

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.82

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-39-58

Моделирование конфигурации сложных систем на основе сетей Петри*

А.А. ХАНОВА¹, А.А. МУНТЬЯНОВА², К.И. АВЕРЬЯНОВА³

¹ 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, доктор технических наук, доцент. E-mail: akhano-va@mail.ru

² 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, аспирант. E-mail: annainsh@yandex.ru

³ 414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет, аспирант. E-mail: vallo_kair@mail.ru

Описан комплексный тетрадный подход к моделированию и анализу конфигураций сложных систем, базирующийся на логическом представлении последовательности операций и действий, необходимых для оценки и анализа ситуаций, на формальном аппарате целеполагания, взаимовлияния отклонений от нормы показателей сложной системы, на формировании, выборе и выдаче управленческих решений. Определена структура конфигурации сложной системы на основе системотехники сетей Петри, включающая четыре графа: целей и показателей сбалансированной системы показателей, управленческих решений и операций сложной системы. С помощью операций композиции сконструирована сложная сеть Петри, отображающая единое информационное пространство для процессов управления в сложной системе на основе сбалансированной системы показателей. Представлено формальное описание графов модели конфигурации, включая обоснование типов сетей Петри. Описана логика их взаимодействия. Предложена модель сбалансированной системы показателей на основе раскрытой сети Петри, включающая «горизонтальную» и «вертикальную» структуры, позволяющая моделировать динамику достижения целей и изменения показателей сбалансированной системы показателей. Концептуальная структура конфигурации сложной системы в виде тетрадной модели построена на основе композиции, разработанных моделей графа операций сложной системы на основе классической сети Петри, графа целей сбалансированной системы показателей на основе ациклической сети Петри, графа показателей на основе «взвешенной» сети Петри и графа управленческих решений на основе классической сети Петри. Предложено концептуальное решение, позволяющее осуществить моделирование конфигураций системы стратегического управления сложными системами на основе сбалансированной системы показателей и тетрадного подхода с использованием аппарата сетей Петри.

Ключевые слова: конфигурация системы, сети Петри, сложная система, сбалансированная система показателей, стратегическое управление, принятие управленческих решений, моделирование конфигурации системы, цикл управления

* Статья получена 17 апреля 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Структура сложной системы определяется ее конфигурацией. Понятие конфигурации системы, исследованное применительно к сложным системам Генри Минцбергом и его коллегами [1], представляет собой устойчивое комплексное состояние системы, соответствующее периоду ее стабильного развития и характеризуемое совокупностью некоторых факторов: стратегией развития и соответствующей системой показателей, организационной структурой, производимой продукцией или оказываемыми услугами, потребляемыми ресурсами, применяемыми технологиями, технологическими схемами, методами и моделями, кадровым составом и т. д. Периоды стабильного состояния системы прерываются трансформациями в другую конфигурацию. Чередование конфигураций и трансформаций (переходных процессов) образует жизненный цикл сложной системы [2].

Одним из подходов к моделированию развития сложных систем (СС) является построение моделей на основе сетей Петри (СП) [3]. Триадный подход к моделированию конфигураций сложных систем, описанный в работах Юдицкого С.А., Мурадяна И.А., Владиславлева П.Н. и других авторов, основан на целеполагании на основе «древовидных» ациклических сетей Петри [4–7]. В работах Мельникова Б.Ф. и Зубовой Т.Н. рассмотрен процесс принятия управленческого решения при отклонении ключевых показателей от нормативных значений на основе классической сети Петри [8–10]. В рассмотренных работах в качестве инструмента управления сложными системами используются *наборы* показателей. В современном менеджменте имеется целый ряд *систем* показателей для организации эффективного управления сложными системами [11]. В ежегодном исследовании компании Bain & Company «Management Tools & Trends 2017» [12] одной из наиболее востребованной, со стабильно высоким показателем удовлетворенности от использования в организациях является сбалансированная система показателей (ССП), представленная в работах Каплана Р. и Нортон Д. [13].

Актуальной задачей становится разработка тетрадного (от слова «тетрада» – группа из четырех) подхода к моделированию конфигураций сложных систем на основе интеграции триадного подхода с процессом принятия управленческих решений на основе сетей Петри, а также использование СП в качестве индикатора управления сложной системы.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Жизненный цикл сложной системы состоит в повторении внутриконфигурационных циклов [14]. Задача моделирования внутриконфигурационного цикла заключается в определении степени достижения поставленных целей при данной ситуации, характера изменений во времени потребления ресурсов и оценки результатов деятельности системы в виде набора показателей СП и множества управленческих решений.

Предлагается тетрадный подход к моделированию конфигурации сложных систем, характеризуемый четырьмя взаимодействующими структурами:

1) «вертикальной» структурой СП, включающей целеполагание на основе «древовидных» ациклических СП;

2) «горизонтальной» структурой ССП, учитывающей взаимовлияние отклонений от нормы показателей на основе «взвешенных» СП;

3) процессом получения информации о параметрах сложной системы, анализа данных и инициализации управленческого решения с учетом параллельности и асинхронности принимаемых решений, а также их вероятностного характера на основе классической СП;

4) процессом управленческого реагирования на вероятные отклонения значений показателей ССП от нормативных значений с учетом асинхронности параллельных процессов на основе классической СП.

Древовидные ациклические СП целей ССП, а также «взвешенные» СП логически объединены в единую сеть – раскрашенную СП [15]. Рассмотрим системотехнику, основанную на раскрашенных, «взвешенных», «древовидных» ациклических, классических СП [16], позволяющую провести структуризацию, формализацию и алгоритмизацию процесса принятия управленческих решений в сложных системах на основе ССП.

2. СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТЕТРАДНОЙ МОДЕЛИ КОНФИГУРАЦИИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Рассмотрим решение поставленной задачи на примере транспортно-логистической системы

Операции ролевого процесса – это действия, выполняемые в СС в определенном порядке при исполнении роли. Граф операций СС представляет собой СП (рис. 1), взвешенную предикатами, в которой позиции p_i , $i = 0, \dots, 30$; $p_i \in \{0, 1\}$, соответствуют операциям (табл. 1), переходы t_i , $i = 1, \dots, 25$; – событиям, инициализирующим чередование операций. На структуру СП ограничений не накладывается. Таблица 1 составлена на примере транспортно-логистической компании.

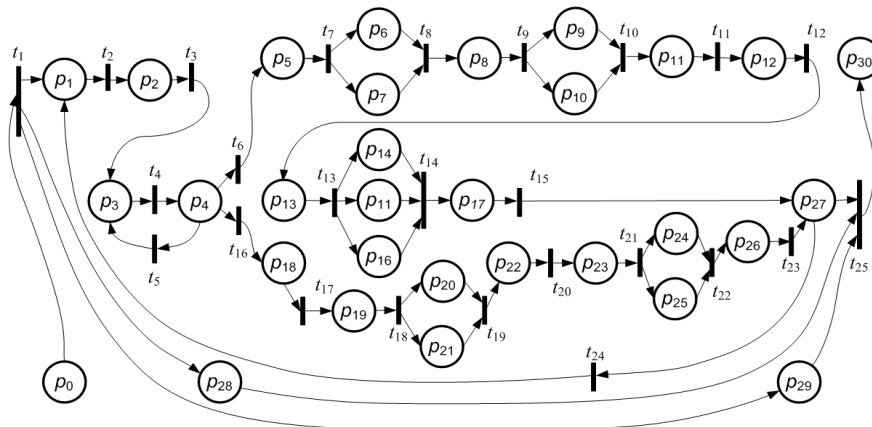


Рис. 1. Граф операций СС на основе СП N_P

Таблица 1

**Содержание операций ролевого процесса графа операций СС на примере
транспортно-логистической системы (фрагмент)**

p_0	Начало процесса моделирования	p_{27}	Отправка судна
p_1	Подготовка к обработке судна	p_{28}	Анализ положения компании на рынке
p_2	Приход судна	p_{29}	Стратегическое планирование
...	...	p_{30}	Окончание процесса моделирования

Рассмотрим формальное описание СП:

$$PN = (P, T, Fp),$$

где P – непустое конечное множество позиций; T – непустое конечное множество переходов, причем $P \cap T \neq \emptyset$; $Fp : (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}_0$ – функция инцидентности, удовлетворяющая следующим условиям:

$$\forall p \in P \exists t \in T: Fp(p, t) > 0 \vee Fp(t, p) > 0,$$

$$\forall t \in T \exists p \in P: Fp(p, t) > 0 \vee Fp(t, p) > 0.$$

Разметкой СП PN будем называть произвольное мультимножество над P [17]. В дальнейшем будем пользоваться следующим обозначением $\mathcal{M}_{PN} \equiv Mult(P)$. Пару (PN, Mp_0) , где $PN = (P, T, Fp)$ СП, $Mp_0 \in \mathcal{M}_{PN}$ – разметка, будем называть СП с выделенной начальной разметкой Mp_0 . Множество $\mathcal{R}_{PN, Mp_0} = \{Mp \in \mathcal{M}_{PN} \mid Mp_0 \prec Mp\}$ будем называть множеством достижимых разметок (PN, Mp_0) . На рис. 1 изображена СП $N_P = (PN, Mp_0)$, соответствующая графу операций СС, с разметкой Mp_0 , где $P = \{p_0, p_1, \dots, p_{30}\}$, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{25}\}$. Функцию инцидентности для сети Петри N_P зададим Fp матрицами по правилам $Fp(p_i, t_j) = fp_{ij}^-$, $Fp(t_j, p_i) = fp_{ji}^+$.

Структуру СП N_P графа операций можно представить также в виде таблицы предусловий и постусловий (табл. 2).

Таблица 2

**Таблица предусловий и постусловий графа операций ролевого процесса
(фрагмент)**

События	Предусловия	Постусловия	Наименование события
t_1	p_0	p_1, p_{28}, p_{29}	Инициализация модели
t_2	p_1	p_2	Передача карго-плана, даты прихода
t_3	p_2	p_3	Отправка судна на причал
t_4	p_3	p_4	Освобождение причала
...
t_{25}	p_{27}, p_{28}, p_{29}	p_{30}	Останов модели операций

Функционирование СП графа операций продолжается до тех пор, пока существует хотя бы один возможный переход. По условию $fp(p_{30}) = 1$ в графе операций срабатывает переход, запускающий графы целей и показателей.

Цели и показатели – составляющие ССП, которые позволяют в ходе моделирования оценивать деятельность СС. Для организации вертикального и горизонтального анализа структуры ССП цели и показатели в тетрадной модели представляются в виде раскрашенной СП, состоящей из набора классических СП (рис. 2).

Набор

$$CDN = (D, K, Fd, \mathcal{C}, C)$$

будем называть раскрашенной СП [17,18], если D – непустое конечное множество позиций; K – непустое конечное множество переходов, причем $D \cap K \neq \emptyset$; \mathcal{C} – непустое конечное множество цветов; $C : D \cup K \rightarrow 2^{\mathcal{C}}$ – функция, ставящая в соответствие каждой позиции и переходу сети допустимое подмножество цветов из \mathcal{C} ; $Fd : (D \times K \cup K \times D) \times \mathcal{C} \rightarrow Mult(\mathcal{C})$ сопоставляет каждой тройке $d \in D, k \in K$ и $ds \in C(k)$ мультимножество из $Mult(C(d))$.

Функцию вида $Md : D \rightarrow Mult(C(D))$ будем называть разметкой раскрашенной СП. Множеством разметок раскрашенной СП $CDN = (D, K, Fd, \mathcal{C}, C)$ будем называть множество всех функций вида $Md : D \rightarrow Mult(C(D))$ и обозначать через \mathcal{M}_{CDN} . Пару (CDN, Md_0) , где CDN – раскрашенная СП, $Md_0 \in \mathcal{M}_{CDN}$, будем называть раскрашенной СП с выделенной начальной разметкой. Множество $\mathcal{R}_{CDN, Ms_0} = \{Md \mid Md_0 \rightarrow Md\}$ будем называть множеством достижимых разметок раскрашенной СП CDN с выделенной начальной разметкой Md_0 .

На рис. 2 изображена раскрашенная СП $N_D = (CPN, Md_0)$ с разметкой Md_0 , соответствующая системным взаимосвязям ССП между показателями, целями и перспективами d_i (позициями) за счет причинно-следственных связей k_i (события), где

$$D = \{d_0, d_1, \dots, d_{30}\}, K = \{k_1, k_2, \dots, k_{31}\}, \mathcal{C} = \{c_1, c_2\};$$

$$\begin{aligned} C(d_0) &= C(d_1) = C(d_2) = C(d_3) = C(d_4) = C(d_5) = C(d_6) = C(d_7) = C(d_8) = \\ &= C(d_9) = C(d_{10}) = C(d_{11}) = C(d_{12}) = C(d_{13}) = C(d_{14}) = \{c_1, c_2\}; \\ C(d_{15}) &= C(d_{16}) = C(d_{17}) = C(d_{18}) = C(d_{19}) = C(d_{20}) = C(d_{21}) = C(d_{22}) = \\ &= C(d_{23}) = C(d_{24}) = C(d_{25}) = C(d_{26}) = C(d_{27}) = C(d_{28}) = C(d_{29}) = C(k_1) = \\ &= C(k_{17}) = C(k_{18}) = C(k_{19}) = C(k_{20}) = C(k_{21}) = C(k_{22}) = C(k_{23}) = C(k_{24}) = \\ &= C(k_{25}) = C(k_{26}) = C(k_{27}) = C(k_{28}) = C(k_{29}) = C(k_{30}) = C(k_{31}) = \{c_1\}; \\ C(d_{30}) &= C(k_2) = C(k_3) = C(k_4) = C(k_5) = C(k_6) = C(k_7) = C(k_8) = C(k_9) = \\ &= C(k_{10}) = C(k_{11}) = C(k_{12}) = C(k_{13}) = C(k_{14}) = C(k_{15}) = C(k_{16}) = \{c_2\}. \end{aligned}$$

Множество событий $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{31}\}$ отображает причинно-следственные связи ССП, поэтому наименование каждого события для СП ССП не приводится. На рис. 2 приведена раскрашенная СП ССП одной из возможных конфигураций стратегической карты ССП транспортно-логистической системы.

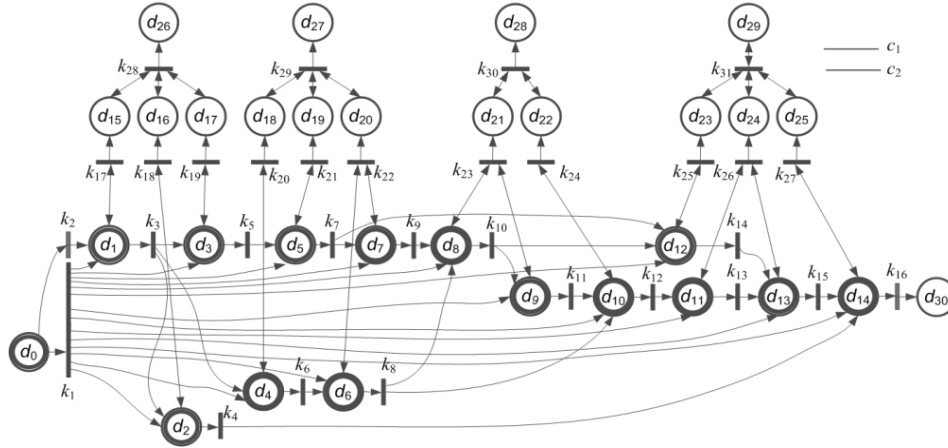


Рис. 2. Граф ССП на основе раскрашенной СП N_D

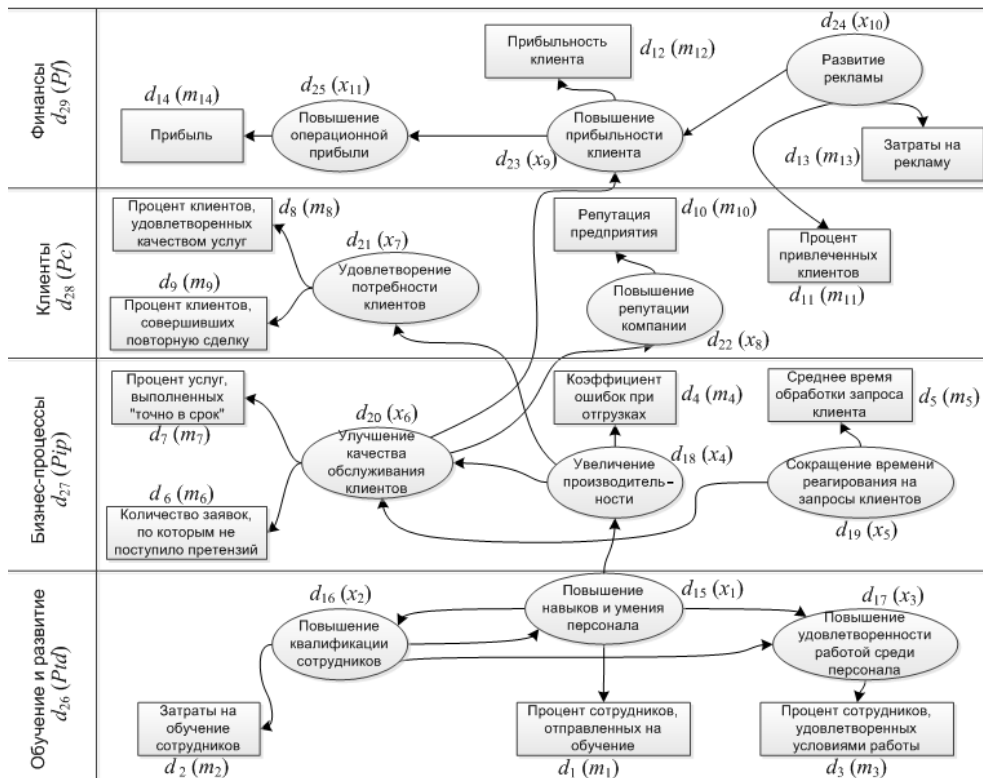


Рис. 3. Пример стратегической карты ССП с указанием позиций раскрашенной СП N_D (см. рис. 2)

В рассматриваемой конфигурации стратегическая карта ССП состоит из 14 показателей, 11 целей и четырех перспектив (рис. 3). Для любой другой конфигурации ССП количество целей и показателей может отличаться. Для удобства представим множество позиций D раскрашенной СП, состоящей из подмножеств показателей M ; целей ССП X и перспектив ССП PR :

$$D = (D^1 \cap D^2 \cap D^3),$$

где подмножество $D^1 = \{d_1, d_2, \dots, d_{14}\}$ множества позиций раскрашенной СП совпадает с множеством показателей ССП $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{14}\}$ в рассматриваемой конфигурации СС, $D^1 = M$; подмножество $D^2 = \{d_{15}, d_{16}, \dots, d_{25}\}$ совпадает с множеством целей ССП $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{11}\}$; $D^2 = M$; подмножество $D^3 = \{d_{26}, d_{27}, \dots, d_{29}\}$ совпадает с множеством перспектив ССП $Pr = \{Ptd, Pip, Pc, Pf\}$, $D^3 = PR$.

Для раскрашенных СП неприменимы методы анализа классических СП, поэтому рассмотрим отдельно СП целей ССП («вертикальная» структура ССП) и СП показателей ССП («горизонтальная» структура ССП).

«Вертикальная» структура ССП на основе СП графа целей N_D^c (рис. 4) представлена в виде трех уровней:

- перспективы ССП (итоговые цели) $D^3 = \{d_{26}, d_{27}, d_{28}, d_{29}\}$;
- цели ССП (промежуточные цели) – вехи на пути достижения перспектив $D^2 = \{d_{15}, d_{16}, \dots, d_{25}\}$;
- показатели ССП (начальные цели) – начальные отметки определения степени достижения целей $D^1 = \{d_1, d_2, \dots, d_{14}\}$.

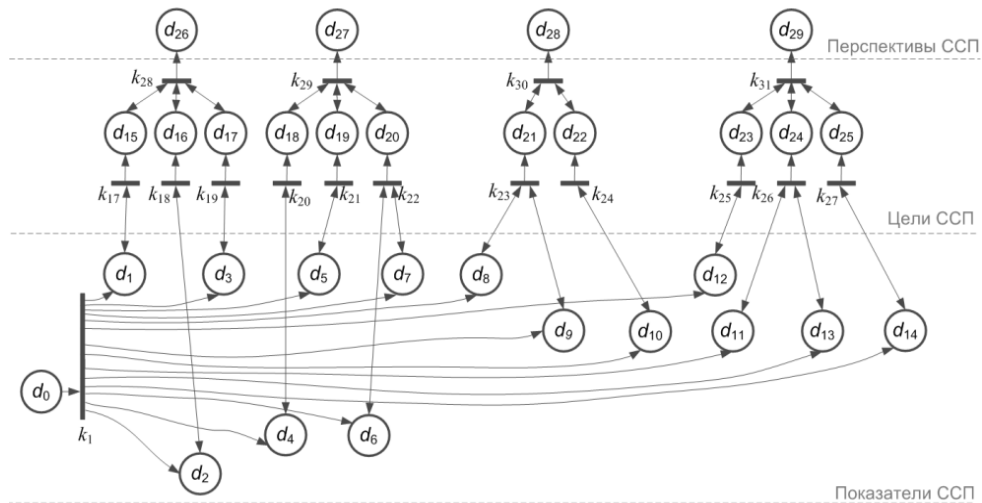


Рис. 4. Граф целей ССП («вертикальная» структура) на основе ациклической СП N_D^c

На множестве целей устанавливается бинарное отношение подчиненности: вышестоящая цель достигается, если достигнуты все подчиненные ей нижестоящие цели [3]. Граф целей выражается в виде набора несвязанных между собой ациклических СП древовидного типа [3], где позиции соответствуют целям (итоговым D^3 , промежуточным D^2 и начальным D^1), а переходы

отображают отношение подчиненности. Цели представляются булевыми переменными d_i , $i = 1, \dots, 29$:

$$d_i = \begin{cases} 1, & \text{если цель достигнута,} \\ 0, & \text{если цель не достигнута.} \end{cases}$$

Функцию инцидентности СП целей ССП F_D^{c1} зададим матрицами по правилам $F_D^{c1-}(d_i, k_j) = fd_{ij}^{c1-}$, $F_D^{c1+}(d_j, k_i) = fd_{ji}^{c1+}$. Порождающая сеть целей ССП отличается от СП операций СС правилами изменения маркировки при срабатывании переходов. В результате срабатывания перехода маркеры вносятся во все его выходные позиции, но сохраняются во всех входных позициях [2].

Сеть Петри графа показателей ССП («горизонтальная» структура ССП) N_D^{c2} – это СП, в которой позиции соответствуют показателям ССП, а переходы представляют собой причинно-следственные связи стратегической карты ССП, взвешенные знаками $+/-$ и передаточными коэффициентами (помечаются выходные дуги переходов) (рис. 5).

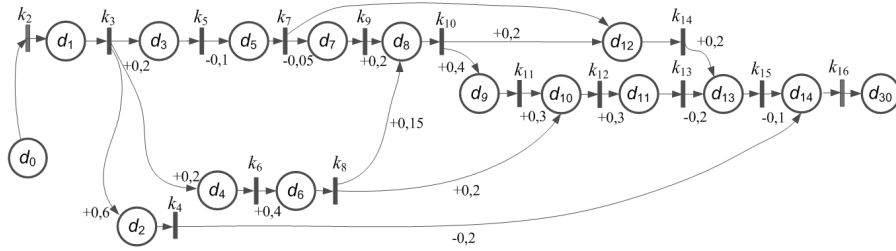


Таблица 3

Содержание событий принятия УР ролевого процесса графа УР сети Петри (фрагмент)

u_0	Начало процесса принятия управленческих решений	
u_1	Загрузка множества показателей из графа показателей раскрашенной сети Петри ССП	
u_2	Установлено отклонение значения показателя ССП больше некоторого допустимого значения – показатель существенный	События повторяются для каждого показателя ССП
u_3	Установлено отклонение значения показателя ССП не превышающее допустимое значение	
u_4	Описание существенных показателей через лингвистические переменные	
\dots	\dots	
u_{24}	Принято решение об отсутствии необходимости корректировки. Перечень управленческих решений утвержден и передан для реализации на модели. Окончание моделирования принятия УР	
u_{25}	Окончание моделирования процесса принятия УР	

Рассмотрим формальное описание СП графа УР:

$$UN = (U, L, Fu),$$

где U – непустое конечное множество позиций; L – непустое конечное множество переходов, причем $U \cap L \neq \emptyset$; $Fu : (U \times L) \cup (L \times U) \rightarrow \aleph_0$ – функция инцидентности, удовлетворяющая следующим условиям:

$$\forall u \in U \exists l \in L: Fu(u, l) > 0 \vee Fu(l, u) > 0,$$

$$\forall l \in L \exists u \in U: Fu(u, l) > 0 \vee Fu(l, u) > 0.$$

Произвольное мультимножество над U будем называть разметкой СП UN . В дальнейшем будем пользоваться следующим обозначением: $\mathcal{M}_{UN} \Rightarrow Mult(U)$. Пару (UN, Mu_0) , где $UN = (U, L, Fu)$ СП, $Mu_0 \in \mathcal{M}_{UN}$ – разметка, будем называть СП с выделенной начальной разметкой Mu_0 . Множество $\mathcal{R}_{UN, Mu_0} = \{Mu \in \mathcal{M}_{UN} \mid Mu_0 [\rangle Mu\}$ будем называть множеством достижимых разметок (UN, Mu_0) . На рис. 6 изображена СП $N_U = (UN, Mu_0)$, соответствующая графу операций СС, с разметкой Mu_0 , где $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{26}\}$, $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{28}\}$.

Функцию инцидентности сети Петри F_u зададим матрицами по правилам $Fu(u_i, l_j) = fu_{ij}^-$, $Fu(u_j, l_i) = fu_{ji}^+$. Для наглядности визуального представления схема составлена не по всем показателям ССП (в рассматриваемом примере их 14), а по двум (пунктирная рамка на рис. 6). Часть графа, связанная с обработкой второго показателя, показана внутри пунктирной рамки. Однако

ветви графа внутри пунктирной рамки одинаковы для каждого показателя, поэтому их можно продублировать нужное число раз.

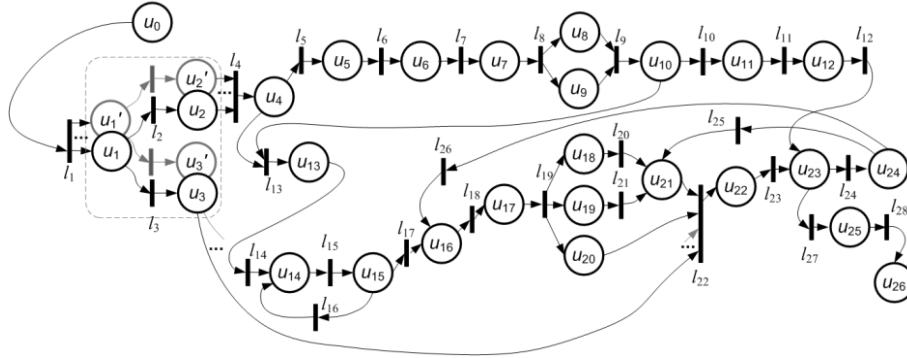


Рис. 6. Граф принятия управленческих решений в СС на основе СП N_U

Функционирование СП графа УР продолжается до тех пор, пока существует хотя бы один возможный переход. По условию $fu(u_{26}) = 1$ в графе УР срабатывает переход, передающий информацию о реестре УР в граф операций, и цикл моделирования повторяется. Конструирование тетрадной модели конфигурации СС произведено с помощью операций композиции: $(p_{30} \equiv d_0 = d_0)$, $(d_{30} \equiv u_0 = u_0)$, $(u_{26} \equiv p_0 = p_0)$ над графами операций СС на основе СП N_P , целей ССП на основе ациклической СП N_D^1 , показателей ССП на основе «взвешенной» СП N_D^2 , управленческих решений на основе СП N_U , образующих сложную СП тетрадной модели конфигурации СС (рис. 7).

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРАФОВ ТЕТРАДНОЙ МОДЕЛИ КОНФИГУРАЦИИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

Структурная схема взаимодействия графов тетрадной модели конфигурации СС (рис. 7) состоит из трех взаимодействующих блоков – операционного, управленческого и ССП (рис. 8). Координатором работы тетрадной модели конфигурации СС является граф операций. При срабатывании перехода t_{25} графа операций (рис. 7) в начальные пустые позиции графа целей ССП и в определенные позиции графа показателей ССП вносятся маркеры. Для внесенных маркеров устанавливаются начальные приращения. В момент, непосредственно предшествующий срабатыванию t_{25} , тетрадная модель конфигурации сложной системы находилась в равновесии и все приращения (маркировки позиций графа показателей ССП) были нулевыми. В результате в графах целей и показателей (граф ССП, рис. 7–8) инициализируется переходный процесс, в ходе которого происходит перемещение маркеров. В графе показателей ССП во время выполнения этого процесса изменяются величины и, возможно, знаки самих показателей.

По окончании переходного процесса устанавливается равновесие: в графе целей ССП из-за его ациклическости, в графе показателей ССП – при полученных значениях целей и показателей, а также с учетом внешних воздействий вычисляются разрешающие условия (1), взвешивающие переходы графа операций.

При срабатывании перехода k_{16} запускается СП, моделирующая процессы оценки и распознавания текущей ситуации, формирования, ранжирования, классификации, параметризации и принятия управленческих решений по показателям и целям ССП (граф управленческих решений, рис. 7–8). Сформированное множество решений передается в операционную сеть, и внутриконтинуальный цикл моделирования повторяется (рис. 7–8). Управление переходами операционной сети $t_i, i = 1, \dots, nt$ осуществляется при помощи разрешающих условий, соответствующих переходам.

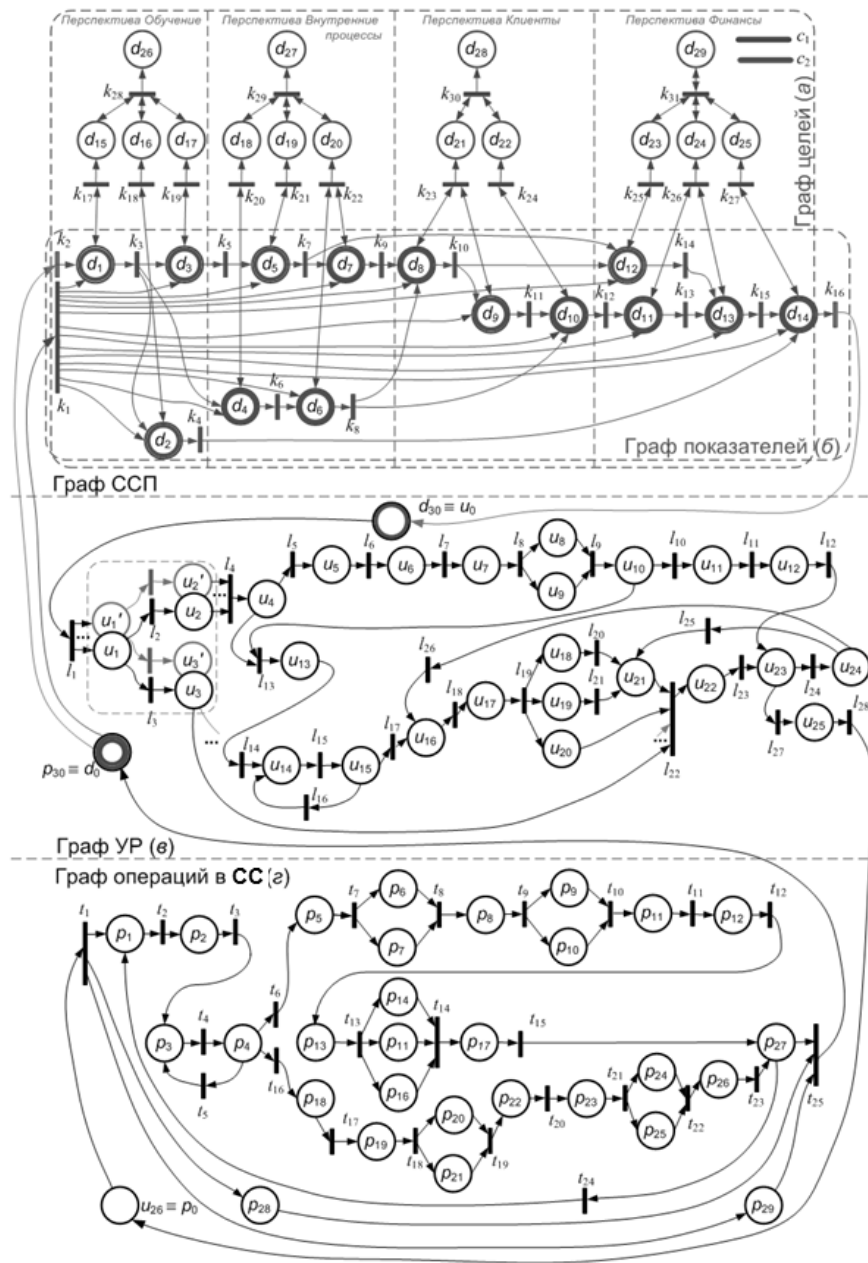


Рис. 7. Тетрадная модель конфигурации СС

По сути, разрешающие условия являются индикаторными логическими функциями (предикатами), которые составляются из термов с помощью логических действий конъюнкции (\wedge), дизъюнкции (\vee), отрицания (\neg) [4]. Индикатором называют выражение $(Zr \# qr)$, где Zr – числовая переменная, qr – переменная или константа, $\#$ – знак сравнения, переменные $Zr, qr \in \{\theta_i, x_i, r_i, m_i\}$, $\# \in \{=, \neq, >, \geq, <, \leq\}$. Индикатор принимает значения 1 или 0:

$$(Zr \# qr) = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется отношение } \#, \\ 0, & \text{если не выполняется.} \end{cases}$$



Рис. 8. Структурная схема взаимодействия графов тетрадной модели конфигурации

В качестве переменных Zr индикаторов в операционном блоке используются экзогенные факторы θ_i (например, уровень конкуренций, уровни спроса и предложения в сегменте рынка, благоприятность политического климата и погодных условий, доступность ресурсов и др.), цели ССП x_i , ресурсы r_i , эндогенные факторы сложной системы системы m_i (темпы изменения капитализации, уровень наукоемкости технологий, доходов и расходов, уровень автоматизации процессов, качество и т. д.) [2]. Переходы графа операций СС (рис. 1) взвешены разрешающими условиями (индикаторно-логическими функциями):

$$\begin{aligned} fr(t_1) &= (\theta_1 = a_1) \wedge (\tau_1 \geq a_2) \wedge (\tau_1 < a_3) \wedge (\tau_{1j}^d = 0) \wedge \\ &\wedge (m_1 = 0) \wedge \dots \wedge (m_{14} = 0) \wedge (\delta_1 = 0) \wedge \dots \wedge (\delta_{14} = 0), \\ &\dots \\ fr(t_{25}) &= (\tau_h \geq a_4) \wedge (\tau_h < a_5) \wedge ((m_1 > a_6) \wedge (po_{m1} = 1)) \wedge \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \wedge ((m_2 > a_7) \wedge (po_{m2} = 1)) \wedge ((m_3 > a_8) \wedge (po_{m3} = 1)) \wedge \\
 & \wedge ((m_4 < a_9) \wedge (po_{m4} = 0)) \wedge ((m_5 > a_{10}) \wedge (po_{m5} = 0)) \wedge \\
 & \wedge ((m_6 < a_{11}) \wedge (po_{m6} = 1)) \wedge ((m_7 = a_{12}) \wedge (po_{m7} = 1)) \wedge \\
 & \wedge ((m_8 < a_{13}) \wedge (po_{m8} = 0)) \wedge ((m_9 > a_{14}) \wedge (po_{m9} = 1)) \wedge \\
 & \wedge ((m_{10} > a_{15}) \wedge (po_{m10} = 1)) \wedge ((m_{11} < a_{16}) \wedge (po_{m11} = 1)) \wedge \\
 & \wedge ((m_{12} > a_{17}) \wedge (po_{m12} = 1)) \wedge ((m_{13} < a_{18}) \wedge (po_{m13} = 0)) \wedge \\
 & \wedge ((m_{14} > a_{19}) \wedge (po_{m14} = 1)),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где τ_i – моменты срабатывания переходов операционного графа, $i = 1, \dots, n\tau i$ («медленное» время на интервале моделирования); τ_{1j}^s – моменты срабатывания переходов на графе ССП при выполнении процессов, инициализируемых срабатыванием переходов операционного графа в моменты $\tau_i, j = 1, \dots, n\tau j$ («быстрое» время на интервале моделирования); po_{mi} – полярность показателя (табл. 4), причем 1 («+» в табл. 4, столбец 3) – «позитивный» показатель, увеличение которого благоприятно сказывается на деятельности СС, 0 («–» в табл. 4, столбец 3) – «негативный» показатель, уменьшение которого благоприятно сказывается на деятельности СС; a_i – константы, $i = 1, \dots, 19$; δ_i – приращение показателя $m_i, i = 1, \dots, 14$ (табл. 4, столбец 7), вычисляется по формуле $(a - m) / a \cdot 100 \%$. Если знаки приращения δ_i и полярности po_{mi} совпадают, значит показатель отклонился в нежелательную сторону. Константы $\{a_8, a_9, \dots, a_{19}\}$ представляют собой множество базовых (плановых) значений показателя ССП (табл. 4, столбец 4). Условие $fr(t_1)$ означает: в момент τ_i , относящийся к отрезку $[a_2, a_3)$, подается внешнее воздействие $v_1 = a_1$ на операционный граф, таймеры быстрого времени не запущены, ни одна из начальных целей ССП не достигнута и все приращения показателей ССП процесса имеют нулевые значения (графы целей и показателей ССП находятся в равновесии) [2].

Таблица 4

Пример вычисленных показателей ССП (для варианта стратегической карты рис. 3) после имитационного моделирования для определения разрешающих условий*

Цель	Показатель	Полярность	Базовое значение (a)	Фактическое значение (m)	Единицы измерения	δ , %	Риск %
1	2	3	4	5	6	7	8
Повышение операционной прибыли $d_{25}(x_{11})$	Прибыль $d_{14}(m_{14})$	+	10 000 000	10376090,66	р.	-4	0
Развитие рекламы $d_{24}(x_{10})$	Процент привлеченных клиентов $d_{11}(m_{11})$	+	10	7,9	%	+21	75
	Затраты на рекламу $d_{13}(m_{13})$	-	50 000	27342,93	р.	+45	0
Повышение прибыльности клиента $d_{33}(x_9)$	Прибыльность клиента $d_{12}(m_{12})$	+	500 000	700618,15	р.	-40	0
Повышение репутации компании $d_{22}(x_8)$	Репутация предприятия $d_{10}(m_{10})$	+	80	100	%	-25	0
Удовлетворение потребности клиентов $d_{21}(x_7)$	Процент клиентов, совершивших повторную сделку, $d_9(m_9)$	+	15	26,47	%	-76	20
	Процент клиентов, удовлетворенных качеством услуг, $d_8(m_8)$	+	80	51,85	%	+35	95
Улучшение качества обслуживания клиентов $d_{20}(x_6)$	Процент услуг, выполненных точно в срок, $d_7(m_7)$	+	100	100	шт	0	40
	Количество заявок, по которым не поступило претензий, $d_6(m_6)$	+	50	16,2	%	+68	85
Сокращение времени реагирования на запросы клиентов $d_{19}(x_5)$	Среднее время обработки запроса клиента $d_5(m_5)$	-	20	39,8	мин	-99	90
Увеличение производительности $d_{18}(x_4)$	Коэффициент ошибок при отгрузках $d_4(m_4)$	-	15	29,63	%	-98	80
Повышение удовлетворенности работой среди персонала $d_{17}(x_3)$	Процент сотрудников, удовлетворенных условиями работы, $d_3(m_3)$	+	80	86,81	%	-9	0
Увеличение расходов на обучение персонала $d_{16}(x_2)$	Затраты на обучение сотрудников $d_2(m_2)$	+	30 000	59875,71	р.	-97	0
Повышение навыков и умения персонала $d_{15}(x_1)$	Процент сотрудников, отправленных на обучение, $d_1(m_1)$	+	5	9	%	-80	0

*Знаки сравнения индикаторных функций выделены в таблице с учетом полярности показателей



$((m_i < a_i) \wedge (po_{mi} = 1)) \vee ((m_i > a_i) \wedge (po_{mi} = 0))$
– показатели ССП, которые необходимо улучшить



$((m_i \geq a_i) \wedge (po_{mi} = 1)) \vee ((m_i \leq a_i) \wedge (po_{mi} = 0))$ – показатели ССП, не нуждающиеся в улучшении

Условие $fr(t_5)$: в конечный момент t_h на интервале моделирования, принадлежащем отрезку $[a_4, a_5]$, на основании анализа положения СС (операция p_{28}) и стратегического бизнес-плана (операция p_{29}) вычисляются значения показателей по результатам прогона имитационной модели.

4. КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

На основе тетрадной модели сформулировано концептуальное решение для организации стратегического управления сложной системой, основанное на моделировании его процессов.

1. Для представления процессов производства (оказания услуг) в сложных системах разработана операционная модель, которая выражается графом операций, отображающим порядок выполнения операций для реализации логического управления. Граф операций представляет собой сеть Петри N_P , позиции которой соответствуют операциям процессов СС, а переходы – событиям «завершение–запуск» операций и помечаются логическими условиями инициирования этих событий (разрешающими условиями).

2. Для реализации целеполагания в соответствии с заданной стратегией предложена целевая модель ССП, индикатором которой является операционная модель. Целевая модель выражается графом целей ССП, отображающим достижение иерархии целей в следующем порядке: начальные (показатели ССП) – промежуточные (цели ССП) – итоговые (перспективы ССП). Граф целей представляет собой ациклическую сеть Петри N_D^{c1} , имеющую «восходящее» маркирование вершин. Граф целей ССП отражает «вертикальную» структуру ССП и степень достижения целей. Количество позиций графа целей ССП определяется суммой количеств показателей, целей и перспектив ССП. Граф иерархии целей ССП показал необходимость разработки метода синтеза структуры ССП.

3. Для учета причинно-следственных связей между показателями ССП предназначена модель показателей ССП, которая выражается графом показателей ССП, отображающим связи между показателями стратегической карты ССП на основе когнитивных карт. Граф показателей представляет собой «взвешенную» сеть Петри N_D^{c2} . Граф целей ССП отражает «горизонтальную» структуру взаимозависимых показателей ССП. Количество позиций графа показателей ССП определяется количеством показателей ССП.

4. Для построения системы управления на основе ССП реализовано объединение графов целей и показателей в полный граф на основе совмещения позиций начальных целей графа целей N_D^{c1} и позиций показателей графа показателей ССП N_D^{c2} . Граф ССП представляет собой раскрашенную сеть Петри N_D , обладающую следующими свойствами: каждой дуге сопоставляется переменная, отвечающая за цвет маркера (c_1 или c_2), по которой данный переход срабатывает. По одной дуге маркеры разных цветов перемещаться не могут; каждому переходу k сопоставляется цвет маркера (c_1 или c_2); функция позиций d будет содержать данные о цвете и количестве маркеров, поставленных в конкретную позицию; дуги, входящие и исходящие из одного перехода, не могут иметь одинаковый цвет.

5. Модель принятия управленческих решений выражается графом УР, отображающим последовательность действий при анализе и оценке проблемной ситуации, а также порядок формирования, выбора и выдачи УР. Граф УР

представляет собой сеть Петри N_U , позиции которой сопоставлены операциям при принятии УР и позволяют оценить поток информации для ЛПР.

6. Композиция разработанных моделей графа операций СС на основе сети Петри N_P , графа целей ССП на основе ациклической сети Петри $N_D^{c_1}$, графа показателей ССП на основе «взвешенной» сети Петри $N_D^{c_2}$ и графа УР на основе сети Петри N_U путем совмещения конечной позиции N_P и начальной позиции N_D , конечной позиции N_D и начальной позиции N_U , конечной позиции N_U и начальной позиции N_S . Композиция графов N_P , $N_D^{c_1}$, $N_D^{c_2}$, N_U определяет структурную и системную взаимосвязь компонентов системы стратегического управления СС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан комплексный тетрадный подход к моделированию и анализу конфигураций сложных систем, базирующийся на формальном аппарате целеполагания, логического управления последовательностью операций СС и действий, необходимых для оценки и анализа ситуаций, формирования, выбора и выдачи управленческих решений, взаимовлияния отклонений от нормы показателей деятельности системы.

Определена структура конфигурации сложной системы на основе системотехники СП, включающая четыре графа: целей и показателей ССП, управленческих решений и операций. С помощью операций композиции сконструирована сложная СП, отображающая единое информационное пространство для процессов управления в сложной системе на основе ССП.

Представлено формальное описание графов модели конфигурации с обоснованием типов СП (классическая для графов операций и управленческих решений, раскрашенная – для графа ССП в целом, ациклическая – для графа целей и взвешенная – для графа показателей ССП) и таблицы предусловий и постусловий для событий каждого графа. Описано их взаимодействие.

Предложена модель ССП на основе раскрашенной сети Петри, отображающая «горизонтальную» и «вертикальную» структуру ССП, позволяющая моделировать динамику достижения целей и изменения показателей ССП. Представлено концептуальное решение, позволяющее осуществить конструирование конфигурации системы стратегического управления СС на основе тетрадного подхода с использованием аппарата сетей Петри.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минцберг Г., Альстрэнд Б., Лэмпл Дж. Школы стратегий / пер. с англ. под ред. Ю.Н. Каптуревского. – СПб.: Питер, 2000. – 336 с.
2. Мурадян И.А., Юдицкий С.А. Метод анализа конфигураций организационных систем на сетях Петри // Управление большими системами. – 2007. – Вып. 16. – С. 163–170.

3. Юдицкий С.А., Радченко Е.Г. Алгебра потокособытий и сети Петри – язык потокового моделирования многоагентных иерархических систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 9. – С. 61–66.
4. Владиславлев П.Н., Мурадян И.А., Юдицкий С.А. Взаимодействие целевой и операционной динамических моделей сложных процессов // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 11. – С. 126–134.
5. Юдицкий С.А., Мурадян И.А., Желтова Л.В. Анализ слабоструктурированных проблемных ситуаций в организационных системах с применением нечетких когнитивных карт // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2008. – № 3. – С. 54–62.
6. Юдицкий С.А. Графодинамическое моделирование организационно-технических систем на основе триадных агентов // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 3. – С. 258–281.
7. 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.
8. Зубова Т.Н., Мельников Б.Ф. Использование сетей Петри для моделирования процесса принятия управленческих решений // Вектор науки ТГУ. – 2011. – № 3 (17). – С. 33–37.
9. Зубова Т.Н. Поссибилярная парадигма как методологическая основа концептуального моделирования долгосрочного управления предприятием // Эвристические алгоритмы и распределенные вычисления. – 2015. – № 3. – С. 88–98.
10. Мельников Б.Ф., Зубова Т.Н. Математическое моделирование управления организацией по ценностным ориентирам: методика постановки оптимизационных задач // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Vol. 6. No. 2. – P. 9–15.
11. Шевченко С.Ю., Иванов А.А. Системы оценочных показателей стратегического и оперативного контроллинга // Известия Уральского государственного экономического университета. – 2014. – № 3 (53). – С. 25–32.
12. Rigby D.K. Management tools 2017: an executive's guide. – Boston, MA: Bain & Company, 2017. – 68 p.
13. Каплан Р.С., Нортон Д.П. Сбалансированная система показателей: от стратегии к действию. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Олимп-Бизнес, 2006. – 320 с.
14. Ханова А.А., Уразалиев Н.С., Усманова З.А. Метод ситуационного управления сложными системами на основе сбалансированной системы показателей // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 3 (60). – С. 69–82.
15. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured petri nets: modelling and validation of concurrent systems. – Dordrecht; New York: Springer, 2009. – 384 p.
16. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
17. Мартынова О.Л. Анализ автоматизированных бизнес-процессов на уровне передачи данных с помощью сетей Петри // Информационные технологии и программирование. – М.: МГИУ, 2004. – Вып. 1 (10), ч. 1. – С. 27–42.
18. Jensen K. Coloured Petri Nets. Vol. 1–3. – Berlin: Springer, 1992–1997.

Ханова Анна Алексеевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – стратегическое управление сложными системами на основе имитационного моделирования. Имеет более 150 публикаций, в том числе две монографии. E-mail: akhanova@mail.ru.

Мунтянова Анна Александровна, аспирант кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета. Основное направление исследований – модели и методы стратегического управления ИТ-компаниями. Имеет 8 публикаций. E-mail: annainsh@yandex.ru.

Аверьянова Кристина Игоревна, аспирант кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета. Основное направление исследований – управление инновационными процессами электросетевых компаний. Имеет 5 публикаций. E-mail: vallo_kair@mail.ru.

Simulation of a complex system configuration on the basis of Petri nets *A.A. KHANOVA¹, A.A. MUNTYANOVA², K.I. AVERYANOVA³¹ Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: akhanova@mail.ru² Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, graduate student. E-mail: annainsh@yandex.ru³ Astrakhan State Technical University, 16, Tatishcheva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation, graduate student. E-mail: vallo_kair@mail.ru

An integrated tetradic approach to the simulation and analysis of complex system configurations which is based on a logical representation of an operation sequence, actions necessary for the assessment and analysis of situations, a formal technique of goal-setting, the interference of deviations of complex system indicators, formation as well as a choice and output of managerial decisions is described. The structure of a complex system configuration based on the Petri net systems engineering including four graphs is defined, namely goals and indicators of the balanced scorecard, managerial decisions and operations of a complex system. A complex Petri net displaying a common information space for administrative processes in a complex system on the basis of a balanced scorecard is constructed by means of composition operations. A formal description of configuration model graphs including the justification of Petri nets types is provided. The logic of their interaction is also described. A model of a balanced scorecard based on the colored Petri net including "horizontal" and "vertical" structures is proposed. This model makes it possible to model dynamics of goal achievement and change of indicators of the balanced scorecard. A conceptual structure of a complex system configuration in the form of a tetradic model is constructed on the basis of composition and the developed models of an operation graph of a complex system on the basis of a classical Petri net, a goal graph of a balanced scorecard on the basis of an acyclic Petri net, a graph of indicators on the basis of the "weighted" Petri net and a graph of managerial decisions on the basis of a classical Petri net. A conceptual solution making it possible to simulate system configurations of strategic control of complex systems on the basis of a balanced system of indicators and a tetradic approach with the use of the Petri net mechanism is proposed.

Keywords: system configuration, Petri nets, complex system, balanced scorecard, strategic control, managerial decision-making, simulation of a system configuration, control cycle

REFERENCES

1. Mintzberg H., Ahlstrand B., Lampel J. *Strategy safari: a guided tour through the wilds of strategic management*, London : Prentice Hall, 1998 (Russ. ed.: Mintsberg G., Al'stend B., Lempel Dzh. *Shkoly strategii*. St. Petersburg, Piter Publ., 2000. 336 p.).
2. Muradyan I.A., Yuditskii S.A. Metod analiza konfiguratsii organizatsionnykh sistem na setyakh Petri [Method for analyzing configurations of organizational systems on Petri nets]. *Upravlenie bol'shimi sistemami – Large-Scale Systems Control*, 2007, iss. 16, pp. 163–170.
3. Yuditskii S.A., Radchenko E.G. Algebra potokosobytiy i seti Petri – yazyk potokovogo modelirovaniya mnogoagentnykh ierarkhicheskikh sistem [Algebra of flow events and Petri nets – the

* Received 17 January 2018.

language of streaming modeling of multi-agent hierarchical systems]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika – Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2004, no. 9, pp. 61–66.

4. Vladislavlev P.N., Muradyan I.A., Yuditskii S.A. Vzaimodeistvie tselevoi i operatsionnoi dinamicheskikh modelei slozhnykh protsessov [Objective and operational dynamic models of complex processes: their interaction]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2005, no. 11, pp. 126–134. (In Russian).

5. Yuditskii S.A., Muradyan I.A., Zheltova L.V. Analiz slabostrukturirovannykh problemnykh situatsii v organizatsionnykh sistemakh s primeneniem nechetkikh kognitivnykh kart [Analysis of weakly structured problem situations in organizational systems using fuzzy cognitive maps]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika – Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2008, no. 3, pp. C. 54–62.

6. Yuditskii S.A. Grafodinamicheskoe modelirovanie organizatsionno-tehnicheskikh sistem na osnove triadnykh agentov [Graphodynamic modeling of organizational-technical systems based on triad agents]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti – Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 3, pp. 258–281.

7. Yuditskii S.A., Vladislavlev P.N., Toch D.S. Triadnyi podkhod k modelirovaniyu sistem setsetsentricheskogo upravleniya [A triad approach to network-centric control systems modelling]. *Upravlenie bol'shimi sistemami – Large-Scale Systems Control*, 2010, iss. 28, pp. 24–39.

8. Zubova T.N., Mel'nikov B.F. Ispol'zovanie setei Petri dlya modelirovaniya protsessa prinyatiya upravlencheskikh reshenii [Using Petri nets for modeling the process of making managerial decisions]. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta – Vector of sciences. Togliatti State University*, 2011, no. 3 (17), pp. 33–37.

9. Zubova T.N. Possibilitarnaya paradigma kak metodologicheskaya osnova kontseptual'nogo modelirovaniya dolgosrochnogo upravleniya predpriyatiem [The possibilant paradigm as a methodological basis for conceptual modeling of long-term enterprise management]. *Evristicheskie algoritmy i raspredelennye vychisleniya – Heuristic Algorithms and Distributed Computing*, 2015, no. 3, pp. 88–98.

10. Mel'nikov B.F., Zubova T.N. Matematicheskoe modelirovanie upravleniya organizatsiei po tsennostnym orientiram: metodika postanovki optimizatsionnykh zadach [Mathematical modeling of organization management by value guidelines: a method for setting optimization problems]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 9–15.

11. Shevchenko S.Yu., Ivanov A.A. Sistemy otsenochnykh pokazatelei strategicheskogo i operativnogo kontrollinga [Systems of estimated indicators of strategic and operational controlling]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta – Journal of the Ural State University of Economics*, 2014, no. 3 (53), pp. C. 25–32.

12. Rigby D.K. *Management tools 2017: an executive's guide*. Boston, MA, Bain & Company, 2017. 68 p.

13. Kaplan R.S., Norton D.P. *The balanced scorecard : translating strategy into action*. Boston, Harvard Business School Press, 1996 (Russ. ed.: Kaplan R.S., Norton D.P. *Sbalansirovannaya sistema pokazatelei: ot strategii k deistviyu*. 2nd ed. Moscow, Olimp-Biznes Publ., 2006. 320 p.).

14. Khanova A.A., Urazaliev N.S., Usmanova Z.A. Metod situatsionnogo upravleniya slozhnymi sistemami na osnove sbalansirovannoi sistemy pokazatelei [The method of situational control of complex systems based on the balanced scorecard]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (60), pp. 69–82.

15. Jensen K., Kristensen L.M. *Coloured petri nets: modelling and validation of concurrent systems*. Dordrecht, New York, Springer, 2009. 384 p.

16. Piterson J.L. *Petri net theory and the modeling of systems*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1981 (Russ. ed.: Piterson Dzh. *Teoriya setei Petri i modelirovanie system*. Moscow, Mir Publ., 1984. 264 p.

17. Martynova O.L. Analiz avtomatizirovannykh biznes-protsessov na urovne peredachi dannykh s pomoshch'yu setei Petri [Analysis of automated business processes at the level of data transfer using Petri nets]. *Informatsionnye tekhnologii i programmirovaniye* [Information technologies and programming]. Moscow, 2004, iss. 1 (10), pt. 1, pp. 27–42.

18. Jensen K. *Coloured Petri Nets*. Vol. 1–3. Berlin, Springer, 1992–1997.

Для цитирования:

Ханова А.А., Мунтьянова А.А., Аверьянова К.И. Моделирование конфигурации сложных систем на основе сетей Петри // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2 (71). – С. 39–58. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-39-58.

For citation:

Khanova A.A., Muntyanova A.A., Averyanova K.I. Modelirovaniye konfiguratsii slozhnykh sistem na osnove setei Petri [Simulation of a complex system configuration on the basis of Petri nets]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 2 (71), pp. 39–58. doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-39-58.