

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ПАРАЛЛЕЛИЗМА
УПРАВЛЕНЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

А. Ю. БАРАНОВ¹, М. А. БУЛАТОВ², А. И. СЕМЕНОВ¹, Б. В. СОКОЛОВ^{1*}

¹ *Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
sokolov_boris@inbox.ru*

² *Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета,
Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. В современных автоматизированных системах управления сложными объектами (АСУ СлО) процессы получения, хранения, обработки и передачи данных, информации и знаний тесно переплетаются с процессами мониторинга и управления указанными объектами. Эти процессы могут протекать как последовательно, так и параллельно, с использованием различных ресурсов АСУ СлО. Анализ показывает, что в рамках существующих подходов при описании рассматриваемых процессов не учитывается динамический характер частичного порядка, возникающего между ними. Такой динамически изменяющийся частичный порядок предложено называть естественным параллелизмом процессов функционирования АСУ СлО. Автоматическое целенаправленное динамическое распараллеливание процессов обеспечивает высокую эффективность использования получаемых моделей при управлении СлО. Реализуемая параллельность при этом близка к естественному параллелизму моделируемых процессов. При этом исполнение процессов с использованием динамического распараллеливания отличается возможностью масштабирования на различное число параллельно работающих интерпретаторов (процессоров, параллельных потоков). Приводится возможный подход к формальному описанию естественного параллелизма управленческих и информационных процессов.

Ключевые слова: процессы мониторинга и управления, естественный параллелизм управленческих и информационных процессов, логико-динамические модели программного управления сложными объектами

Благодарности: исследования, выполненные по данной тематике, проводились в рамках бюджетной темы FFZF-2022-0004.

Ссылка для цитирования: Баранов А. Ю., Булатов М. А., Семенов А. И., Соколов Б. В. Формализация естественного параллелизма управленческих и информационных процессов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 509—513. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-509-513.

FORMALIZING

NATURAL PARALLELISM OF MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSES

A. Yu. Baranov¹, M. A. Bulatov², A. I. Semenov¹, B. V. Sokolov¹

¹ *St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia
sokolov_boris@inbox.ru*

² *Scientific and Engineering Center of St. Petersburg Electrotechnical University,
St. Petersburg, Russia*

Abstract. In modern automated control systems for complex objects (ACS CO), the processes of obtaining, storing, processing and transmitting data, information and knowledge are closely intertwined with the processes of monitoring and managing these objects. At the same time, these processes can proceed both sequentially and in parallel, using

various resources of the ACS CO. The analysis shows that within the framework of existing approaches, when describing the processes under consideration, the dynamic nature of the partial order that arises between them is not taken into account. Such a dynamically changing partial order in previous publications is proposed to be called the natural parallelism of the processes of functioning of the ACS CO. In these papers, it is shown that with automatic purposeful dynamic parallelization of processes, high efficiency is achieved in the use of the resulting models in the control of complex objects. The implemented parallelism is close to the natural parallelism of the simulated processes. At the same time, the execution of processes using dynamic parallelization is distinguished by the possibility of scaling to a different number of parallel interpreters (processors, parallel threads). In this article, a possible approach to formal description of the natural parallelism of management and information processes is proposed.

Keywords: monitoring and management processes, natural parallelism of management and information processes, logical-dynamic models of program control of complex objects

Acknowledgment: the studies performed on this topic were carried out as part of the budget topic FFZF-2022-0004.

For citation: Baranov A. Yu., Bulatov M. A., Semenov A. I., Sokolov B. V. Formalizing natural parallelism of management and information processes. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 6. P. 509—513 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-509-513.

Введение. Основной проблемой современных средств моделирования процессов является наличие труднопреодолимого семантического разрыва между графической (аналитической) и исполняемой моделями процессов управления и обработки данных. Здесь под семантическим разрывом, в соответствии с работой [1], будет пониматься „различие между принципами (подходами), используемыми для аналитического описания процессов, и принципами (подходами), необходимыми для реализации исполняемых моделей этих процессов. Семантический разрыв проявляется в том, что понятия, объекты и структуры данных, которыми оперирует аналитик, не совпадают, а порой даже не согласуются с понятиями, объектами и структурами данных, которые должен использовать разработчик исполняемой модели“. В настоящей работе предложены варианты моделей, позволяющие конструктивно описать естественный параллелизм информационных процессов и соответствующих процессов управления в АСУ СЛО.

Полученный результат. В настоящее время известно множество вариантов формального описания естественного параллелизма процессов, происходящих как в СЛО, так и соответствующих АСУ [2]. Среди них можно отметить способы, основанные на введении логических функций [3, 4], ступенчатых функций [5—7], фазовых и смешанных ограничений, заданных в виде равенств и неравенств [7]. Вместе с тем перечисленные способы и соответствующие модели имеют целый ряд недостатков (критичность к размерности решаемых задач, трудности учета ряда ограничений, к числу которых относятся ограничения на разрывность выполнения операций взаимодействия СЛО), затрудняющих их широкое использование на практике. Поэтому в работах [7—9] предложен новый подход к формализации отображений сопряженности на основе логико-динамических ограничений, задаваемых с использованием смешанных ограничений. Упрощенный вариант такой формализации может быть представлен следующей логико-динамической моделью программного управления операциями взаимодействия СЛО:

$$\Delta = \left\{ \mathbf{u} \mid \dot{x}_i = \sum_{j=1}^m u_{ij}; \sum_{i=1}^n u_{ij}(t) \leq 1; \sum_{j=1}^m u_{ij} \leq 1; u_{ij}(t) \in \{0, 1\}; \right. \\ \left. t \in (t_0, t_f] = T; x_i(t_0) = 0; x_i(t_f) = a_i; \right. \\ \left. \sum_{j=1}^m u_{ij} \left[\sum_{\alpha \in \Gamma_{1i}^-} (a_\alpha - x_\alpha(t)) + \prod_{\beta \in \Gamma_{i2}^-} (a_\beta - x_\beta(t)) \right] = 0; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \right\}, \quad (1)$$

где $x_i(t)$ — переменная, характеризующая состояние выполнения операции взаимодействия D_i в момент времени t ; a_i — заданный объем выполнения указанной операции; $u_{ij}(t)$ — управляющее воздействие, принимающее значение 1, если операция взаимодействия D_i выполняет-

ся с использованием B_j ресурса (подсистемы) АСУ СлО, 0 — в противоположном случае; $\alpha \in \Gamma_{li}^-$, $\beta \in \Gamma_{2i}^-$ — множество номеров операций, непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией D_i с помощью логических операций „И“, „ИЛИ“ (альтернативное „ИЛИ“), T — интервал времени, на котором рассматривается функционирование АСУ СлО; t_0 , t_f — начальный и конечный моменты времени.

В работе [8] показано, что, по-разному интерпретируя компоненты вектора состояния операции взаимодействия D_i , а также вектора управляющих воздействий, можно с помощью модели (1) описать одновременно как операционные, так и потоковые процессы, параллельно-последовательно выполняемые в современных АСУ СлО.

В качестве примера дискретного описания модели вида (1) рассмотрим упрощенный вариант динамической интерпретации сети Петри с помощью дискретной динамической системы [10, 11]. Данные сети позволяют формально представить параллельно-последовательные разнотипные асинхронные процессы (как управленческие, так и информационные), происходящие в АСУ СлО. При этом новизна предлагаемого описания состоит в том, что оно имеет системно-управленческую интерпретацию, позволяющую (в отличие от традиционных подходов) уже корректно формулировать и решать с использованием сетей Петри широкий спектр управленческих задач. При указанной интерпретации сети Петри предполагается, что величина каждого i -го компонента вектора состояния дискретной динамической системы вида: $\mathbf{x}[l] = \|x_1[l], x_2[l], \dots, x_n[l]\|^T$, $l = 1, \dots, N$ (l — текущий номер шага, момент времени), численно равна суммарному числу меток в позиции p_i в исходной сети Петри, а каждому переходу t_j сопоставляется управляющее воздействие $u_j[l] \in \{0, 1\}$, принимающее значение 1, если переход t_j срабатывает на шаге l , и 0 — в противном случае. Кроме того, при срабатывании каждого разрешенного перехода перемещение меток из одной позиции в другую осуществляется не мгновенно, а с фиксированной длительностью (шагом). В этом случае уравнения, описывающие динамику смены маркировок в рассматриваемой сети Петри, могут быть заданы в виде следующих рекуррентных соотношений:

$$x_i[l] = x_i[l-1] + \sum_{\beta \in \Gamma_i^-} k_\beta u_\beta[l] - \sum_{\alpha \in \Gamma_i^+} k_\alpha u_\alpha[l], \quad (2)$$

где k_β , k_α — кратность ребер, соединяющих соответственно переходы t_j с позицией p_i и позицию p_i с переходами t_j ; Γ_i^- (Γ_i^+) — множество номеров входных (выходных) переходов позиции p_i . Наряду с (2) необходимо в дискретной динамической системе задать ограничения, описывающие структуру сети Петри, логику срабатывания переходов. Указанные ограничения могут быть представлены в следующем виде:

$$u_\alpha[l] \sum_{i \in I_\alpha} \prod_{\xi=k_i}^{s_i} (\xi - x_i[l-1]) = 0, \quad (3)$$

$$\sum_{\alpha \in \Gamma_i^+} k_\alpha u_\alpha[l] \leq x_i[l-1], \quad (4)$$

$$u_\alpha[l] \sum_{v \in J_\alpha} x_v[l-1] = 0, \quad (5)$$

где $s_i = \max x_i[l]$, $l = 1, \dots, N$ — максимально возможное число меток, которое может находиться в позиции p_i ; $I_i(J_i)$ — соответственно множество номеров входных позиций (выходных позиций со сдерживающими дугами) для перехода t_i . Наряду с (3)—(5) следует задать начальную и конечную (требуемую) маркировки сети Петри $\mathbf{x}[0]$, $\mathbf{x}[N]$; показатель качества функционирования сложных объектов $F = \sum_{l=1}^N g_l(\mathbf{x}[l-1], \mathbf{u}[l])$, где $g_l(\cdot, \cdot)$ — заданные функции.

Необходимо отметить, что предложенный подход к формализации процессов функционирования СлО применим, когда указанные процессы описываются разноцветными временными

сетями Петри. Основная особенность предлагаемой динамической интерпретации сетей Петри состоит в том, что необходимо таким образом задавать соотношения (2)–(5), чтобы обеспечивалась целочисленность значений компонентов вектора состояния и управлений в построенной дискретной динамической системе на каждом шаге $l = 1, \dots, N$.

Заключение. К настоящему времени на основе предложенного динамического описания естественного параллелизма информационных процессов и соответствующих процессов управления в АСУ СлО в непрерывной и дискретных формах удалось решить целый ряд важных научных и прикладных задач [12]. Анализ показывает, что разработанные алгоритмы поиска оптимальных расписаний и соответствующие планы функционирования средств можно использовать для поиска оптимальных правил срабатывания переходов в сетях Петри, оценивания достижимости заданной маркировки сети Петри [12]. С другой стороны, при решении разнообразных задач теории расписаний, задач структурно-функционального синтеза СлО, используя математический аппарат сетей Петри, можно конструктивно оценивать временную и емкостную сложность соответствующих алгоритмов оптимизации, выполнять поиск диспетчерских планов (первых приближений) в задачах оптимального программного управления комплексами операций [8, 9, 11, 12]. Кроме того, предложенный комплекс динамических моделей можно использовать для оценивания и выбора наилучших технологий системного моделирования заданного класса СлО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выхованец В. С., Яцукто А. В. Динамическое управление бизнес-процессами на основе совмещенных сетей управления и данных // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронное издание. 2013. № 2(14). С. 1—13.
2. Калянов Г. Н. Методология реорганизации бизнес-процессов предприятия // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. Спецвыпуск „Научные школы НУК РК МГТУ имени Н.Э. Баумана: школа профессора В. В. Емельянова“. С. 119—126.
3. Васильев С. Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления. 2001. Т. 40, № 1. С. 5—22; № 2. С. 5—21.
4. Жук К. Д., Тимченко А. А., Доленко Т. И. Исследование структур и моделирование логико-динамических систем. Киев: Наук. думка, 1975.
5. Зимин И. Н., Иванов Ю. П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // Журнал вычисл. математики и математической физики. 1971. № 3. С. 632—641.
6. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 488 с.
7. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 149—156.
8. Соколов Б. В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. М.: МО, 1992. 232 с.
9. Соколов Б. В., Калинин В. Н. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1985. № 5. С. 106—114.
10. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Пер. с англ. М. В. Горбатовой и др.; под ред. В. А. Горбатова. М.: Мир, 1984. 264 с.
11. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.
12. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

Сведения об авторах

Антон Юрьевич Баранов

— аспирант; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании
E-mail: yuiomer1337@gmail.com

- Михаил Александрович Булатов** — канд. техн. наук; Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета; помощник генерального директора; E-mail: ma_bulatov@mail.ru
- Александр Игоревич Семенов** — аспирант; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: alekssemyenov1996@gmail.com
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; главный научный сотрудник; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Поступила в редакцию 02.03.2023; одобрена после рецензирования 15.03.2023; принята к публикации 27.04.2023.

REFERENCES

1. Vykhovanets V.S., Yatsutko A.V. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*, 2013, no. 2(14), pp. 1–13. (in Russ.)
2. Kalyanov G.N. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, Special issue "Scientific schools of NUK RK MSTU: School of Professor V.V. Emelyanov", pp. 119–126. (in Russ.)
3. Vasil'ev S.N. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2001, no. 1(40), pp. 1–18; no. 2(40), pp. 169–185.
4. Zhuk K.D., Timchenko A.A., Dolenko T.I. *Issledovaniye struktur i modelirovaniye logiko-dinamicheskikh sistem* (Research of Structures and Modeling of Logical-Dynamic Systems), Kyiv, 1975. (in Russ.)
5. Zimin I.N., Ivanilov Yu.P. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1971, no. 3, pp. 632–641. (in Russ.)
6. Moiseev N.N. *Matematicheskiye zadachi sistemnogo analiza* (Mathematical Problems of System Analysis), Moscow, 1981, 488 p. (in Russ.)
7. Kalinin V.N., Sokolov B.V. *Journal of Computer and System Sciences International*, 1995, no. 1, pp. 149–156. (in Russ.)
8. Sokolov B.V. *Kompleksnoye planirovaniye operatsiy i upravleniye strukturami v ASU aktivnymi podvizhnymi ob'yektami* (Comprehensive Planning of Operations and Management of Structures in Automated Control Systems for Active Mobile Objects), Moscow, 1992, 232 p. (in Russ.)
9. Sokolov B.V., Kalinin V.N. *Automation and Remote Control*, 1985, no. 5, pp. 106–114. (in Russ.)
10. Peterson J.L. *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981, 290 p.
11. Kotov V.E. *Seti Petri* (Petri Nets), Moscow, 1984, 160 p. (in Russ.)
12. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)

Data on authors

- Anton Yu. Baranov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: yuioner1337@gmail.com
- Michael A. Bulatov** — PhD; JSC "Scientific and Engineering Center of St. Petersburg Electrotechnical University"; Assistant General Manager; E-mail: ma_bulatov@mail.ru
- Alexander I. Semenov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: alekssemyenov1996@gmail.com
- Boris V. Sokolov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: sokolov_boris@inbox.ru

Received 02.03.2023; approved after reviewing 15.03.2023; accepted for publication 27.04.2023.