

УДК 007:681.518.2
ББК 22.18 65.23 65.29

ТРИАДНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Юдицкий С. А.¹, Владиславлев П. Н.², Точ Д. С.³
(Учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления РАН, Москва)

Рассмотрен комплексный триадный подход к моделированию и анализу систем сетевидного управления в различных предметных областях, базирующийся на формальном аппарате целеполагания, логического управления последовательностью действий, взаимовлияния отклонений от нормы показателей деятельности системы. Предлагается человеко-компьютерное взаимодействие при триадном моделировании.

Ключевые слова: сетевидное управление, триадная структура, целеполагание, последовательность действий, взаимовлияние отклонений показателей от нормы.

1. Введение

Большие системы в различных предметных областях (бизнес, производство, энергетика, торговля, военная сфера и т. д.) состоят из множества центров (автономных организационных объектов), объединенных в общую сеть. Управление функционированием и развитием сетевых взаимодействий, называемое

¹ Семен Абрамович Юдицкий, доктор технических наук, профессор, тел. (499) 783-20-85.

² Павел Николаевич Владиславлев, кандидат технических наук (vladislavlev@rambler.ru).

³ Дмитрий Сергеевич Точ, кандидат технических наук (dimpale@pochta.ru).

сетевым управлением (СЦУ), предусматривает выполнение в определенной последовательности совокупности целенаправленных действий, сопровождающихся изменением показателей состояния системы. Для того чтобы организовать СЦУ, необходимо решить следующие задачи:

- сформировать состав и структуру целей, поставленных перед системой, установить причинно-следственные связи на множестве целей (целеполагание [5, 9, 11]);
- задать состав и порядок выполнения действий (логическое управление [3, 10, 12]);
- выбрать наиболее значимые показатели, характеризующие работу системы, определить отношения и способы взаимовлияния между показателями (когнитивный анализ [4, 6, 8]);
- установить связи между действиями, целями и показателями.

Моделирование системы СЦУ реализуется в форме человеко-компьютерного взаимодействия: человек задает предполагаемое формальное описание (модель) системы, компьютерная структура просчитывает модель и формирует данные о достижении целей и тенденциях изменения показателей, человек оценивает эти данные и при необходимости корректирует модель. Далее цикл моделирования повторяется.

В предлагаемой вниманию читателя статье обсуждается комплексная триадная модель СЦУ, состоящая из взаимодействующих между собой сетевых субмоделей:

- целеполагания на основе «древовидных» ациклических сетей Петри;
- логического управления на основе диаграмм действий и диаграмм переходов на множестве действий;
- взаимовлияния отклонений от нормы показателей на основе функциональных когнитивных карт с бинарной пометкой дуг (при этом мы исходим из гипотезы: если все показатели находятся в пределах нормы, т. е. допустимого интервала значений, то их влиянием друг на друга можно пренебречь).

Решение поставленных задач базируется на применении формального аппарата графодинамики – научного направления, введенного в 70-е годы прошлого века М. А. Айзерманом и его учениками, оперирующего переменными в форме графов и отношениями определенными на графах [1].

Сетевые субмодели СЦУ, их взаимодействие и методы анализа в статье иллюстрируются на гипотетическом примере.

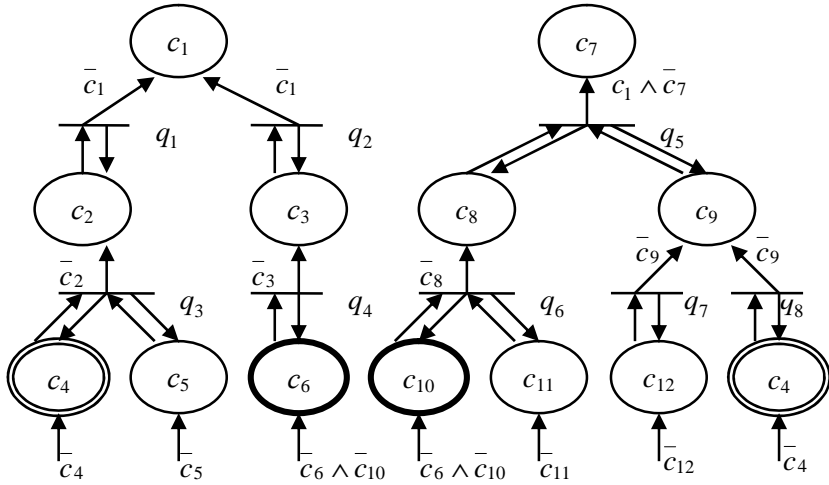
2. Моделирование целеполагания

На множестве целей, определяющих деятельность системы, введем отношение подчиненности «надцель–подцель», где достижение надцели является непосредственным следствием достижения подцелей (подцели детализируют надцель). Надцели, не подчиненные никакой другой цели, назовем конечными, а подцели, которым не подчинены другие цели, – начальными. Конечные цели формируются абстрактно, в общем виде. Последовательность подчиненных целей, вплоть до начальных, дает необходимые уточнения. Если конечных целей несколько, то они достигаются либо в определенной очередности, либо независимо друг от друга.

Целеполагание является предметом интеллектуальной деятельности. Психология целеполагания с акцентом на допускаемые типовые ошибки, приводящие к неудаче, описаны в [2].

В статье формальный аппарат целеполагания базируется на сетях Петри [7], позиции которых сопоставлены целям c_i , $i = 1, \dots, r$. Пример такой сети дан на рис. 1 сверху. Переходы q_j , $j = 1, \dots, s$, связывают надцель c_i с подчиненными ей подцелями, где каждая подцель соединена с переходом двумя противоположенными стрелками, а переход с надцелью – одной стрелкой, помеченной переменной \bar{c}_i . Каждая позиция c_i либо пуста ($c_i = 0$, цель не достигнута), либо содержит один маркер ($c_i = 1$, цель достигнута). Если в позициях всех подцелей перехода q_j есть по маркеру и позиция надцели c_i пуста, то переход мгновенно срабатывает и вносит маркер в c_i , сохраняя маркирование подцелевых позиций. В резуль-

тате пометка стрелки $(q_j; c_i)$ принимает значения $\bar{c}_i = 0$, что исключает попадание второго маркера в позицию c_i .



τ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
c_1																						
c_2																						
c_3																						
c_4																						
c_5																						
c_6																						
c_7																						
c_8																						
c_9																						
c_{10}																						
c_{11}																						
c_{12}																						

Рис. 1. Пример целевой субмодели

Таким образом, при работе сетевой модели целеполагания маркеры продвигаются «снизу–вверх» по древовидным сетям Петри. При этом могут использоваться два вида отношения «надцель–подцели», при числе подцелей не менее двух: конъюнктивное и альтернативное. При конъюнктивном отношении обязательно выполнение всех подцелей, которые являются составными частями надцели. При альтернативном отношении необходимо и достаточно выполнение только одной подцели (при недетерминированном выборе этой подцели). В примере на рис. 1 конъюнктивными являются отношения: $(c_2 - c_4, c_5)$, $(c_7 - c_8, c_9)$, $(c_8 - c_{10}, c_{11})$, альтернативными: $(c_1 - c_2, c_3)$, $(c_9 - c_4, c_{12})$.

Среди начальных подцелей (позиций) выделим противоречивые (изображаются жирными кружками) и совпадающие (изображаются двойными кружками). Противоречивые начальные позиции c_i, c_j находятся в отношении альтернативности, обеспечиваемом логической функцией $a = \bar{c}_i \wedge \bar{c}_j$, помечающей ведущие в них стрелки. Если первым маркер попадает в одну из противоречивых позиций, например $c_i = 1$, то для c_j $a = 0$ и вход в c_j блокируется. Совпадающие позиции являются экземплярами одной и той же начальной подцели. В примере на рис. 1 противоречивые позиции c_6, c_{10} и совпадают две позиции c_4 .

Результатом моделирования целеполагания является линейный график достижения целей на заданном временном горизонте $[t = 0, t = e]$, пример которого дан на рис. 1 снизу. Интервалы горизонта, на которых цели c_i достигнуты, закрашены. График достижения целей строится непосредственно по целевой сети.

В примере на рис. 1 в момент $t = 4$ достигаются (вследствие внешнего воздействия) оба экземпляра подцели c_4 . Левая подцель не влияет на свою надцель c_2 , правая вызывает в следующий момент $t = 5$ достижение надцели c_9 . Дальнейших переключений (без воздействия на начальные позиции) не происходит, в целевой сети устанавливается равновесие. В момент $t = 6$ маркер заносится в начальную позицию c_5 , срабатывает переход q_3 и в момент $t = 7$ маркер вносится в позицию

c_2 . Далее в момент $t = 8$ срабатывает q_1 и маркер вносится в позицию c_1 , достигнута первая конечная цель. Целевая сеть продолжает функционировать подобным образом. В момент $t = 15$ маркеры находятся в позициях c_8, c_9 и выполняется условие $c_1 \wedge \bar{c}_7 = 1 \wedge 1 = 1$. Это приводит к срабатыванию перехода q_5 и внесению маркера в позицию c_7 . Таким образом, достигнута вторая конечная цель c_7 , причём строго после первой c_1 .

3. Моделирование взаимовлияния показателей

Взаимовлияние показателей деятельности системы принято моделировать «взвешенным» ориентированным графом, предложенным Ф. Робертсом⁴ [8], вершины которого соответствуют показателям, дуги (стрелки) соответствуют влияниям показателя – предшественника на показатель – последователь, причём дуга помечается «весом» – положительным или отрицательным числом, заданным экспертом.

Динамика показателей при этом определяется линейной моделью:

$$(1) \quad p_i(t+1) = p_i(t) + \sum_{k \in I_i} w_{ki}(p_k(t) - p_k(t-1)),$$

где p_i – последователь; p_k – предшественник; w_{ki} – вес дуги ($p_k p_i$); $t = 0, 1, \dots, e$ – дискретное время; I_i – множество номеров показателей, воздействующих на p_i , $i, k = 1, 2, \dots, n$.

Модель (1) характеризуется большой размерностью и разбросом значений показателей, что затрудняет экспертный анализ и принятие решений.

В статье предлагается несколько иная интерпретация графа взаимовлияния показателей, которую назовём функциональной когнитивной картой с бинарной пометкой дуг. Вершины p_i графа трактуются как отклонения показателей от установленной для них нормы (допустимого интервала значений), а дуги ($p_k p_i$)

⁴ Другое название – когнитивная карта.

соответствуют влиянию p_k на p_i и выражаются парой функций $j_{ki}^+(p_k), j_{ki}^-(p_k)$, отображающих преобразование соответственно положительного и отрицательного отклонения от нормы предшественника в отклонение последователя. Введение функциональных когнитивных карт, помимо уменьшения размерности модели, по сравнению с подходом (1), позволяет повысить «мощность моделирования» за счёт разнообразия «дуговых функций».

Влияние отклонения p_k на отклонение p_i в момент t будем выражать функцией:

$$(2) \quad f_{ki}(t) = \begin{cases} f_{ki}^+(p_k(t)), & \text{если } p_k(t) > 0, \\ f_{ki}^-(p_k(t)), & \text{если } p_k(t) < 0, \\ 0, & \text{если } p_k(t) = 0. \end{cases}$$

Пусть в момент t показатель p_i характеризуется множеством $X_i(t)$, состоящим из собственного отклонения $p_i(t)$, отклонений $f_{ki}(t)$, вычисленных для всех его предшественников p_k , $k = 1, \dots, l$, на основе (2), а также отклонения $p_i^*(t)$, инициированного внешним воздействием на показатель (внешнее управление отклонением показателя):

$$(3) \quad X_i(t) = p_i(t) \bigcup \{f_{ki}(t)\} \bigcup p_i^*(t).$$

В множестве $X_i(t)$ удалим все нулевые члены. В результате получим множество $\overline{X}_i(t)$, которое разобьём на два подмножества $\overline{X}_i^+(t), \overline{X}_i^-(t)$, содержащие соответственно все положительные и все отрицательные отклонения показателя p_i (одно из подмножеств может быть пустым):

$$(4) \quad \overline{X}_i(t) = \overline{X}_i^+(t) \bigcup \overline{X}_i^-(t).$$

В этих подмножествах отклонение, наибольшее по абсолютной величине ($\max \overline{X}_i^+(t)$ и $\min \overline{X}_i^-(t)$) перекрывает («поглощает») все остальные отклонения, т. е. имеет место:

$$(5) \quad \overline{X}_i^+(t) = \max \overline{X}_i^+(t), \overline{X}_i^-(t) = \min \overline{X}_i^-(t).$$

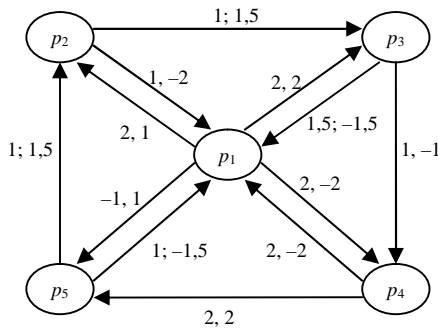
Из соотношений (4), (5) следует уравнение для отклонения от нормы показателя p_i в следующий момент $t + 1$:

$$(6) \quad p_i(t+1) = \max \bar{X}_i^+(t) + \min \bar{X}_i^-(t).$$

Пример функциональной когнитивной карты, в которой для простоты дуговые функции имеют вид:

$$(7) \quad j_{ki}^+(p_k) = a_{ki} \times p_k, \quad j_{ki}^-(p_k) = b_{ki} \times p_k,$$

где a_{ki}, b_{ki} – константы; дуги $(p_k p_i)$ помечены парами (a_{ki}, b_{ki}) , дан на рис. 2 сверху. Матрица связей когнитивной карты (бинарная пометка дуг) показана на рис. 2 снизу.



Матрица связей $\|a_{ki}, b_{ki}\|$

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
p_1	0	2; 1	2; 2	2; -2	-1; 1
p_2	1; -2	0	1; 1,5	0	0
p_3	1,5; -1,5	0	0	1; -1	0
p_4	2; -2	0	0	0	2; 2
p_5	1; -1,5	1; 1,5	0	0	0

Рис. 2. Пример субмодели взаимовлияния отклонений показателей от нормы (частный случай функциональной когнитивной карты)

Моделирование взаимовлияния отклонений показателей производится путём построения линейной таблицы (ленты), отображающей динамику вектора отклонений $p(t) = \langle p_1(t), \dots, p_n(t) \rangle$ в моменты времени $t = 0, 1, \dots, e$. При этом последовательно применяется процедура, использующая векторный аппарат.

1. Пусть в момент t система, характеризуемая вектором отклонений $p(t)$, подвергается внешнему воздействию, в результате которого скачкообразно изменяются некоторые компоненты, например $p_1^*(t=1) = 3$, $p_3^*(t=1) = -2$. Формируем вектор $p^*(t) = \langle p_1^*(t), \dots, p_n^*(t) \rangle$ внешнего управления.

2. Транспонированный вектор отклонений $p^{*T}(t=1)$ умножаем на каждый столбец матрицы связей $\|a_{ki}, b_{ki}\|$ согласно правилу (2). В результате получаем матрицу:

$$F(t=1) = \begin{matrix} \begin{matrix} 3 \\ 0 \\ -2 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \times \begin{matrix} \left| \begin{matrix} 0 & 2;1 & 2;2 & 2;-2 & -1;1 \\ 1;-2 & 0 & 1;1,5 & 0 & 0 \\ 1,5;-1,5 & 0 & 0 & 1;-1 & 0 \\ 2;-2 & 0 & 0 & 0 & 2;2 \\ 1;-1,5 & 1;1,5 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right| \end{matrix} = \begin{matrix} \left| \begin{matrix} 0 & 6 & 6 & 6 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right| \end{matrix} \end{matrix}.$$

3. Вводим в матрицу $F(t=1)$ две дополнительные нижние строки $p(t=1)$, $p^*(t=1)$ (если они совпадают, то одну строку):

$$\bar{F}(t=1) = \begin{matrix} \left| \begin{matrix} 0 & 6 & 6 & 6 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & -2 & 0 & 0 \end{matrix} \right| \\ p(t=2) = 3 \quad 6 \quad 4 \quad 6 \quad -3 \end{matrix}$$

4. К каждому столбцу p_i матрицы $\bar{F}(t=1)$ применяем преобразования (4), (5), (6), в результате получаем $p_i(t=2)$. Вектор-столбец $p^T(t=2)$ вносим в ленту отклонений и далее продолжаем аналогично для последующих моментов t .

5. Построение ленты отклонений прерываем, если выполняется по меньшей мере одно из условий:

- достигнута граница временного горизонта $[0, e]$;
- внутри горизонта установилось равновесие $p^T(t) = p^T(t+1)$;
- какие-нибудь из отклонений превысили критическую величину (например $p_i^{\max} = 100, p_i^{\min} = -50, i = 1, \dots, 5$).

В рассмотренном примере имеет место третий случай, лента отклонений показателей от нормы:

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8
p_1	0	3	3	12	12	20	48	80	192
p_2	0	0	6	1,5	10	24	22	96	96
p_3	0	-2	4	6	10	24	40	96	160
p_4	0	0	6	6	10	24	40	96	160
p_5	0	0	-3	9	0	8	28	32	112
		↑			↑				
		$p_1^* = 3$			$p_2^* = -14$				
		$p_3^* = -2$			$p_3^* = -14$				
					$p_4^* = -14$				

4. Моделирование последовательности действий

Для моделирования порядка выполнения действий и обусловленного этим порядком управления целями и показателями в триадной структуре применяются диаграммы действий на базе сетей Петри (графов операций [12]) и диаграммы переходов на множестве действий.

Пример диаграммы действий дан на рис. 3 сверху. В любой i -ой позиции находится один маркер, если действие d_i , $i = 1, \dots, m$, выполняется, и позиция пуста, если не выполняется.

Переходы t_j , $j = 1, \dots, g$, срабатывают мгновенно, если во всех входных позициях t_j есть по маркеру, выполняется приписанное переходу внешнее условие v_h , $h = 1, \dots, l$, с момента срабатывания предыдущего перехода прошло не более заданного числа единиц модельного времени. В результате срабатывания перехода из всех его входных позиций удаляются, а во все выходные позиции вносятся маркеры. Таким образом, диаграммы действий и переходов – это динамическая модель.

Диаграмма переходов, изображённая на рис. 3 снизу, детализирует диаграмму действий, а также её связи с диаграммами (субмоделями) целей и взаимовлияния отклонений показателей.

Диаграмма переходов представляет собой ориентированный граф, вершины которого соответствуют переходам, а дуги $(t_i t_j)$ помечены выполняемыми действиями (помещены в квадратные скобки) и временным сдвигом момента срабатывания t_j относительно момента срабатывания t_i , $i, j = 1, \dots, g$ (справа от квадратных скобок). Над вершиной перехода проставляются инициализированные им начальные цели, под вершиной – сформированные переходом новые значения отклонений показателей от нормы. Эти пометки отображают связи между составляющими триадной структуры.

Результаты моделирования СЦУ на основе триадной структуры выражаются итоговой диаграммой, представленной на рис. 4. В верхней строке диаграммы указаны моменты времени, образующие горизонт моделирования. В следующей строке указаны привязанные к определённому моменту переходы, в которые происходит изменение значений индикаторов действий, целей, отклонений показателей. В верхнем ярусе диаграммы даны линейные графики индикаторов действий (d_0, d_k – начальное и конечное «пустые» действия, соответствующие подготовленности к моделированию и его завершению).

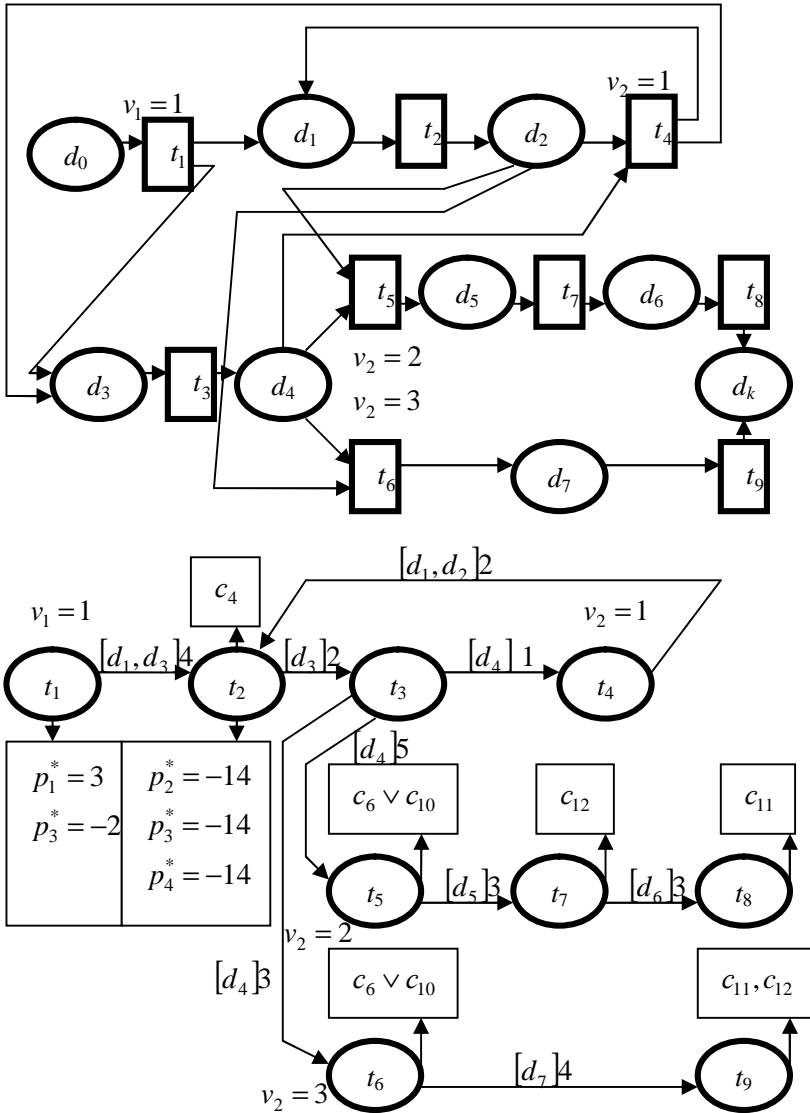


Рис. 3. Диаграмма действий и диаграмма переходов

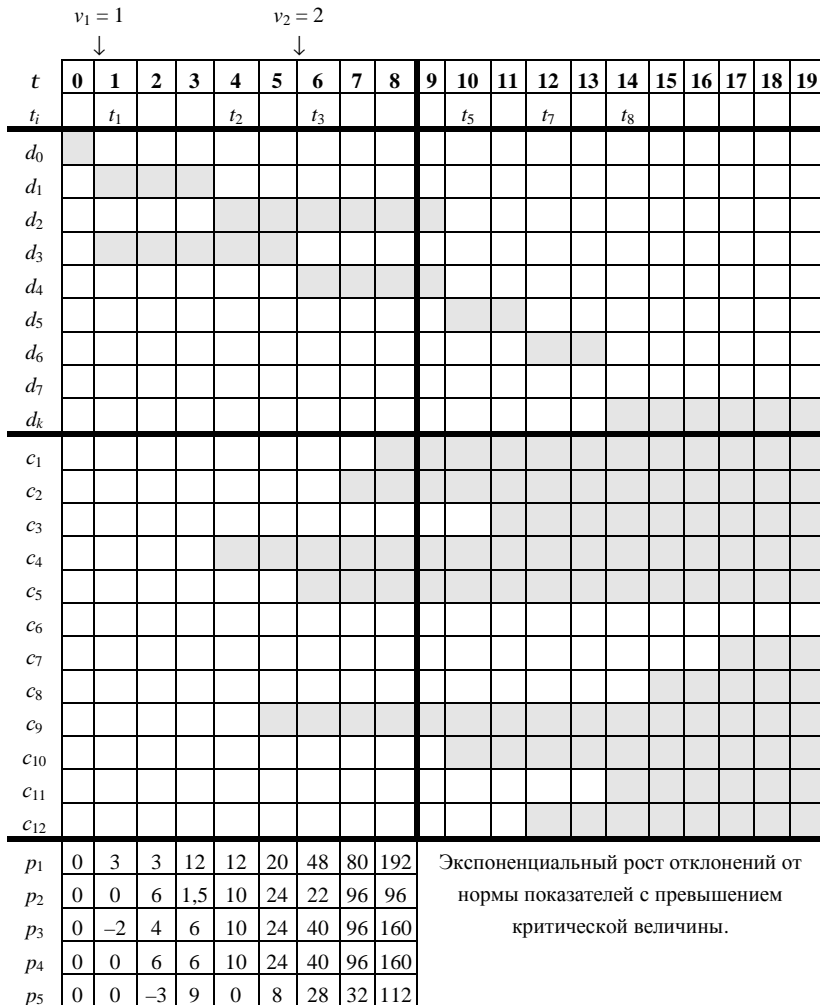


Рис. 4. Итоговая диаграмма моделирования триадной структуры сетцецентрического управления

В среднем ярусе представлены линейные графики индикаторов целей, в нижнем дана таблица значений отклонений пока-

зателей от нормы. Вертикальная жирная линия разделяет допустимый и недопустимый интервалы горизонта моделирования.

Итог: при заданной конфигурации триадной структуры полностью выполняются действия d_1, d_3 и лишь частично d_2, d_4 , достигаются цели c_1, c_2, c_4, c_5, c_9 , в момент $t = 8$ отклонения показателей p_1, p_3, p_4, p_5 выходят за критическую отметку $p_i^{\max} = 100$, а отклонение p_2 вплотную приблизилось к ней. Поэтому в момент $t = 8$ эксперимент прекращаем.

5. Заключительные замечания

1. Сетевое управление может быть применено как для реальных, так и виртуальных систем, причём второе имеет место при проектировании, стратегическом планировании, прогнозировании. Виртуальное СЦУ выполняется на уровне моделей, при этом ничего не может «взорваться, сгореть, утонуть». В данной статье обсуждаются методы виртуального СЦУ.

2. Начальная конфигурация триадной структуры СЦУ создаётся экспертами, обладающими большими знаниями и опытом в данной предметной области.

3. При СЦУ повторяется цикл «моделирование триадной структуры – оценка результатов моделирования – коррекция триадной структуры». Коррекция выполняется экспертами и трактуется как собственно акт управления системой.

4. Простейшей формой коррекции является изменение значений числовых параметров модели (пометок дуг на когнитивной карте, временных интервалов между срабатыванием переходов, моментов и величины управляющих воздействий переходов на отклонения показателей и т. д.) методом последовательного подбора.

5. Более радикальная форма коррекции связана с изменением по результатам моделирования конфигурации триадной структуры. Для решения этой проблемы (аналитической коррекции), возможно, потребуется специальный формальный

аппарат, который пока отсутствует. Его создание будет способствовать развитию теории СЦУ.

Литература

1. АЙЗЕРМАН М. А., ГУСЕВ Л. А., ПЕТРОВ С. В., СМИРНОВА И. Н. *Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики)* // I: Автоматика и телемеханика. – 1977. – №7. – С. 135–151. II: Автоматика и телемеханика. – 1977. – №9. – С. 123–136.
2. ДЕРНЕР Д. *Логика неудачи*. – М.: Смысл, 1997.
3. ЗАКРЕВСКИЙ А. Д. *Параллельные алгоритмы логического управления*. – М.: Едиториал УРСС, 2003.
4. КУЗНЕЦОВ О. П., КУЛИНИЧ А. А., МАРКОВСКИЙ А. В. *Анализ влияний при управлении слабоструктурированными ситуациями на основе когнитивных карт* // Человеческий фактор в управлении. / Под ред. Н. А. Абрамовой, К. С. Гинсберга, Д. А. Новикова – М.: КомКнига, 2006. – С. 313–344.
5. ЛАРИЧЕВ О. И. *Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в Волшебных Странах*. – М.: Логос, 2000.
6. МАКСИМОВ В. И. *Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций* // Проблемы управления. – 2005. – №3. – С. 30–38.
7. ПИТЕРСОН ДЖ. *Теория сетей Петри и моделирование систем*. – М.: Мир, 1984.
8. РОБЕРТС Ф. С. *Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам*. – М.: Наука, 1986.
9. СААТИ Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. – М.: Радио и связь, 1993.
10. ЮДИЦКИЙ С. А. *Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем*. – М.: СИНТЕГ, 2001.

11. ЮДИЦКИЙ С. А., ВЛАДИСЛАВЛЕВ П. Н. *Основы предпроектного анализа организационных систем.* – М.: Финансы и статистика, 2005.
12. ЮДИЦКИЙ С. А., МАГЕРГУТ В. З. *Логическое управление дискретными процессами.* – М.: Машиностроение, 1987.

A TRIAD APPROACH TO NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEMS MODELLING

Semen Yuditskiy, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, tel. (499) 783-20-85).

Pavel Vladislavlev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc., (vladislavlev@rambler.ru).

Dmitri Toch, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc., (dimpale@pochta.ru).

Abstract: We consider a synthetic triad approach to modelling and analyzing network-centric control systems for various subject domains. This approach is based on the formal technique of objectives definition, the sequence of actions logical control, and interference of system activity indicators deviations from the norm. Human-computer interaction for triad modelling is offered.

Keywords: network-centric control, triad structure, logic of the purposes, sequence of actions, interference of indicators deviations.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В. Г. Лебедевым