УДК 681.5
DOI 10.34822/1999-7604-2020-2-50-57

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ Е-СЕТЕЙ

М. Я. Брагинский ✉, Д. В. Тараканов
Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
✉*E-mail: mick17@mail.ru*

В статье представлен сетевой подход к построению аналитико-имитационной модели автоматизированной системы управления, учитывающий разнородные параллельные процессы в технических системах. В качестве целостного компонента модели автоматизированной системы управления используется Е-сетевая взаимосвязанная иерархическая структура, имитирующая поведение человека-оператора или коллектива операторов, а также тепловые режимы и ее надежность. Полученная математическая модель управления позволяет получать и анализировать информацию о структуре и поведении исследуемой системы с учетом действий оператора технологического процесса.

Ключевые слова: дискретно-непрерывное моделирование, Е-сети, человеко-машинная система, автоматизированная система управления.

CONCEPT DEVELOPMENT OF ANALYTICAL AND SIMULATION MODELS FOR HUMAN-MACHINE CONTROL SYSTEMS USING E-NETWORKS

M. Ya. Braginsky ✉, D. V. Tarakanov
Surgut State University, Surgut, Russia
✉*E-mail: mick17@mail.ru*

The article considers a comprehensive approach to building analytical and simulation models of automated control systems. The well-known network approach is used as a modeling formalism, which allows effectively forming models that take into account heterogeneous parallel processes in engineering systems. As an integral component of the model for an automated control system, the E-network interconnected hierarchical structure is used that simulates not only behavior but also thermal modes and reliability. The derived mathematical model provides information about the structure and behavior of the system under study, taking into account the work process of the operator group.

Keywords: discrete-continuous modeling, E-networks, human-machine system, automated control system.

Введение

Современный уровень развития управлением сложными техническими системами требует построения логико-динамических моделей разнородных параллельных процессов (механических, электрических, гидравлических и т. д.) и расчета показателей их надежности [1–2]. Функционирование автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) предполагает наличие в них управляющих воздействий человека-оператора или коллектива операторов, что предъявляет к построению математической модели человеко-машинной системы дополнительные требования, учитывающие индивидуальные характеристики, поскольку надежность и качество АСУ ТП во многом зависят от квалифицированных и своевременных действий человека: скорости его реакции, адаптационных свойств, уровня знаний о технологическом процессе и т. д. Практика применения компьютерных схем моделирования сложных систем подобного класса показывает, что их математическое описание и программная реализация – задача трудоемкая и нетривиальная [1–7]. Целью настоящей работы является исследование возможности построения аналитико-имитационных моделей разнородных процессов в АСУ ТП Е-сетевым методом.

Методы исследования

Обобщенная схема модели АСУ представлена на рис. 1. Оператор (группа операторов) оценивает состояние объектов и всей системы управления в целом и на основании целеполагания формирует управляющее воздействие. Система управления включает в себя три уровня управления: стратегический, тактический и исполнительный. Первый уровень решает задачу планирования целесообразного поведения, осуществляет выбор стратегии выполнения требуемого задания. Управление на тактическом уровне осуществляет поиск путей решения задач с учетом динамики исполнительных подсистем. Управление на исполнительном уровне обеспечивает активную адаптацию механизмов к изменениям нагрузочных характеристик и вариациям собственных параметров.

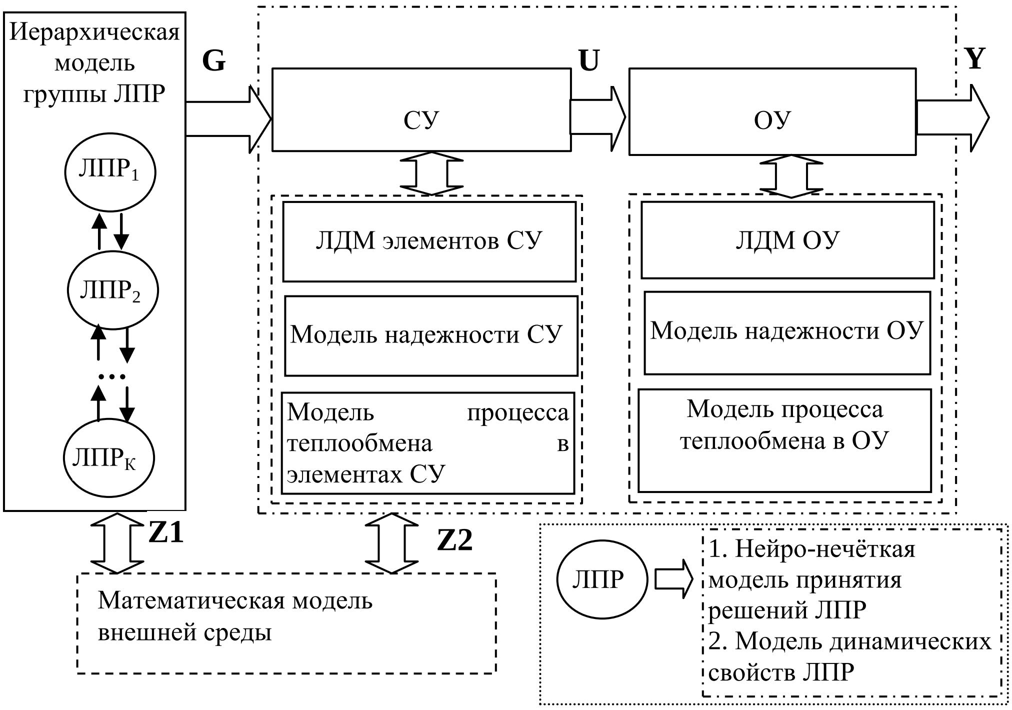

Рис. 1. Обобщенная схема моделирования человеко-машинной системы:
ЛПР – лицо, принимающее решение; ЛДМ – логико-динамическая модель;
СУ – система управления; ОУ – объект управления
Примечание: составлено авторами.

Работа оператора (группы операторов) в ряде случаев, например при решении задач противоаварийного и восстанавливающего управления, является критически важной, в связи с чем ключевой задачей при создании модели человеко-машинной системы является построение математической модели оператора (группы операторов) [8–9]. Иерархическая модель группы лиц, принимающих решение (ЛПР), включает в себя две компоненты: модель принятия решений, основанную на нейро-нечеткой идентификации человека-оператора, и модель динамических свойств оператора. Модель взаимодействия группы операторов накладывает дополнительные требования и рассмотрена в [9].

Логико-динамическая модель (ЛДМ) системы автоматического управления включает в себя совокупность аналитико-имитационных моделей, которые учитывают динамические свойства, надежность, теплообмен элементов системы управления. Данные модельные компоненты должны взаимодействовать между собой, так как, например, превышение номинальных физических параметров (силы тока, давления в трубопроводе и т. д.) исследуемой системы приводит к ухудшению показателей ее надежности. Важным элементом аналитико-имитационной модели является модель внешней среды, которая условно состоит из двух частей: первая позволяет имитировать возмущающие факторы, воздействующие на технические средства, вторая – воздействие на оператора (группу операторов).

При решении вышеуказанной задачи необходимо определиться с выбором математического формализма для моделирования разнородных, взаимодействующих между собой параллельных процессов. Для перехода к общему базису – единому языку математического описания – предлагается использовать формальный аппарат расширенных сетей Петри, т. е. E(evaluation)-сети [2, 8, 10]. Любой переход Е-сети может быть описан тройкой [8]:

$$C_j = (S,\ t(C_j),\ \rho(C_j)),$$

где S – тип перехода $S = \{T, X, Y, J, I, F\}$;

$t(C_j)$ – функция задержки – определяет интервал времени, в течение которого должна длиться фаза активности перехода (т. е. вычисляется интервал моделируемого этим переходом исследуемого события);

$\rho(C_j)$ – функция преобразования атрибутов.

Математический аппарат Е-сетей является мощным инструментом для моделирования аналитико-имитационных моделей разнородных асинхронных параллельных процессов. Функционирование Е-сети представляет собой упорядоченный во времени процесс срабатывания переходов.

Процесс срабатывания перехода и преобразования данных в атрибутах фишки представлен на рис. 2. Имитационная модель генерирует входной поток фишек $V_{in}(\{atr_i\})$, которые поступают во входную позицию P_X. Атрибуты фишек содержат информацию о переменных модели в текущий момент времени и группу служебных атрибутов, которые обеспечивают правило преобразования атрибутов и необходимую задержку перехода.

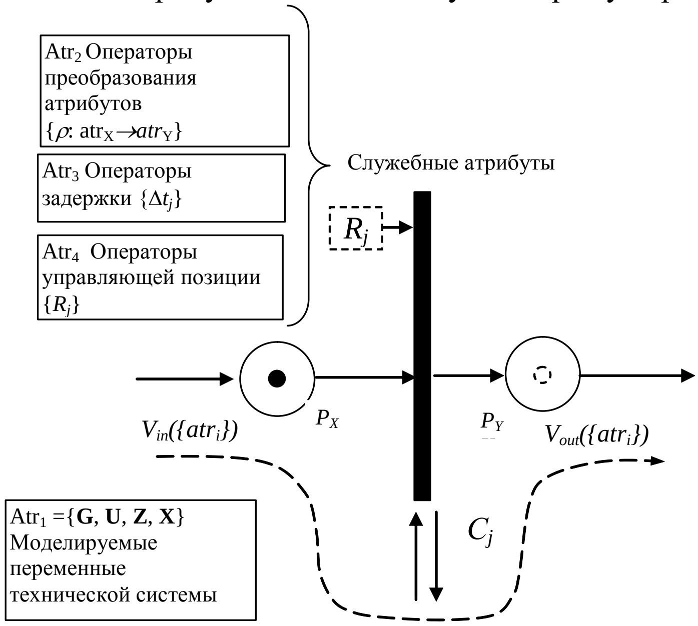

Рис. 2. Механизм работы Е-сетевого перехода C_j
Примечание: составлено авторами.

Если во входную позицию P_X поступила фишка, то переход устанавливается на взведенное состояние. Если выходная позиция P_Y свободна, то после вычисления длительности активного состояния Δt_j переход устанавливается в активное состояние. По окончании задержки переход реализует перенос фишки из входной в выходную позицию и осуществляется преобразование атрибутов фишки Atr_1. Служебные атрибуты (Atr_2, Atr_3, Atr_4) позволяют адаптировать Е-сетевые переходы для решения задачи в текущий момент времени Atr_1 (рис. 2). Позиция условия R_j решает задачу маршрутизации фишек для некоторых переходов Е-сети.

Каждый макропереход Е-сетевой схемы соответствует элементу оборудования, состоянию сети, событию (например, отказ оборудования), фиксируется с помощью позиций сети. В атрибуте фишек – вектор значения переменных физических и информационных потоков модели. Направление движения фишек совпадает с направлением сигналов.

Е-сетевая модель кластера элемента системы, учитывающая логико-динамические процессы i-й компоненты системы, надежность и процесс теплообмена рассматриваемой компоненты, приведена на рис. 3. Вопросы моделирования надежности с использованием формализма расширенных сетей Петри представлены в работах [11–12]. Проблемы построения тепловых моделей радиоэлектронной аппаратуры, анализа усталостной долговечности радиоэлектронной аппаратуры на основе математического моделирования термопрочностных процессов представлены в [13–14].

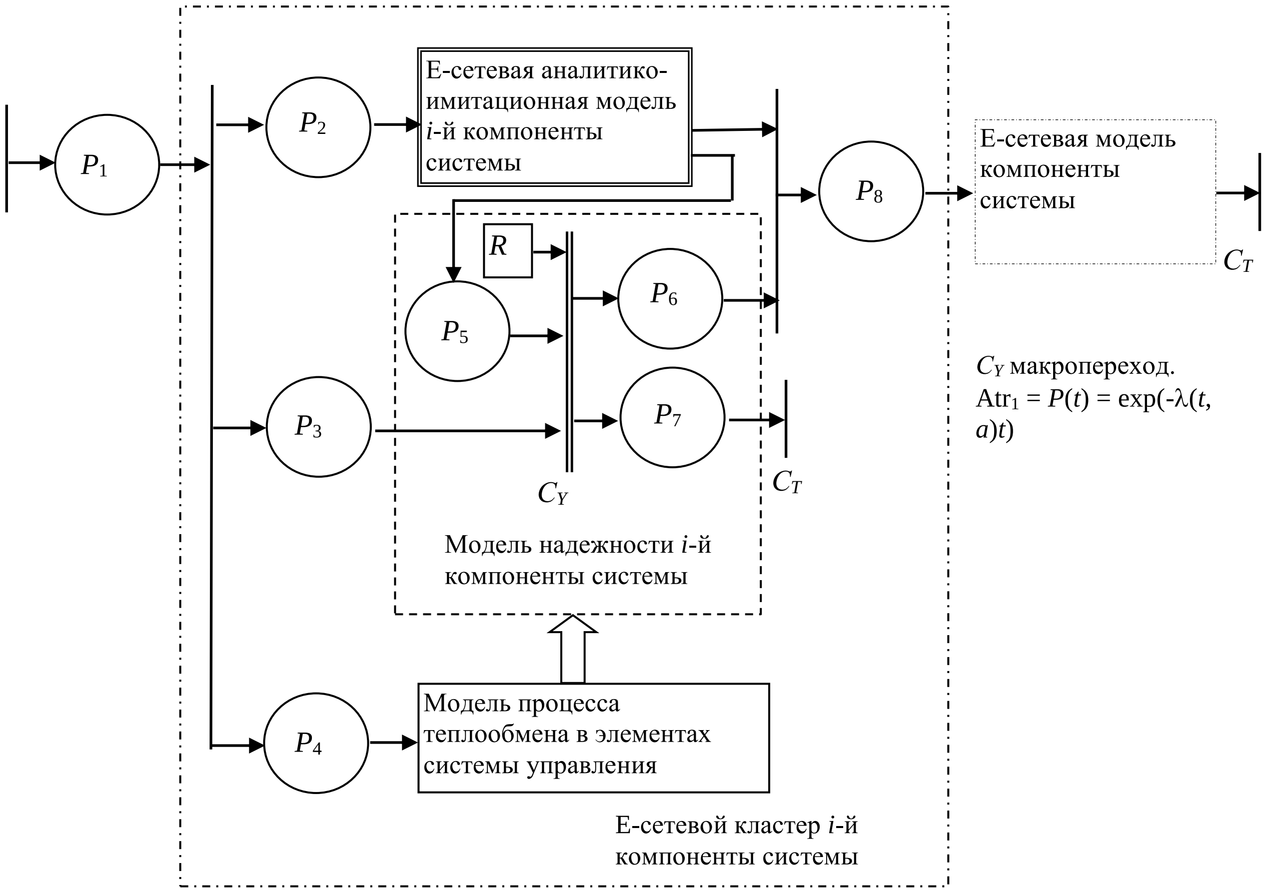

Рис. 3. Е-сетевой кластер компоненты системы
Примечание: составлено авторами.

Атрибуты входного потока фишек содержат физические параметры исследуемой системы. Фишки поступают в позицию P_1 макроперехода Е-сети. Макропереход представляет собой иерархическую структуру, которая содержит аналитико-имитационную модель i-й компоненты моделируемой системы и модель надежности этой компоненты. Вышеуказанные элементы взаимодействуют через переход C_Y. Например, в математической модели можно использовать вероятность безотказной работы i-й компоненты с учетом коэффициента нагрузки, тепловых режимов и времени эксплуатации.

Позиция P_6 соответствует работоспособному состоянию системы, P_7 – состоянию отказа i-го компонента системы.

В качестве иллюстрации построения Е-сетевых моделей элементов автоматики рассмотрим следующие компоненты системы. На рис. 4 представлена схема аналогового интегратора на дифференциальном усилителе.

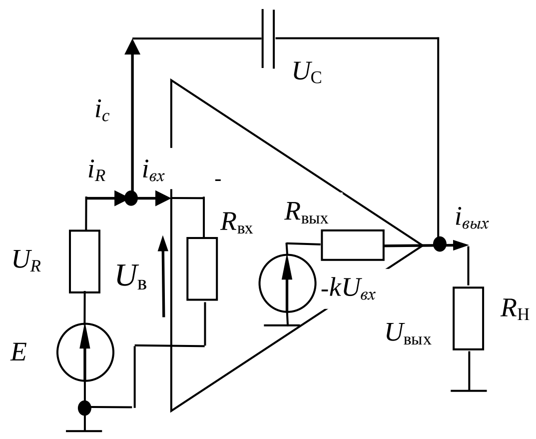

Рис. 4. Моделируемая схема электронного интегратора
Примечание: составлено авторами.

Схему замещения можно представить в виде замкнутой системы уравнений:

$$U_{вых} = (i_C + i_{вых})R_Н,\ i_C = U_C Cp,\ U_C = i_{вх} R_{вх} - U_{вых},$$
$$i_{вых} = -(k\, i_{вх} R_{вх} G_{вых} - U_{вых} G_{вых}),\ i_{вх} = U_R/R - i_C,\ U_R = E - i_{вх} R_{вх}. \quad (1)$$

На рис. 5 представлен Е-сетевой граф, имитирующий работу дифференциального усилителя. Проблема аппроксимации сетями Петри непрерывных процессов подробно представлена в [15].

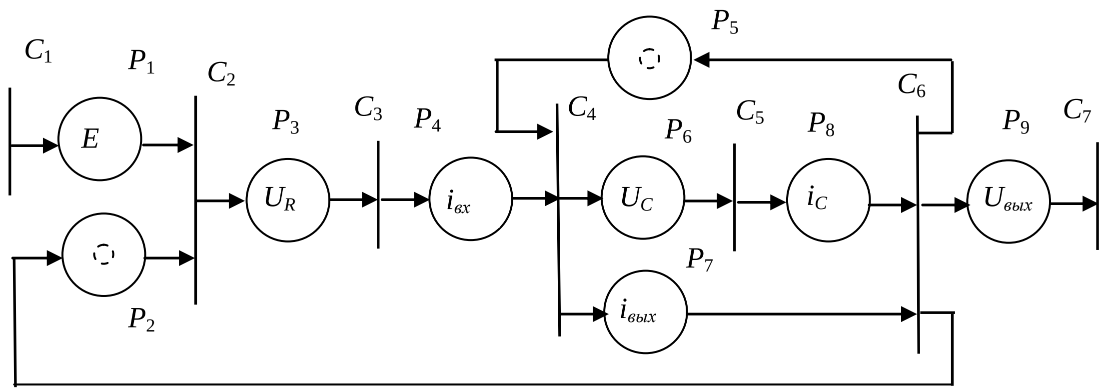

Рис. 5. Е-сетевая схема, имитирующая работу электронного интегратора
Примечание: составлено авторами.

Входное напряжение генерируется с помощью потока фишек Е-сетью, в атрибуте которой указано входное напряжение E. Срабатывание перехода приводит к переносу фишек по сети с изменением атрибутов согласно правилу системы уравнения (1). Начальная маркировка сети равна $M_0 = (P_1, P_2)$. В процессе продвижения фишек в дискретные моменты времени происходит вычисление модельных переменных (1).

В практике математического моделирования динамических систем широко используется формализм «вход – состояние – выход», непрерывная модель которого представлена в (2):

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) + DU(t) \end{cases}, \qquad (2)$$
$$X\big|_{t=t0} = X(t_0)$$

где $\mathbf{U}(t)$ – вектор входных воздействий;

$\mathbf{X}(t)$– вектор состояния системы;

$\mathbf{Y}(t)$ – вектор выходных сигналов;

$\mathbf{X}(t_0)\in\mathbf{R}^n$ – вектор начальных условий.

Е-сетевая схема моделирования, выраженная в терминах «вход – состояние – выход», представлена на рис. 6 (для случая $\mathbf{B} = [0, \dots 0, b_0]^T$).

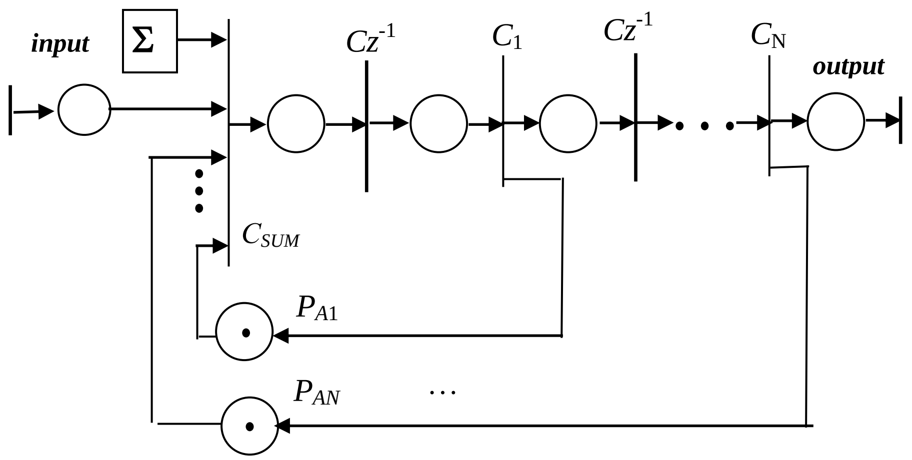

Рис. 6. Е-сетевая схема моделирования динамических процессов
Примечание: составлено авторами.

Перед началом имитации динамических процессов необходимо задать вектор начальных условий $\mathbf{X}(\mathbf{t}_0)$ с помощью маркировки сети $M_0 = (P_{A1}, \dots, P_{AN})$. В начальный момент времени входной поток фишек поступает во входную позицию *input.* В атрибутах записано исходное значение моделируемой переменной. Шаг срабатывания переходов происходит за интервал времени Δt. Вычисление вектора переменных состояния системы осуществляется за счет маршрутизации и вычисления атрибутов фишек по сети. Компоненты Е-сетевой модели выполняют следующие операции:

1) иерархический макропереход C_{SUM} – операцию суммирования атрибутов фишек прямого канала и обратных связей;

2) иерархические макропереходы Cz^{-1} – операции численного интегрирования с периодом дискретизации T_0;

3) переходы $C_1, \dots, C_N$ – функцию узлов разветвления сигналов прямого канала и обратных связей.

В выходной позиции заносится фишка с вычисленными значениями **Y** и **X**.

Результат моделирования проиллюстрирован на рис. 7.

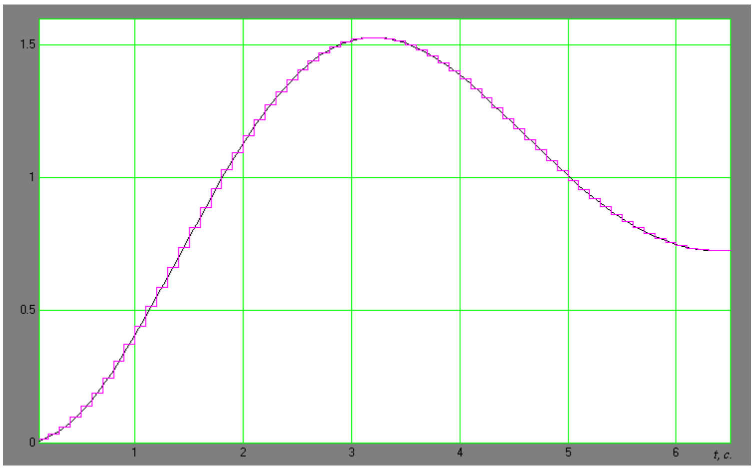

Рис. 7. Переходные характеристики реального и моделируемого технологических процессов
Примечание: составлено авторами.

Выводы

Представлена возможность использования Е-сетей в качестве математического аппарата моделирования разнородных взаимодействующих между собой процессов. Преимущество аналитико-имитационного моделирования и анализа системы с использованием Е-сетевого графодинамического подхода заключается во взаимосвязи протекающих разнородных процессов, получении необходимой информации о структуре и поведении моделируемой АСУ ТП, определении ее характеристик и «узких мест» с учетом требований надежности технических систем, а также имитации маловероятных событий, например некорректной или несвоевременной реакции оператора (группы операторов).

Литература

1. Колесов Ю. Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2004. 240 с.

2. Серая А. А. Иерархические Е-сети как средство моделирования дискретно-непрерывных технологических процессов // Математические машины и системы. 2013. № 4. С. 169–177.

3. Юдицкий С. А. Графодинамическое моделирование организационно-технических систем на основе триадных агентов // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 3. С. 258–281.

4. Юдицкий С. А., Владиславлев П. Н., Точ Д. С. Триадный подход к моделированию систем сетецентрического управления // Управление большими системами. 2010. Вып. 28. С. 24–39.

5. Седых И. А., Аникеев Е. С. Представление цементного производства иерархическими раскрашенными временными сетями Петри на основе окрестностных моделей // Вестник ЛГТУ. 2017. № 1 (31). С. 19–24.

6. Ханова А. А., Мунтьянова К. И., Аверьянова А. А. Моделирование конфигурации сложных систем на основе сетей Петри // Научный вестник НГТУ. 2018. Т. 71, № 2, С. 39–58.

7. Bevilacqua M., Ciarapica F. E., Giovanni M. Timed Coloured Petri Nets for Modelling and Managing Processes and Projects // Procedia CIRP. No. 67. P. 58–62. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.176.

8. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. Hierarchical Analytical and Simulation Modelling of Human-Machine Systems with Interference // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803 : Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016) : International Conference, 21–26 September 2016, Tomsk. P. 120–126.

9. Брагинский М. Я., Тараканов Д. В. Моделирование взаимодействия коллектива операторов в процессе управления технической системой // Вестник кибернетики. 2018. № 4 (32). С. 100–106.

10. Банников А. А., Фатхи Д. В. Представление Е-сетей с помощью сетей Петри для обеспечения возможности матричного анализа // Молодой исследователь Дона. 2016. № 1. С. 9–15.

11. Котов Н. А., Котова М. Л., Савин В. В. Стохастическое моделирование отказов систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 9. Ч. 1. С. 162–169.

12. Ларкин Е. В. Моделирование процесса перемежающихся отказов кибернетических систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 9. Ч. 2. С. 75–83.

13. Морозов Е. А. Метод анализа усталостной долговечности радиоэлектронной аппаратуры на основе математического моделирования термопрочностных процессов : дис. … канд. тех. наук. Томск, 2015. 130 с.

14. Сухоруков М. П. Исследование и нахождение оптимальных тепловых моделей электрорадиоизделий радиоэлектронной аппаратуры // Науковедение: интернет-журнал. URL: https://naukovedenie.ru/PDF/115TVN617.pdf (дата обращения: 02.05.2020).

15. Blondin M., Finkel A., Haase C., Haddad S. The Logical View on Continuous Petri Nets // ACM Transactions on Computational Logic. 2017. No. 24. DOI: 10.1145/3105908.