



УДК 501.1

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ В ЧЕЛОВЕКОМАШИННЫХ СИСТЕМАХ

**А. Ф. Резчиков¹, В. А. Кушников², В. А. Иващенко³,
А. С. Богомолов⁴, Л. Ю. Филимонюк⁵, К. И. Шоломов⁶**

¹Резчиков Александр Федорович, член-корреспондент РАН, научный руководитель, Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410024, Саратов, Рабочая, 24, iptmuran@san.ru

²Кушников Вадим Алексеевич, доктор технических наук, директор, Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410024, Саратов, Рабочая, 24, iptmuran@san.ru

³Иващенко Владимир Андреевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410024, Саратов, Рабочая, 24, iptmuran@san.ru

⁴Богомолов Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической кибернетики и компьютерных наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83; Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410024, Саратов, Рабочая, 24, alexbogomolov@ya.ru

⁵Филимонюк Леонид Юрьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410024, Саратов, Рабочая, 24, filimonyukleonid@mail.ru

⁶Шоломов Константин Игоревич, аспирант, Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410024, Саратов, Рабочая, 24, k.sholomov@gmail.com

Предлагается способ представления переменных причинно-следственных связей при моделировании процессов в динамических системах. Такое представление соответствует изменяющим условиям, которые связаны с действием многочисленных разнородных факторов, сопровождающих функционирование сложных человекомашинных систем. Наличие или отсутствие причинно-следственных отношений между отдельными событиями в предлагаемой модели определяется как результат действия заданных стохастических или детерминированных функций. Динамика в представлении причинно-следственных связей достигается путем формирования этих связей на основе значений общих переменных, которые соответствуют различным событиям в системе. В существующих программных комплексах для анализа безопасности техногенных систем представление динамики в причинно-следственных моделях достаточно ограничено. При этом такое представление актуально для моделирования критических сочетаний событий, приводящих к запроектным авариям. Динамические причинно-следственные модели позволяют определять временные интервалы, когда система наиболее уязвима для возникновения критических сочетаний событий, анализировать причины возникновения и способы предотвращения таких сочетаний. Предлагаемая модель реализована в разработанном программном обеспечении, которое будет использоваться для моделирования и анализа нарушений процессов функционирования в человекомашинных, организационных и других динамических системах с помощью деревьев событий.

Ключевые слова: причинно-следственная связь, критическое сочетание событий, авария, катастрофа, дерево отказов, минимальное сечение, динамическое дерево событий, динамическая система.

DOI: 10.18500/1816-9791-2017-17-1-109-116



ВВЕДЕНИЕ

Функционирование человекомашинных систем сопровождается сложным взаимодействием разнородных процессов. Для предотвращения аварий и катастроф в таких системах требуется анализировать эти процессы, что предполагает использование причинно-следственных схем событий, которые их характеризуют и программного обеспечения для их анализа [1–3]. Такие схемы в общем случае являются переменными и это требует вносить в их представление элементы динамики. Различные реализации причинно-следственного подхода (деревья отказов, событий, причинно-следственные комплексы) традиционно обладали ограничением в виде статического характера представления причинно-следственных связей.

В современных программных комплексах по расчету надежности динамика в определенном смысле учитывается, например, в RELEX (США) [4] реализована возможность задания динамических операторов дерева отказов, учитываются временные соотношения. Находят широкое применение и другие программные комплексы: A.L.D.Group (Израиль), ISOGRAPH (Великобритания) [5, 6], Risk Spectrum (Швеция). Эти продукты реализуют достаточно широкий спектр функций, однако обладают такими недостатками, как высокая стоимость, технологическая зависимость, необходимость специального обучения персонала. Из отечественных разработок для структурно-логического моделирования надежности и безопасности отметим Арбитр, ПК АСМ, ПК Универсал, отличающиеся меньшим спектром предоставляемых инструментов, но в большей степени реализующие отдельные оригинальные функции и результаты.

Вместе с тем в перечисленных и других программных комплексах не акцентированы возможности моделирования динамики причинно-следственных связей, которые могут возникать и распадаться в зависимости от возникающих условий функционирования. В то же время такие явления, как появление или исчезновение причинно-следственных связей в системе потенциально порождают новые уязвимости, за счет которых возникают критические сочетания событий [7–12], приводящие к запроектным авариям.

Ввиду сказанного актуальной является разработка математического и программного обеспечения для моделирования переменных связей в причинно-следственных структурах. Возникает необходимость в разработке математических моделей, которые будут использоваться при решении задачи.

1. МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

Пусть задана динамическая система A . Для моделирования причинно-следственных связей в этой системе выберем множество событий $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ и множество переменных $C = \{c_1, \dots, c_m\}$, принимающих значения из некоторых множеств $D = \{D_1, \dots, D_m\}$. Переменные и события могут относиться как к самой системе, так и к её внешней среде. Примем, что поведение системы и связи в ней определяется выбранными событиями и переменными.

Установим отношение $\rho \subseteq E \times C$ между событиями и переменными. В результате каждому событию $e_i \in E$ будет соответствовать некоторое множество переменных



$C(e_i) \subseteq C$. Для любой переменной $A_j \in C(e_i)$ её значение в момент времени t обозначим через $A_{i,j}(t)$.

Будем говорить, что в момент t между событиями $e_i, e_j \in E$ существует причинно-следственная связь, если $C(e_i) \cap C(e_j) \neq \emptyset$, и хотя бы одна переменная $A_k \in C(e_i) \cap C(e_j)$ имеет равные значения для событий $e_i, e_j \in E$, т. е. $A_{i,k}(t) = A_{j,k}(t)$. Таким образом, причинно-следственные связи меняются во времени, что соответствует характеру динамических систем.

2. РЕАЛИЗАЦИЯ В ПРОГРАММЕ

Приведенная выше модель была реализована в компоненте разработанного программного обеспечения [12]. Входными данными служат множество событий $E = \{e_1, \dots, e_n\}$, множество переменных $C = \{c_1, \dots, c_m\}$, множество связей событий и переменных $\rho \subseteq E \times C$, начальные данные $(c_1(0), \dots, c_m(0)) \in D_1 \times \dots \times D_m$ и выражения для определения динамики переменных, отрезок модельного времени $[t_0, t_1]$ и способ подсчета модельного времени. Выходные данные программы — значения схемы причинно-следственных связей в системе на отрезке $[t_0, t_1]$. Ниже приводятся фрагменты выполнения программы.

3. ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИЧИНО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

В качестве примера работы программы предлагается рассмотреть процесс образования причинно-следственных связей в системе с множеством событий $E = \{e_1, e_2, e_3\}$ и множеством переменных $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$, принимающих значения в области целых неотрицательных чисел. Отношение между переменными и событиями задано таким образом, что

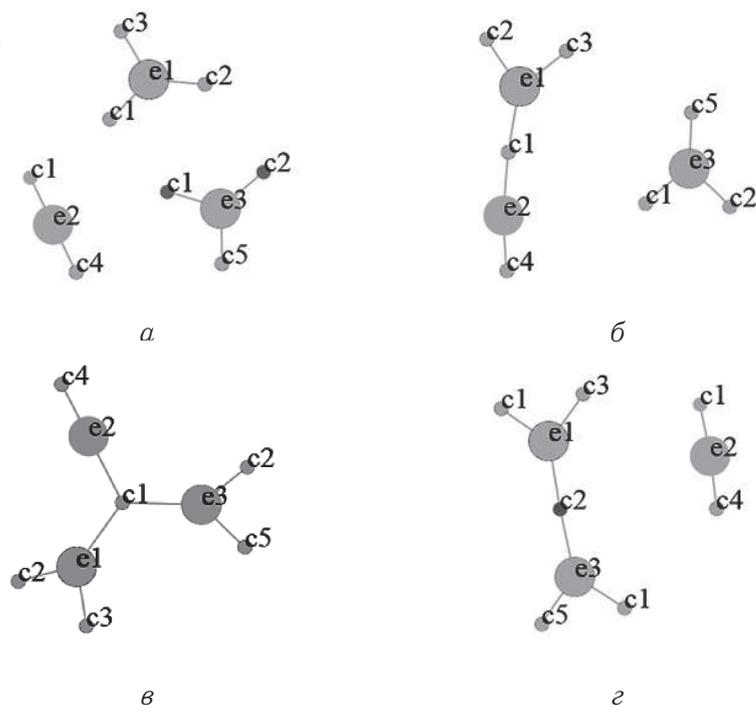
$$\left[C(e_1) = \{c_1, c_2, c_3\}, C(e_2) = \{c_1, c_4\}, C(e_3) = \{c_1, c_2, c_5\} \right].$$

В таблице приведены условия для определения динамики переменных, связанных с событиями системы.

Функции, определяющие значения переменных

$e_i \backslash c_i$	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
e_1	$c_{1,1}(t) = 1 + t \pmod 3$	$c_{1,2}(t) = 1$	$c_{1,3}(t) = 0$	Не связаны	Не связаны
e_2	$c_{2,1}(t) = t \pmod 4$	Не связаны	Не связаны	$c_{2,4}(t) = 3$	Не связаны
e_3	$c_{3,1}(t) = t \pmod 5$	$c_{3,2}(t) = 3$	Не связаны	Не связаны	$c_{3,5}(t) = 6$

Как видно из таблицы, в данном примере динамика будет проявляться только по переменной c_1 , по остальным переменным связи не будут образоваться, так как переменная c_2 имеет разные значения для разных событий и эти значения не меняются, а по переменным c_3, c_4, c_5 события не связаны друг с другом. Фрагменты процесса моделирования связей в системе представлены на рисунке.



Пример этапов моделирования: $a - t = 0$; $б - t = 34$; $в - t = 81$; $г - t = 128$

Как видно из рисунка, процесс моделирования позволил определить момент времени ($t = 81$), когда связь существует между всеми тремя рассматриваемыми событиями. Воздействие на систему в этот момент может иметь более значительные последствия. В следующий момент соотношение значений переменных изменяется и структура причинно-следственных связей становится другой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается математическая модель, позволяющая представить переменные связи в причинно-следственных комплексах. Показан пример использования предложенной модели в разработанном программном обеспечении. Работа программы представляет особый интерес в случае большого числа событий и переменных, динамика которых задана разнородными условиями, включая случайные процессы, сложные функции и многовариантное поведение переменных, в том числе в зависимости друг от друга. Программные комплексы, которые будут разработаны в рамках проводимых исследований, найдут применение при построении динамических деревьев событий и отказов [13–16], причинно-следственных схем в моделях системной динамики [17–20] и дадут возможность введения переменных связей, более адекватно отражающих функционирование динамических систем. Полученные результаты необходимы для анализа, прогнозирования и предотвращения критических сочетаний событий, возникающих в процессе функционирования человекомашинных объектов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-01-00536а).

Библиографический список

1. Bjorkman K. Digital Automation System Reliability Analysis — Literature survey // VTT. Resercher report VTT-R-08153-09. URL: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/VTT-R-08153-09.pdf> (дата обращения : 15.06.2016).



2. Викторова В. С., Кунтшер Х. П., Степанянц А. С. Анализ программного обеспечения моделирования надежности и безопасности систем // Надежность. 2006. № 4(19). С. 46–57.
3. Строгонов А., Жаднов В., Полесский С. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 183–190.
4. Bai X., Sun L. P., Sun H. Risk Assessment of Hoisting Aboard and Installation for Offshore Wind Turbine // ASME 2012 31st Intern. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 2 : Structures, Safety and Reliability. P. 107–114. DOI:10.1115/OMAE2012-83187.
5. Sharma P. K., Bhuvana V., Ramakrishnan M. Reliability analysis of Diesel Generator power supply system of Prototype Fast Breeder Reactor // Nuclear engineering and design. 2016. Vol. 310. P. 192–204. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.10.013.
6. Chaari M., Ecker W., Kruse T., Novello C., Tabacaru B. A. Transformation of Failure Propagation Models into Fault Trees for Safety Evaluation Purposes // 46th Annual IEEE/IFIP Intern. Conf. on Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W). 2016. P. 226–229. DOI: 10.1109/DSN-W.2016.18.
7. Богомолов А. С. Комплексный контроль ресурсов сложных человекомашинных систем // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2013. Т. 13, вып. 3. С. 83–87.
8. Ключев В. В., Резчиков А. Ф., Богомолов А. С., Кошечая Е. М., Уков Д. А. Причинно-следственный подход к управлению ресурсом печи обжига при производстве цемента // Контроль. Диагностика. 2012. № 7. С. 30–36.
9. Резчиков А. Ф., Богомолов А. С., Иващенко В. А., Филимонюк Л. Ю. Подход к обеспечению и поддержанию безопасности сложных систем на основе автоматных моделей // Управление большими системами : сб. тр. 2015. № 54. С. 179–194.
10. Rezchikov A. F., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Bogomolov A. S., Filimonyuk L., Kachur K. P. Control of the air transportation system with flight safety as a criterion // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. Vol. 466. P. 423–432.
11. Новожиллов Г. В., Резчиков А. Ф., Неймарк М. С., Богомолов А. С., Цесарский Л. Г., Филимонюк Л. Ю. Проблема критических сочетаний событий в системе «экипаж – воздушное судно – диспетчер» // Полет. 2015. № 2. С. 10–16.
12. Шоломов К. И. Комплекс программ моделирования и анализа критических сочетаний событий на основе построения и обработки динамических причинно-следственных деревьев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. Саратов : Изд-во СГТУ имени Гагарина Ю. А., 2015. С. 300–304.
13. Можаяева И. А., Нозик А. А., Струков А. В., Чечулин А. А. Современные тенденции структурно-логического анализа надежности и кибербезопасности АСУТП // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах : тр. междунар. науч. шк. МАБР-2015. СПб. : Изд-во ИПМаш РАН, 2015. С. 140–145.
14. Белова В. В., Филин В. М. Количественная оценка показателя надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата при электрических испытаниях // Вестн. НПО им. С. А. Лавочкина. 2013. № 3 (19). С. 50–56.
15. Белова В. В. Моделирование надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата // Тр. междунар. симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 1. С. 148–154.
16. Викторова В. С., Степанянц А. С. Многоуровневое моделирование надежности систем // Датчики и системы. 2014. № 6(181). С. 33–37.
17. Адамович К. Ю. Математическая модель для прогнозирования значений показателей безопасности транспортной системы // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. Саратов : Изд-во СГТУ им. Гагарина Ю. А., 2015. № 6(76). С. 146–151.



18. Лычкина Н. Н. Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития // Бизнес-информатика. 2009. № 3(9). С. 55–67.
19. Форрестер Дж. Мирровая динамика. М. : Наука, 1978. 168 с.
20. Oliva R. Structural dominance analysis of large and stochastic models // System dynamics review. 2016. Vol. 32. P. 26–51. DOI: 10.1002/sdr.1549.

Образец для цитирования:

Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Иващенко В. А., Богомолов А. С., Филимонюк Л. Ю., Шоломов К. И. Представление динамических причинно-следственных связей в человеко-машинных системах // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2017. Т. 17, вып. 1. С. 109–116. DOI: 10.18500/1816-9791-2017-17-1-109-116.

The Dynamical Cause-effect Links' Presentation in Human-machine Systems

A. F. Rezchikov¹, V. A. Kushnikov², V. A. Ivashchenko³,
A. S. Bogomolov⁴, L. Yu. Filimonyuk⁵, K. I. Sholomov⁶

¹Aleksandr F. Rezchikov, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24, Rabochaya str., 410028, Saratov, Russia, iptmuran@san.ru

²Vadim A. Kushnikov, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24, Rabochaya str., 410028, Saratov, Russia, iptmuran@san.ru

³Vladimir A. Ivashchenko, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24, Rabochaya str., 410028, Saratov, Russia, iptmuran@san.ru

⁴Aleksey S. Bogomolov, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya str., 410012, Saratov, Russia; Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24, Rabochaya str., 410028, Saratov, Russia, alexbogomolov@ya.ru

⁵Leonid Yu. Filimonyuk, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24, Rabochaya str., 410028, Saratov, Russia, filimonyukleonid@mail.ru

⁶Konstantin I. Sholomov, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24, Rabochaya str., 410028, Saratov, Russia, k.sholomov@gmail.com

A method of presentation variable cause-effect links for modeling processes in dynamic systems is proposed. Such a representation corresponds to the changing conditions that are associated with the action of many diverse factors that accompany the functioning of complex human-machine systems. The presence or absence of a causal relationship between the individual events in the proposed model is defined as a result of a set of stochastic or deterministic functions. Trends in the representation of cause-effect links are achieved by formation of these relations on the basis of common values of variables that correspond to various events in the system. The existing software systems for the analysis of security of technological systems are rather limited in view of dynamics of cause-effect models. The representation under discussion is actual for modeling critical combinations of events leading to beyond design basis accidents. Dynamic cause-effect models make possible to determine time intervals when the system is most vulnerable to the emergence of critical combinations of events, to analyze the causes and ways to prevent such combinations. The proposed model is implemented in developed software that will be used for modeling and analysis of malfunctions in the functioning of man-machine, organizational and other dynamic systems with the help of using event trees.

Key words: cause-effect link, the critical combination of events, accident, catastrophe, fault tree, the minimum cross-section, the dynamic event's tree, dynamic system.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 16-01-00536a).



References

1. Bjorkman K. Digital Automation System Reliability Analysis — Literature survey. VTT, Resercher report VTT-R-08153-09. Available at: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/VTT-R-08153-09.pdf> (accessed 15.06.2016).
2. Viktorova V. S., Kuntsher Kh. P., Stepaniants A. S. Analiz programmnoogo obespecheniia modelirovaniia nadezhnosti i bezopasnosti sistem [Analysis of simulation software reliability and security systems]. *Dependability*, 2006, no. 4(19), pp. 46–57 (in Russian).
3. Strogonov A., Zhadnov V., Polesskii S. Obzor programmnykh kompleksov po raschetu nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Overview of software for analyzing the reliability of complex technical systems]. *Components & Technologies*, 2007, no. 5, pp. 183–190 (in Russian).
4. Bai X., Sun L. P., Sun H. Risk Assessment of Hoisting Aboard and Installation for Offshore Wind Turbine. *ASME 2012 31st Intern. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Vol. 2 : Structures, Safety and Reliability, pp. 107–114. DOI:10.1115/OMAE2012-83187.
5. Sharma P. K., Bhuvana V., Ramakrishnan M. Reliability analysis of Diesel Generator power supply system of Prototype Fast Breeder Reactor. *Nuclear engineering and design*, 2016, vol. 310, pp. 192–204. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.10.013
6. Chaari M., Ecker W., Kruse T., Novello C., Tabacaru B. A. Transformation of Failure Propagation Models into Fault Trees for Safety Evaluation Purposes. *46th Annual IEEE/IFIP Intern. Conf. on Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W)*, 2016, pp. 226–229. DOI: 10.1109/DSN-W.2016.18
7. Bogomolov A. S. Integrated resource control of complex man-machine system. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Math. Mech. Inform.*, 2013, vol. 13, iss. 3, pp. 83–87 (in Russian).
8. Kluev V. V., Rezchikov A. F., Bogomolov A. S., Koshevaya E. M., Ukov D. A. Cause-conditional approach to resource management of furnace in cement production. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2012, vol. 7, pp. 30–36 (in Russian).
9. Rezchikov A., Bogomolov A., Ivaschenko V., Filimonyuk L. Applying automation models to support and maintain safety in complex systems. *Large-scale Systems Control*, 2015, vol. 54, pp. 179–194 (in Russian).
10. Rezchikov A. F., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Bogomolov A. S., Filimonyuk L., Kachur K. P. Control of the air transportation system with flight safety as a criterion. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, vol. 466, pp. 423–432.
11. Novozhilov G. V., Rezchikov A. F., Neumark M. S., Bogomolov A. S., Tsesarskiy L. G., Filimonyuk L. Yu. Problem critical events in the combination “Crew — Aircraft — Manager” system. *Polyot*, 2015, vol. 2, pp. 10–16 (in Russian).
12. Sholomov K. I. Complex events critical simulation and analysis programs based on combinations Therefore the structure and processing of dynamic causal trees. *Proc. XXVIII Intern. Sci. Conf. on Mathematical Methods in Technics and Technologies — MMTT-28*, Saratov, Publ. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2015, pp. 300–304 (in Russian).
13. Mozhaeva I. A., Nozik A. A., Strukov A. V., Chechulin A. A. Sovremennye tendentsii strukturno-logicheskogo analiza nadezhnosti i kiberbezopasnosti ASUTP [Current trends structural and logical analysis of reliability and cybersecurity PCS]. *Modeling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems : Proc. Intern. Sci. School*, St. Petersburg, Publ. Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, 2015, pp. 140–145 (in Russian).



14. Belova V. V., Filin V. M. Quantitative assessment of the reliability for the spacecraft thermal control system during electrical testing. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 2013, no. 3 (19), pp. 50–56 (in Russian).
15. Belova V. V. Modelirovanie nadezhnosti sistemy obespecheniia teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata [Simulation of the system to ensure the reliability of the thermal regime of the spacecraft]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i Kachestvo* [Proc. Intern. Symposium "RELIABILITY and QUALITY"], 2013, vol. 1, pp. 148–154 (in Russian).
16. Viktorova V. S., Stepanyants A. S. Multilevel modeling of system reliability. *Datchiki & Systemi* [Sensors & Systems], 2014. no. 6(181), pp. 33–37 (in Russian).
17. Adamovich K. Yu. Matematicheskaja model' dlja prognozirovaniia znachenii pokazatelei bezopasnosti transportnoi sistemy [Mathematical model to predict the safety performance values transport system]. *Mathematical Methods in Technics and Technologies — MMTT*, Saratov, Publ. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2015, no. 6(76), pp. 146–151 (in Russian).
18. Lychkina N. N. Retrospectives and perspectives of system-dynamics. Analysis of dynamics of the sd development. *Business Informatics*, 2009, no. 3(9), pp. 55–67 (in Russian).
19. Forrester J. *World Dynamics*. Moscow, Nauka, 1978. 168 p. (in Russian).
20. Oliva R. Structural dominance analysis of large and stochastic models. *System dynamics review*, 2016, vol. 32, pp. 26–51. DOI: 10.1002/sdr.1549.

Cite this article as:

Rezchikov A. F., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Bogomolov A. S., Filimonyuk L. Yu., Sholomov K. I. The Dynamical Cause-effect Links' Presentation in Human-machine Systems. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Math. Mech. Inform.*, 2017, vol. 17, iss. 1, pp. 109–116 (in Russian). DOI: 10.18500/1816-9791-2017-17-1-109-116.
