

УДК 007:681.518.2
ББК 22.18 65.23 65.29

ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ С СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ

Юдицкий С. А.¹, Точ Д. С.²

*(Учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления РАН, Москва)*

Рассмотрена комплексная модель развития больших систем в виде взаимодействующих между собой сетевых динамических субмоделей: графа показателей и графа действий, в которой динамика показателей моделируется в непрерывном времени, а динамика действий – в дискретном. Такое сочетание позволяет повысить уровень адекватности реальным системам по сравнению с чисто дискретной моделью. Зависимость показателей от времени выражается с помощью многочленов, в терминах которых описано взаимовлияние показателей. Усовершенствован механизм функционирования графов действий. Предложен графический метод временного анализа динамики непрерывно-дискретной модели, расширяющей возможности имитационного моделирования больших систем.

Ключевые слова: графодинамика, непрерывно-дискретная модель, показатель, действие, логическое условие срабатывания перехода графа действий, внешнее и внутреннее событие, индикаторная логика, временной анализ.

¹ Семен Абрамович Юдицкий, д.т.н., профессор (seabyu@mail.ru).

² Дмитрий Сергеевич Точ, канд. технич. наук (dmtotch@gmail.com).

1. Введение

Системы с сетецентрическим управлением (СЦУ) характеризуются большим числом компонентов и причинно-следственных связей между компонентами. С полным основанием их можно отнести к категории больших систем. В предыдущей работе авторов [3] обсуждалась комплексная триадная модель СЦУ, состоящая из взаимодействующих между собой сетевых субмоделей целеполагания, логического управления действиями и взаимовлияния показателей процесса в системе. Субмодели названы соответственно графом целей, графом действий (операций), графом показателей.

Триадная модель определена на заданной дискретной шкале времени с равными промежутками между тактовыми моментами. Предполагается, что любое событие в триадной модели (внешнее воздействие, достижение цели, инициирование и завершение действий, «скачкообразное» изменение показателей) происходит только в тактовые моменты, которые сопоставляются с переходами в графе действий. В этом смысле дискретная триадная модель является несколько «загрубленной», хотя и достаточно простой, удобной для восприятия. В реальной системе с СЦУ события могут происходить внутри промежутков между заданными тактовыми моментами. В дискретной модели в ущерб ее адекватности такие события смещают во времени и переносят в ближайший тактовый момент.

В данной работе, которая является продолжением и развитием [3], предлагается непрерывно-дискретная модель с СЦУ с отображением динамики показателей на непрерывной временной шкале, а динамики действий – на дискретной. Тактовые моменты не задаются, а вычисляются с применением формального аппарата индикаторной логики [4]. Динамика показателей с учетом их взаимовлияния описывается многочленными функциями с областью определения на числовой оси.

Предложенная модель дает более полную (а тем самым и более адекватную) картину функционирования системы по сравнению с [3].

2. Моделирование динамики показателей

Пусть процесс, реализуемый в системе, характеризуется показателями p_i , $i = 1, \dots, n$. Каждому показателю поставим в соответствие «собственную» переменную x_i , являющуюся функцией непрерывного времени τ :

$$(1) \quad x_i(\tau) = a_{i0} + a_{i1}\tau + \dots + a_{ik}\tau^k,$$

где a_{il} – константы, $l = 0, 1, \dots, k$.

С течением времени все показатели изменяются параллельно, причем на p_i могут влиять другие показатели p_j , $j = 1, \dots, n$, $i \neq j$:

$$(2) \quad p_i(\tau) = x_i(\tau) + \sum_j b_{ji} \times x_j(\tau),$$

b_{ji} – коэффициент, определяющий влияние p_j на p_i . Значения a_{il} , b_{ji} могут быть как положительными, так и отрицательными.

В графе показателей вершины соответствуют показателям p_i , дуги (p_{i1}, p_{i2}) , $i1, i2 = 1, \dots, n$, $i1 \neq i2$, «нагруженные» коэффициентами $b_{i1,i2}$, соответствуют влиянию p_{i1} на p_{i2} .

Пример графа показателей дан на рис. 1.

Примем, что все собственные функции согласно (1) являются линейными ($k = 1$) и в примере имеет место:

$$x_1(\tau) = 2 + 0,5\tau,$$

$$(3) \quad x_2(\tau) = 2 - 0,5\tau,$$

$$x_3(\tau) = 3 + 0,3\tau.$$

Применив к графу на рис. 1 соотношения (2), (3), получим:

$$p_1(\tau) = 2 + 0,5\tau + 0,2(2 - 0,5\tau) = 2,4 + 0,4\tau,$$

$$(4) \quad p_2(\tau) = 2 - 0,5\tau + 0,1(2 + 0,5\tau) = 2,2 - 0,45\tau,$$

$$p_3(\tau) = 3 + 0,3\tau - 0,1(2 + 0,5\tau) + 0,1(2 - 0,5\tau) = 3 + 0,2\tau.$$

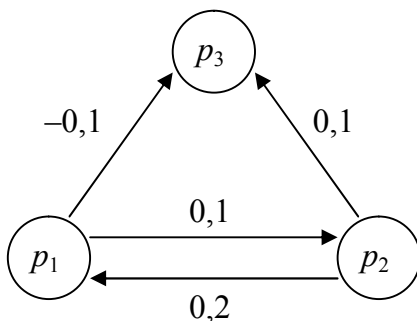


Рис. 1. Пример графа показателей

Поскольку показатели в реальной системе могут измеряться в разных единицах (иметь разную физическую природу), будем использовать для них единую лингвистическо-балльную шкалу, например данную в таблице 1.

Таблица 1. Лингвистическо-балльные значения показателей

Лингвистическая оценка значения	Балльная оценка
Очень низкое	$2 > p_i > 0$
Низкое	$4 > p_i \geq 2$
Среднее	$8 > p_i \geq 4$
Высокое	$12 > p_i \geq 8$
Очень высокое	$15 > p_i \geq 12$
Сверхвысокое	$p_i \geq 15$

3. Моделирование динамики действий

Прежде чем определить граф действий, напомним основные положения индикаторной логики [4], являющейся подклассом булевой алгебры. Индикатором сравнения называется булева переменная вида $(p_i \# q)$, где p_i – числовая переменная, q –

числовая переменная или константа, $\# \in \{=, \neq, >, \geq, <, \leq\}$ – знак бинарного отношения. $(p_i \# q)$ принимает значение:

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

Индикаторной логической формулой (ИЛФ) называется выражение, полученное путем применения конечное число раз к индикаторам сравнения логических операций дизъюнкции, конъюнкции, отрицания (\wedge, \vee, \neg). Над ИЛФ выполняются эквивалентные преобразования на основе классических тождеств (приведены, например, в [1]) и дополнительных соотношений согласно таблице 2 (буква e означает константу).

Таблица 2. Эквивалентные преобразования над ИЛФ

Наименование	Формальное описание
Поглощение	$(p > e_1) \wedge (p > e_2) = (p > \max(e_1, e_2))$ $(p < e_1) \wedge (p < e_2) = (p < \min(e_1, e_2))$ $(p > e_1) \vee (p > e_2) = (p > \min(e_1, e_2))$ $(p < e_1) \vee (p < e_2) = (p < \max(e_1, e_2))$
Дополнение	$(p \geq e) \wedge (p < e) = 0$ $(p > e) \wedge (p \leq e) = 0$ $(p \geq e) \vee (p < e) = 1$ $(p > e) \vee (p \leq e) = 1$
Отрицание	$\overline{(p > e)} = (p \leq e)$ $\overline{(p \geq e)} = (p < e)$ $\overline{(p < e)} = (p \geq e)$ $\overline{(p \leq e)} = (p > e)$

Таблица 3. Логические условия срабатывания переходов

Переход	Задержка срабатывания	Внешнее событие	Внутреннее событие (функция показателей)
t_1	$\theta_1 = 2$	$v_1 = 1$	$(p_1 < 2) \wedge (p_2 = 0) \wedge (p_3 = 0)$
t_2	$\theta_2 = 1$	–	$(p_1 \geq 2) \wedge (p_1 < 3) \wedge ((p_2 > 0) \vee (p_3 > 0))$
t_3	$\theta_3 = 1$	–	$(p_1 \geq 2) \wedge (p_1 < 3) \wedge (p_2 > 0) \wedge (p_3 > 0)$
t_4	$\theta_4 = 2$	$v_2 = 1$	$(p_1 \geq 3) \wedge (p_1 < 4) \wedge (p_2 > 1) \wedge (p_3 > 1)$
t_5	$\theta_5 = 2$	$v_2 = 2$	$(p_1 \geq 3) \wedge (p_1 < 4) \wedge (((p_2 \geq 3) \wedge (p_2 < 5)) \vee (p_3 > 2))$
t_6	$\theta_6 = 2$	$v_2 = 3$	$(p_1 \geq 3) \wedge (p_1 < 4) \wedge (p_2 \geq 3) \wedge (p_2 < 5) \wedge (p_3 > 2)$
t_7	$\theta_7 = 1$	–	$(p_1 \geq 4) \wedge (p_1 < 6) \wedge (((p_2 \geq 5) \wedge (p_2 < 7)) \vee (p_3 > 4))$
t_8	$\theta_8 = 1$	–	$(p_1 \geq 6) \wedge (p_1 < 9) \wedge (p_2 \geq 7) \wedge (p_2 \leq 10) \wedge (p_3 > 8) \wedge (p_3 \leq 10)$
t_9	$\theta_9 = 1$	–	$(p_1 \geq 6) \wedge (p_1 \leq 10) \wedge (p_2 \geq 5) \wedge (p_2 \leq 10) \wedge (p_3 > 5) \wedge (p_3 \leq 10)$

Вернемся к графу действий. На рис. 2 дан пример сети Петри [2], положенной в основу графа действий, в таблице 3 приведены логические условия, определяющие срабатывание переходов этой сети. Позиции d_i , $i = 1, \dots, m$, сети Петри соответствуют действиям, переходы t_j , $j = 1, \dots, g$, – событиям, характеризующим запуском и/или завершением действий. Выполнение действия моделируется нахождением маркера в соответствующей позиции. Переход активирован, если во всех его входных позициях есть по маркеру, и срабатывает, если он активирован и кроме того выполняется соотнесенное переходу логическое условие (см. таблицу 3). При срабатывании перехода из его входных позиций удаляются маркеры, а в выходные позиции маркеры вносятся.

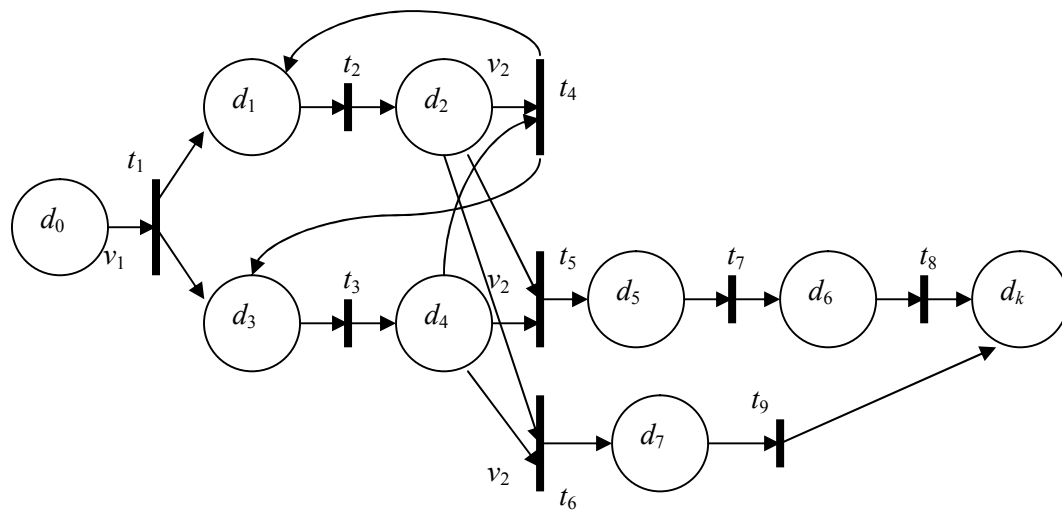


Рис. 2. Сеть Петри – основа графа действий

Логическое условие перехода t_j представляет собой конъюнкцию трех ИЛФ:

- задержки от момента активирования перехода t_j до некоторого заданного момента, выражаемой индикатором $(\theta_j = e_j)$, где e_j – число единиц непрерывного времени;
- внешнего события $(v_\omega = e_\omega)$, соответствующего воздействию среды на моделируемую систему;
- внутреннего события, определяемого значениями показателей системы.

Все три составляющие логического условия перехода задаются экспертом.

При работе графа действий применяется следующий механизм. Каждому переходу t_j соотносится условный счетчик времени (таймер) θ_j , который настраивается на число e_j . Таймер запускается при активации t_j и останавливается при достижении e_j . С этого момента граф «ожидает» наступления внешнего и внутреннего события. При наступлении того и другого срабатывает переход t_j и «обнуляется» таймер.

Момент наступления внешнего события непредсказуем, момент наступления внутреннего события рассчитывается по процедуре, описанной в разделе 4.

4. Временной анализ условий срабатывания переходов на графе действий

Пусть задан интервал моделирования системы как участок оси τ , на котором выделим единицы времени $\tau = 0, \dots, s$. Для каждого внутреннего события (таблица 3) определим отрезок внутри этого интервала, характеризующий продолжительность события. Применим процедуру:

1. В ИЛФ внутреннего события вместо показателей p_i подставим их выражение в виде многочлена (4).
2. Для каждого индикатора формулы решим неравенство (или уравнение) относительно τ и представим это решение отрезком (точкой) на интервале моделирования.

3. В соответствии с порядком логических операций \wedge , \vee , \neg , зафиксированном в ИЛФ, выполним соответствующие им теоретико-множественные операции над отрезками – пересечение \cap , объединение \cup , дополнение \setminus .

Проиллюстрируем описанную процедуру на примере ИЛФ $(p_1 \geq 3) \wedge (p_1 < 4) \wedge ((p_2 \geq 3) \wedge (p_2 < 5)) \vee (p_3 > 2)$ для перехода t_5 .

После шага 1 получим

$$(5) \quad (2,4 + 0,4\tau \geq 3) \wedge (2,4 + 0,4\tau < 4) \wedge (((2,2 - 0,45\tau \geq 3) \wedge (2,2 - 0,45\tau < 5)) \vee (3 + 0,2\tau > 2)).$$

Решив линейные неравенства во внутренних скобках, придем к выражению:

$$(6) \quad (\tau \geq 1,5) \wedge (\tau < 4) \wedge (((\tau \leq -1,8) \wedge (\tau > -6,2)) \vee (\tau > -5)).$$

Перейдем к графическому представлению на временной шкале (рис. 3). Здесь отрицательные моменты соответствуют «прошлому», т. е. времени $-\tau$ до начала моделирования. Из диаграммы на рис. 3 следует, что при принятых нами параметрах модели (рис. 2, таблица 3) срабатывание перехода t_5 графа действий возможно, если еще до начала имитационного эксперимента показатели системы будут удовлетворять условию, указанному в таблице 3. Если это неприемлемо, то следует изменить индикаторные логические формулы для внутренних событий.

5. Заключение

В работе, которая является продолжением и развитием [3], отражены следующие результаты.

1. Предложена комплексная модель развития систем с сетцентрическим управлением, согласно которой динамика показателей моделируется в непрерывном времени, а динамика действий – в дискретном. Это позволяет повысить уровень адекватности модели реальным большим системам.

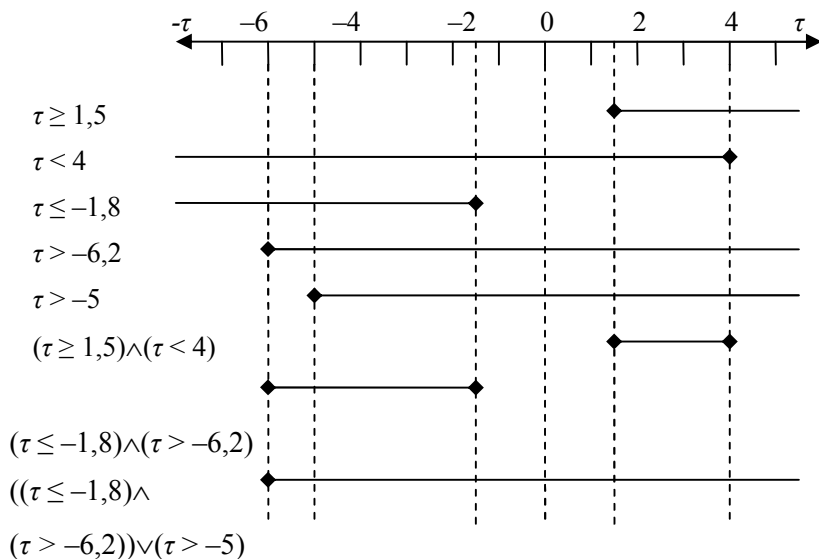


Рис. 3. Временная диаграмма ИЛФ внутреннего события

2. Усовершенствован механизм функционирования графа действий путем использования трех составляющих логического условия срабатывания переходов графа – временной задержки, внешнего и внутреннего события.

3. Предлагается графический метод временного анализа динамики модели, который, в частности, позволяет:

- определять на интервале моделирования отрезки времени, на которых наступление внешнего события может повлиять на срабатывание перехода графа действий;
- учитывать внутренние события, которые не только происходят на интервале моделирования, но и происходили «в прошлом» – до проведения имитационного эксперимента.

Можно предположить, что введенный в работе метод временного анализа расширит возможности имитационного моделирования больших систем.

Литература

1. ГЛУШКОВ В.М. *Синтез цифровых автоматов.* – М.: Физматгиз, 1962.
2. ПИТЕРСОН ДЖ. *Теория сетей Петри и моделирование систем* – М.: Мир, 1984.
3. ЮДИЦКИЙ С.А., ВЛАДИСЛАВЛЕВ П.Н., ТОЧ Д.С. *Триадный подход к моделированию систем сетцентрического управления* // Управление большими системами. – Вып. 28. – М.: ИПУ РАН, 2010. – URL: http://ubs.mtas.ru/archive/search_results_new.php?publication_id=17933.
4. 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.

DISCRETE-CONTINUOUS MODEL FOR TEMPORAL ANALYSIS OF NETWORK-CENTRIC CONTROL SYSTEMS

Semen Yuditskiy, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, tel. (495) 339-59-10).

Dmitry Totch, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc., (dmtotch@gmail.com).

An integrated model of large systems evolution is suggested. The model consists of two interoperating dynamic network-based sub-models: the factors graph with continuous-time factors dynamics, and the actions graph with discrete-time actions dynamics. This combination allows improving the level of adequacy to the real systems compared to the purely discrete model. Time dependency of factors is described in terms of polynomial functions which reveal the interrelation of factors. Action graphs functioning mechanism is

improved. A graphical method for the temporal analysis of dynamics in discrete-continuous models is proposed which contributes to the tools for large systems simulation.

Keywords: graph dynamics, discrete-continuous model, factor, action, logical condition for transaction triggering of action graph, external and internal event, indicator logics, time analysis.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Ю. В. Сидельниковым*