

УДК 65.011.56

СТРАТЕГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОЖЕСТВА АЛЬТЕРНАТИВ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ

М.Г. Гриф, С.А. Кочетов, Е.Б. Цой

Новосибирский государственный технический университет

В статье рассмотрены модели, методы и технологии автоматизации проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем (ПФ ЧМС) на основе функционально-структурной теории (ФСТ) и обобщенного структурного метода проф. А.И. Губинского. Каждый альтернативный процесс функционирования ЧМС задается в виде функциональной сети (ФС) и представляется состоящим из ряда формализованных единиц – типовых функциональных единиц и их типовых комбинаций – типовых функциональных структур. Множество альтернативных процессов ЧМС описывается в виде альтернативного графа. Приведен способ представления ПФ ЧМС в виде бинарных отношений элементов, входящих в ФС. При решении оптимизационной задачи учитываются показатели эффективности, качества и надежности ЧМС. Разработанная гибридная экспертная система имеет расширенный функционал, позволяющий строить все изоморфные представления альтернативного графа, генерировать в ручном и автоматическом режиме конкретный алгоритм направленного перебора. Предложен алгоритм определения границ ФС, между которыми возможно задать альтернативные участки ПФ ЧМС. Указан метод определения принадлежности ФС, заданной в виде бинарных отношений, к классу сетей, описываемых в рамках ФСТ. Приведена программа, реализующая эти возможности.

Ключевые слова: функционально-структурная теория, человеко-машинная система, множество альтернатив, автоматизация проектирования, нисходящее проектирование, восходящее проектирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-42-49

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 создает объективные 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. На сегодняшний день существует хорошо

изученная нисходящая стратегия проектирования ФС [4]. В настоящей статье представлена восходящая стратегия проектирования, а также смешанная стратегия, где используются преимущества как нисходящей, так и восходящей стратегии.

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 .

В основе 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 $P(t < T_d)$ лежит вероятностный граф и правила его редукции (укрупнения).

Использование функционально-структурной теории и обобщенного структурного метода А.И. Губинского при проектировании ЧМС ПФ предполагает, что каждый альтернативный процесс функционирования ЧМС задается в виде функциональной сети и представляется состоящим из ряда формализованных единиц – типовых функциональных единиц (ТФЕ) и их типовых комбинаций – типовых функциональных структур (ТФС)

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 .

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 [4–7] 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{D} , подлежащих развитию на каждом шаге, и набор тестов ξ , осуществляющих отсев тех из них, которые не могут быть достроены до оптимальных. Вариация пара-

метров ϑ и ξ приводит к различным алгоритмам метода последовательного анализа вариантов применительно к задачам оптимизации ПФ ЧМС на функциональных сетях.

2. Стратегии проектирования множества альтернатив

Одной из возможных стратегий проектирования ПФ ЧМС является стратегия «сверху вниз», когда на самом верхнем уровне иерархии ФС рассматривается как составная операция, представляющая суперпозицию множества альтернативных как структурных, так и параметрических способов ее выполнения. Таким образом, множество альтернативных процессов ЧМС пользователь описывает в виде альтернативного графа (рис. 1)

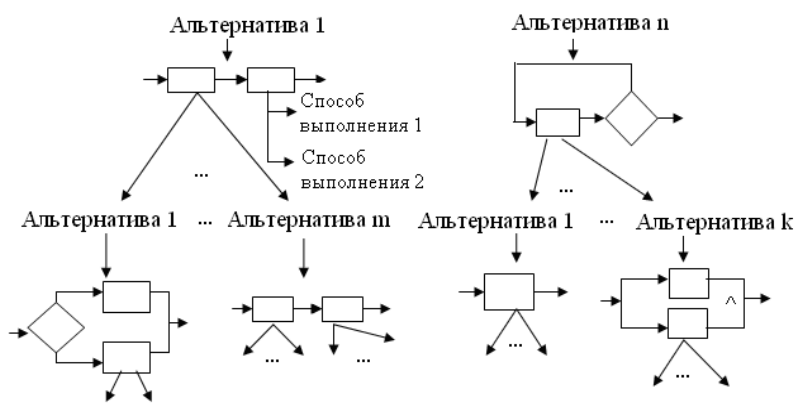


Рис. 1 – Альтернативный граф

Fig. 1 – Alternative graph

Наиболее полно эта стратегия была реализована гибридной экспертной системой (ГЭС) ИНТЕЛЛЕКТ-2 [4], функционирующей на ПЭВМ типа IBM PC в операционной среде Win32, языке программирования C++Builder и Visual Prolog.

Одним из недостатков такого подхода является невозможность в явном виде представить ПФ ЧМС как последовательность выполняемых операций. Также нет возможности рассмотреть участок ФС и оценить показатели его функционирования. Разработанная в настоящее время ГЭС проектирования человеко-машинных систем и принятия решений ИНТЕЛЛЕКТ-3 [8] решает проблему отсутствия последовательного представления выполняемых операций. Помимо этого она обладает и другими 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. Однако в ней отсутствует способ формализованного описания ФС.

Одним из подходящих является способ описания ФС – описание в виде множества бинарных отношений $\{(O_1, O_2), \dots, (O_{n-1}, O_n)\}$ всех элементов ФС, обладающих свойством: O_n следует за O_{n-1} . Для удобства описания начало и конец каждой ТФЕ, входящей в ФС, обозначается специальным композиционером – транзитом «И» T [2]. Два транзита, первый из которых обозначает окончание ТФЕ, второй – начало следующей ТФЕ, заменяется на один транзит. Начало и

окончание ФС также будем обозначать композиционерами H и K . Начальным транзитом ФС будем называть транзит, который следует за композиционером H . Конечный транзит – транзит за которым следует композиционер K .

Формула (3) показывает пример описания ПФ ЧМС (рис. 2) в виде множества бинарных отношений.

$$R_{\text{ФС}} = \{(H, T_1), (T_1, A_1), (A_1, T_2), (T_2, A_2), (A_2, T_3), (T_3, \beta_{\text{Ф}}), (\beta_{\text{Ф}}, T_4), (\beta_{\text{Ф}}, A_2), (T_4, \beta_{\text{Д}}), (\beta_{\text{Д}}, T_5), (\beta_{\text{Д}}, A_1), (T_5, A_3), (A_3, T_6), (T_6, K)\}, \quad (3)$$

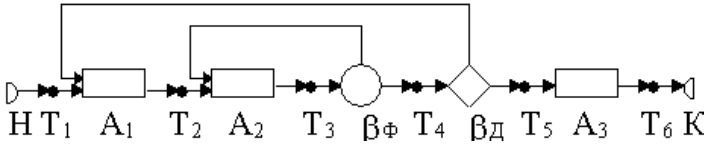


Рис. 2 – Пример процесса функционирования человеко-машинной системы

Fig. 2 – Example of the processes of man-machine systems

Основной проблемой при таком подходе является возможность описать ФС, которую нельзя представить в виде суперпозиции ТФС. Также необходимо уметь определять, между какими точкам (транзитами «И») можно сформировать альтернативный участок ПФ ЧМС, не нарушив суперпозиции. Для решения этих проблем на базе ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3 реализован алгоритм нахождения этих точек. Суть алгоритма состоит в следующем.

Шаг 1. Проводится анализ каждого транзита «И», входящего в ФС, на предмет построения множества, изоморфного некоторой ТФС, началом которой является этот транзит «И».

Шаг 2. Если от транзита «И», взятого на шаге 1, найдено множество, изоморфное ТФС, то формируем множество W групп транзитов «И», между которыми возможно задать структурные альтернативы. Множество W формируется на основании транзитов, входящих в ТФС, заменяемую в ФС на эквивалентную рабочую операцию. Если от транзита изоморфное множество не найдено, то повторяем шаг 1 для следующего транзита «И».

Шаг 3. Повторяем шаги 1 и 2, пока ФС не будет преобразована в сеть, состоящую из одной эквивалентно РО. Если, рассмотрев все транзиты «И» на шаге 1, не удалось найти множество, изоморфное ТФС, то делаем вывод, что данная ФС не описывает ПФ ЧМС в рамках ФСТ.

Необходимым условием представления ФС в виде суперпозиции является нахождение начального и конечного транзитов в одном подмножестве множества W . Результат работы алгоритма для примера, показанного на рис. 2, представляется в виде множества $W = \{T_1, T_5, T_6\}, \{T_2, T_4\}, \{T_3\}$. Сеть представима в виде суперпозиции, так как начальный транзит T_1 и конечный T_6 входят в одно подмножество $\{T_1, T_5, T_6\}$. Данный алгоритм реализован в подпрограмме «Суперпозиция функциональной сети» (рис. 3).

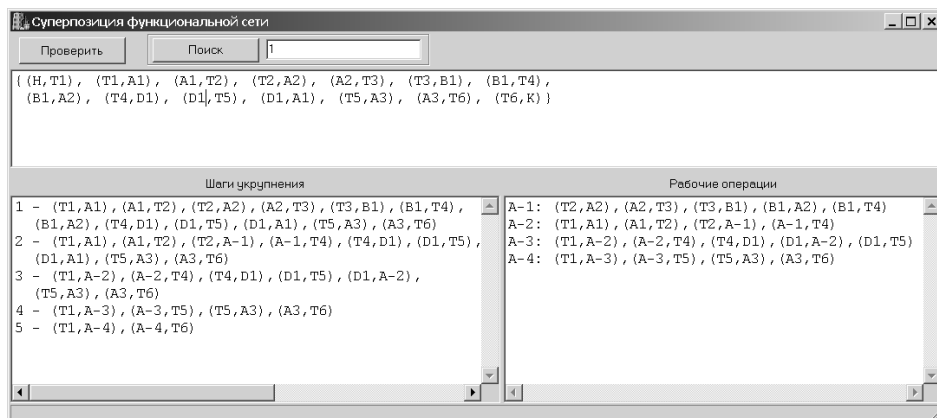


Рис 3 – Главное окно программы

Fig. 3 – The main program window

В верхнем окне программы вводится описание ФС в виде бинарных отношений. При нажатии на кнопку «Проверить» производится попытка построить суперпозицию ФС. В случае успеха в окне «Шаги укрупнения» показана последовательность построения суперпозиции, при этом для эквивалентных рабочих операции присваиваются отрицательные (системные) номера. Исходная ТФС, которая была преобразована в эквивалентную РО, показана в окне «Рабочие операции». При нажатии на кнопку «Проверить», на основании введенного номера транзита, производится поиск транзитов, между которыми возможно задание структурных альтернатив.

Заключение

Приведен способ представления ПФ ЧМС в виде бинарных отношений элементов, входящих в ФС. Разработанная гибридная экспертная система имеет расширенный функционал, позволяющий строить все изоморфные представления альтернативного графа, генерировать в ручном и автоматическом режиме конкретный алгоритм направленного перебора. Предложен алгоритм определения границ ФС, между которыми возможно задать альтернативные участки ПФ ЧМС. Указан метод определения принадлежности ФС, заданной в виде бинарных отношений, к классу сетей, описываемых в рамках ФСТ. Приведена программа, реализующая эти возможности.

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., Никитик 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: Изд-во 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 July 2014. – Chemnitz: Fakultät für Informatik (TU Chemnitz), 2014. – P. 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. **Зайков А.В., Кочетов С.А., Гриф М.Г.** Методы и средства оптимального проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 3 (32). – С. 95–110.

DESIGN STRATEGIES FOR MANY ALTERNATIVES IN OPTIMIZATION PROBLEMS BASED ON THE FUNCTIONAL- STRUCTURAL THEORY

Grif M.G., Kochetov S.A., Tsoy E.B.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

The article describes models, methods and technologies to automate the design of the processes of man-machine system functioning based on the functional-structural theory (FST) and a generalized structural method proposed by Prof. A.I Gubinsky. Each alternative process of man-machine system functioning is defined as a functional network (FN), and appears to consist of a number of formal units referred to as standard functional units and their typical combinations - standard functional structures. Many alternative processes of man-machine systems are described as an alternative graph. The processes of man-machine system functioning are presented as binary relations of elements forming the FN. While solving the optimization problem indicators of performance, quality and reliability of man-machine systems are taken into account. The developed hybrid expert system has an advanced functionality that allows building all the isomorphic representations of the alternative graph and generating a specific algorithm of purposive enumeration in manual and automatic modes. An algorithm is proposed to determine the boundaries of the FN between which it is possible to define alternative sites of the processes of man-machine system functioning. A specified method to determine the belonging of a FN, given in the form of binary relations, to a class of networks described in the framework of the functional-structural theory is stated. The program implementing these potentialities is given.

Keywords: functional and structural theory, man-machine system, many alternatives, design automation, downgoing design, upgoing design.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-42-49

REFERENCES

1. Gubinskii A.I., Evgrafov V.G. *Informatsionno-upravlyayushchie cheloveko-mashinnye sistemy: issledovanie, proektirovanie, ispytaniya*. Spravochnik [Information and controlling man-machine systems: research, design, tests. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 528 p.
2. Gubinskii A.I. *Nadezhnost' i kachestvo funktsionirovaniya ergaticheskikh sistem* [Reliability and quality of ergative systems functioning]. Leningrad, Nauka Publ., 1982. 270 p.
3. Gubinskii A.I., Evgrafov V.G. *Ergonomicheskoe proektirovanie sudovykh sistem upravleniya* [Ergonomic design of 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 confe-*

- rencii "Informatika. Problemy, metodologiya, technologii" [Proceedings of 11 International Scientific and Methodological Conference "Informatics. Problems, Methodology, Technologies"], Voronezh, 10–11 February 2011, vol. 1, pp. 209–212. (In Russian)
6. Grif M.G., Sundui O., Tsoy E.B. Methods of desingning and modeling of man-machine systems. *Proceedings of International Summerworkshop "Computer Science 2014"*, Germany, Chemnitz, Fakultät at für Informatik (TU Chemnit), 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. Zaikov A.V., Kochetov S.A., Grif M.G. Metody i sredstva optimal'nogo proektirovaniya protsessov funktsionirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem na osnove funktsional'no-strukturnoi teorii [Methods of optimal design of man-machine systems functioning processes based on the functional-structural theory]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 3 (32), pp. 95–110.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Гриф Михаил Геннадьевич – родился в 1959 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: проектирование и оптимизация процесса функционирования человеко-машинных систем, системы искусственного интеллекта, лингвистические и технологические аспекты разработки компьютерного сурдопереводчика. Опубликовано более 230 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: grifmg@mail.ru).

Grif Mikhail Gennadievich (b. 1959) – Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Automation Control Systems department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on computer sign language translation systems for the deaf, design and optimization of man-machine systems, AI systems. He is the author of more than 200 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: grifmg@mail.ru).



Кочетов Станислав Александрович – родился в 1979 году, аспирант кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: проектирование и оптимизация процесса функционирования человеко-машинных систем. Опубликовано 8 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20).

Kochetov Stanislav Aleksandrovich (b. 1979), a PhD student at the Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are design and optimization of the functioning process of man-machine systems. He has published 8 scientific articles. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation).



Цой Евгений Борисович – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор, проректор по международным связям Новосибирского государственного технического университета. 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: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: ebcoi@nstu.ru).

Tsoy Evgeniy Borisovich (b.1950) – Doctor of Science (Eng.), Professor, Vice-rector for International Relations in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on probabilistic modelling in human-machine systems research and design based on grouped data, statistical methods for data processing and experiment design, computer sign language translation systems. He is the author of more than 160 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: ebcoi@nstu.ru).

*Статья поступила 08 октября 2015 г.
Received on October 8, 2015*

To Reference:

Grif M.G., Kochetov S.A., Tsoy E.B. Strategii proektirovaniya mnozhestva al'ternativ v zadachakh optimizatsii na osnove funktsional'no-strukturnoi teorii [Design strategies for many alternatives in optimization problems based on the functional-structural theory]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 4 (29), pp. 42–49. doi: