniques for designing the process human-machine system functioning based on the functional structural theory of human-machine systems and generalized structural method suggested by Prof. A.I. Gubinsky. Basic terms and definitions used in the functional structural theory and methods of sequential optimization of the process of human-machine systems functioning are given. A new approach to expand application of the functional structural theory for human-machine systems by integrating its optimization models and the simulation method is stated. Since the functional structural theory can be applied only to processes with no aftereffect and dependent operations, the approach described makes it possible to remove this restriction by combining the optimal design technology for the process of human-machine system functioning based on the functional structural theory with the simulation method applied for those process fragments which do not meet the requirements mentioned above. Every alternative human-machine system functioning process can be described as a functional net. It consists of a number of formalized units: basic functional units and their combinations – basic functional structures. A set of alternative human-machine system processes is described by an alternative graph. Several parameters including efficiency indexes, reliability and quality are taken into account while solving an optimization problem. A proposed hybrid expert system having extended functionality makes it possible to build all isomorphic representations of an alternative graph, to generate a specific directed search algorithm automatically and manually, and to realize this algorithm in parallel calculation systems for multiprocessor and multi-core PCs. The suggested algorithm for the integration of the functional structural theory and the simulation modeling allows simulating parameters and indexes of an equivalent unit for those process fragments that cannot be defined in the functional structural theory.

Keywords: functional structural theory, human-machine system, set of alternatives, simulation, CAD.

REFERENCES

1. Gubinskii A.I., Evgrafov V.G. *Informatsionno-upravlyayushchie cheloveko-mashinnye sistemy. Issledovanie, proektirovanie, ispytaniya. Spravochnik* [Control and information human-machine systems. Research, design, testing. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 528 p.
2. Gubinskii A.I. *Nadezhnost' i kachestvo funktsionirovaniya ergaticheskikh sistem* [Reliability and quality of ergatic system functioning]. Leningrad, Nauka Publ., 1982. 270 p.
3. Gubinskii A.I., Evgrafov V.G. *Ergonomicheskoe proektirovanie sudovykh sistem upravleniya* [Ergonomic design for ship control systems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1977. 224 p.
4. Grif M.G., Tsoi E.B. *Avtomatizatsiya proektirovaniya protsessov funktsionirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem na osnove metoda posledovatel'noi optimizatsii* [CAD technique for human-machine systems based on sequential optimization method]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005. 264 p.
5. Grif M.G., Nikityuk A.A. [Design and optimization of business processes on the basis of the device functional networks]. *Materialy 11 mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii "Informatika. Problemy, metodologiya, technologii"* [Proceedings of 11 International Scientific and Methodological Conference "Informatics. Problems, Methodology, Technologies"], Voronezh, VGU Publ., 2011, vol. 1, pp. 209–212. (In Russian)
6. Grif M.G., Sundui O., Tsoy E.B. Methods of designing and modeling of man-machine systems. Proceedings of International Summerworkshop "Computer Science 2014", Germany, Chemnitz, Fakultät at für Informatik (TU Chemnitz), 2014, pp. 38–40.
7. Grif M.G., Sundui O., Tsoy E.B. Selecting the method of maintenance and elimination of network failures in the National University of Mongolia. *News of Science and Education*, 2014, no. 14 (14), pp. 116–123.
8. Scheer A.-W. *ARIS – Business Process Modeling*. Berlin, Springer, 2000. 233 p. (Russ. ed.: Sheer A.V. *ARIS – modelirovanie biznes-protsessov*. Moscow, Williams Publ., 2009. 224 p.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Гриф Михаил Геннадьевич – родился в 1959 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: проектирование и оптимизация процесса функционирования человеко-машинных систем, системы искусственного интеллекта, лингвистические и технологические аспекты разработки компьютерного сурдопереводчика. Опубликовано более 200 научных работ. (Адрес: 630082, РФ, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 238, кв. 562. Email: grifmg@mail.ru).

Grif Mikhail Gennadievich (b. 1959) – D. Sc. (Eng), professor, head of the automation control systems department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on computer sign language translation systems for the deaf, designing and optimization of man-machine systems, AI systems. He is author of more than 200 scientific papers. (Address: 238, Dusi Kovalchuk, Novosibirsk, 630082, Russian Federation. Email: grifmg@mail.ru).



Ганелина Наталья Давидовна – родилась в 1981 году, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: бионические методы оптимизации. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 630075, РФ, г. Новосибирск, ул. Танковая, д. 23/1, кв. 23).

Ganelina Natalie Davidovna (b.1981), C.Sc. (Eng.), associate professor at the automation control systems department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on bionic optimization methods. She is author of 15 scientific papers. (Address: 23/1, Tankovaya Street., Novosibirsk, 630075, Russian Federation. Email: natalie_ganelina@ngs.ru)



Цой Евгений Борисович – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор, проректор по международным связям, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: вероятностное моделирование по группированным данным при исследовании и проектировании человеко-машинных систем, статистические методы обработки данных и планирование эксперимента, компьютерный сурдопереводчик. Опубликовано более 160 научных работ. (Адрес: 630087, РФ, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, д. 24А, кв. 27. Email: ebcoi@nstu.ru).

Tsoy Evgeniy Borisovich (b.1950), D.Sc.(Eng.), professor, vice-rector for International Relations, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on probabilistic modeling in human-machine systems and design based on grouped data, statistical methods for data processing and experiment design, and computer sign language translation systems. He is author of more than 160 scientific papers. (Address: 24A, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630087, Russian Federation. Email: ebcoi@nstu.ru).

Статья поступила 8 декабря 2014 г.

Received December 8, 2014

To Reference:

Grif M.G., Ganelina N.D., Tsoi E.B. Modeli i metody optimal'nogo proektirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem na osnove funktsional'no-strukturnoi teorii [Methods and models of optimal design for human-machine systems based on the functional structural theory]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4, pp. 70–78.