

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ МНОГОЭТАПНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
В ВИДЕ СЕТИ ПЕТРИ

А.М. Корнеев, Т.В. Лаврухина, Т.А. Сметанникова, Л.К. Ерохин

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: рассматриваются вопросы описания многоэтапных производственных процессов иерархических итеративных сетей и сетей Петри. Отдельные стадии обработки представляются в виде клеток итеративной сети, характеризующихся набором входов, выходов и состояний. Для каждой клетки выполняется кодирование информации, формируются алфавиты входов, выходов и состояний. Рассмотрена иерархия клеток дискретной итеративной сети. Использование сетей Петри делает возможным моделировать взаимодействие алфавитов отдельных факторов и исследовать переходы из одного состояния в другое. Сочетания алфавитов рассматриваемых технологических параметров каждой клетки формируют позиции сети Петри, соответствующие описываемому этапу обработки. При моделировании можно представить сеть Петри, которая состоит из набора «слоев». Каждый из них содержит свой набор позиций и переходов и отражает завершение одного этапа и начало следующего. Поскольку обрабатывается статистическая информация, то следует добавить «слой», отвечающий за перемещение от исходных данных к данным первого этапа, и аналогичный – от второго этапа к выходным значениям. В общем виде каждый «слой» содержит сведения об очередном этапе процесса, которые разбиты на заданные наборы. Каждый набор представляет определенную позицию, в которой значение отражает долю данных, соответствующих ему. Из каждой позиции исходят стрелки в переходы, обозначающие наборы статистических данных следующего этапа производственного процесса. Количество указанных стрелок в каждый переход соответствует количеству зафиксированных процессов соответствующего набора очередного этапа, перешедших в определенный переходом набор следующего этапа. При исследовании сложных систем и выборе методов управления ими, учитываются функциональные связи между алфавитами факторов и выходных свойств. Описаны подходы моделирования сложных объектов с учетом иерархии клеток с использованием итеративных сетей и сетей Петри

Ключевые слова: сеть Петри, дискретные итеративные сети, иерархия клеток, алфавиты факторов, клетка итеративной цепи, параметры сети Петри

Введение

Важным этапом моделирования сложных производственных систем является создание функциональных блоков, описывающих отдельные стадии обработки. Отдельный блок представляется в виде клетки итеративной сети, характеризующейся набором входов, выходов и состояний. Исследуемый сложный производственный процесс представляется в виде набора отдельных клеток. Далее анализируются условия взаимодействия клеток между собой. При моделировании сложных технологических процессов формируется итеративная сеть, включающая иерархию клеток, соответствующих отдельным стадиям обработки [1-3]. Для каждой клетки выполняется кодирование информации, формируются алфавиты входов, выходов и состояний.

Теория вопроса

Любая стадия обработки (клетка итеративной цепи k_s) содержит заданный набор величин $x(k_s, t, l_{k_s})$, где $l_{k_s} = 1_{k_s}, \dots, L_{k_s}$; L_{k_s} — общее число факторов, описываемых на стадии обработки k_s .

Для исследуемых величин создаются алфавиты. Диапазон изменения технологической величины l_{k_s} определенной клетки k_s , входящей в состав внутренней цепи и отражающий единицу времени t , подразделяется на набор отрезков, отражающих элементы алфавитов факторов):

$$b(k_s, l_{k_s}, 1_{l_{k_s}}, t), b(k_s, l_{k_s}, 2_{l_{k_s}}, t), \dots, b(k_s, l_{k_s}, j_{l_{k_s}}, t), \dots, b(k_s, l_{k_s}, J_{l_{k_s}}, t), \quad (1)$$

где $j_{l_{k_s}} = 1_{l_{k_s}}, \dots, J_{l_{k_s}}$ — отрезки, составляющие алфавит фактора;

$J_{l_{k_s}}$ — размер алфавита l_{k_s} -го входа исследуемой цепи.

Элементы наборов алфавитов технологических величин $x(k_s, t, l_{k_s})$ клетки k_s в момент времени t :

$$\chi\beta(k_s, t) = b(k_s, 1_{k_s}, j_{1_{k_s}}, t), \dots, b(k_s, l_{k_s}, j_{l_{k_s}}, t), \dots, b(k_s, L_{k_s}, j_{L_{k_s}}, t). \quad (2)$$

Использование сетей Петри делает возможным моделировать взаимодействие алфавитов отдельных факторов и исследовать переходы из одного состояния в другое [4-6]. Иерархия клеток дискретной итеративной сети приведена на рис. 1.

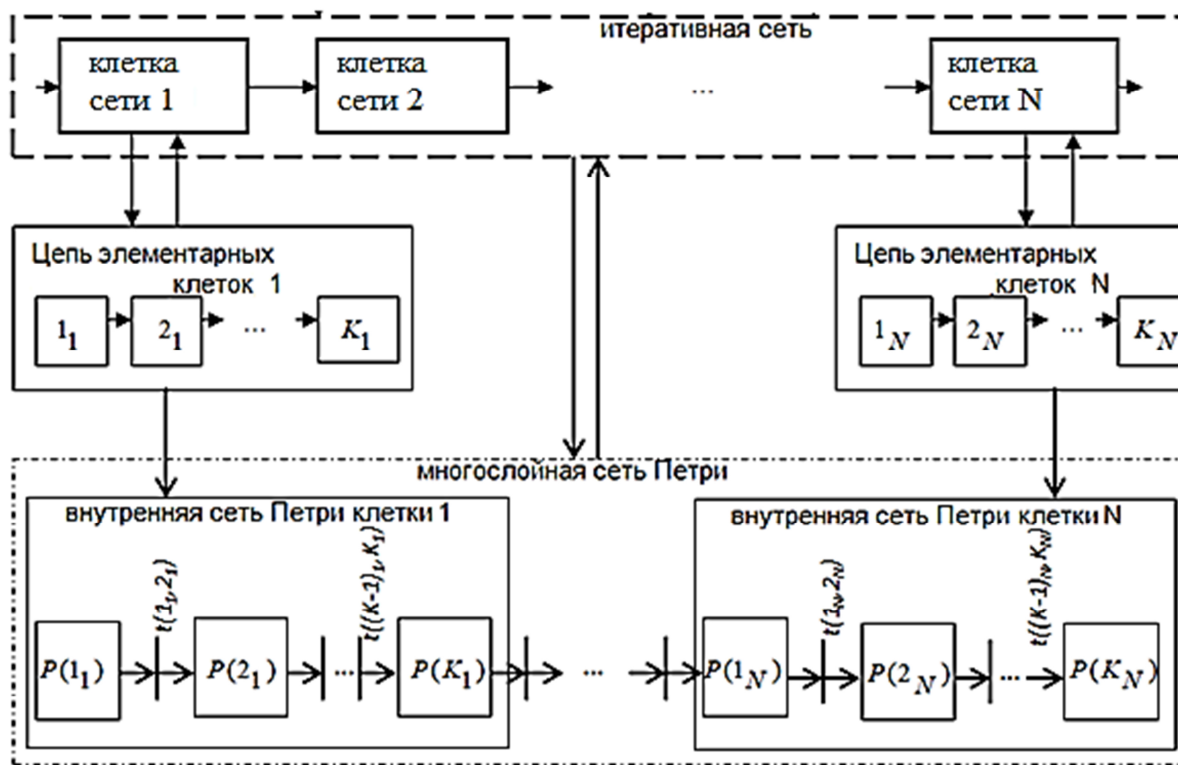


Рис. 1. Иерархия клеток дискретной итеративной сети сложного производственного процесса

Для исследования сети Петри формируется определенное множество позиций $P = (P_{1_s}, P_{k_s}, \dots, P_{K_s})$ [7-9]. Любое состояние P_{k_s} сети Петри описывается формируемым набором атрибутов $P\{K_s, \chi_\beta(k_s, t)\}$.

Сочетания алфавитов $\chi_\beta(k_s, t)$ рассматриваемых технологических параметров $x(k_s, t, l_{k_s})$ каждой клетки формируют позиции сети Петри, соответствующие описываемому этапу обработки

$$P_{k_s} = P(k_s, \chi_1), \dots, P(k_s, \chi_\beta, \dots, P(k_s, \chi_B)). \quad (3)$$

Число позиций каждой клетки цепи

$$B = \{\chi_\beta(k_s, t), \beta = 1, \dots, B, B = \prod_{l_{k_s}=1}^{L_{k_s}} J_{l_{k_s}}\}. \quad (4)$$

Пример перехода между отдельными переделами изображен на рис. 2.

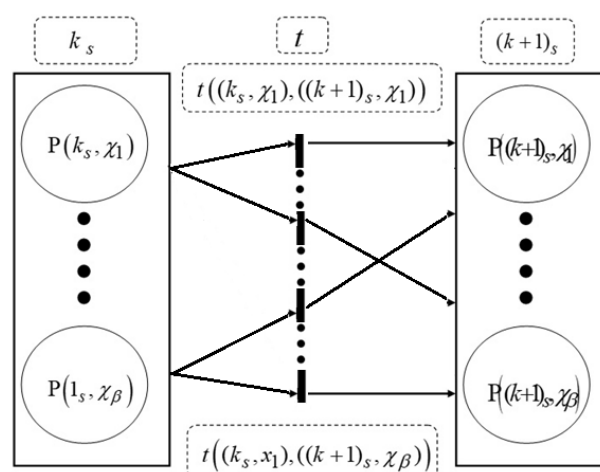


Рис. 2. Иерархия клеток дискретной итеративной сети сложного производственного процесса

Переход описывается в виде $t((K_s, \chi_1), ((k+1)_s, \chi_\beta))$, где K – номер передела.

Позиции выступают в виде сочетания алфавитов, относящихся к исследуемому переделу. Пример значений позиций представлен на рис. 3.

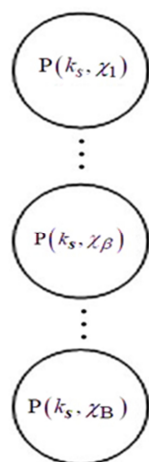


Рис. 3. Пример описания позиций

Методика проведения эксперимента

Имеющиеся входные данные были разбиты на три набора для каждого этапа. Разбиение осуществлялось следующим образом. Имеющийся набор параметров $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$, были представлены каждый как наборы чисел в определённом диапазоне. Что бы разбить на наборы данные, были найдены *Min* и *Max*, а их разность, взятая по модулю, была поделена на 3, таким образом была получена длина d для каждого диапазона в каждом наборе чисел.

$$d = |Min(x1) - Max(x1)| / 3$$

Данные от *Min* до *Min*+ d получали значение 0.

Данные от *Min*+ d до *Min*+ $2d$ получали значение 1.

Данные от *Min*+ $2d$ до *Max* получали значение 2.

Столбцы с данными были взяты попарно: X_1X_2, X_3X_4, X_5X_6 , были получены следующие наборы: 00, 01, 02, 11, 22, 10, 20, 12, 21.

Пример переходов из позиций одного этапа обработки в другой приведен в табл. 1. В ней отражено количество меток каждого сочетания

алфавитов и их переход в метки сочетаний следующего набора позиций.

Таблица 1

Пример переходов из позиций одного этапа обработки в другой

Вход P1	Сумма переходов	Вход в набор (P2)	Кол-во переходов, P2
P1,0 1	51	T00	8
		T10	22
		T20	14
		T12	1
		T11	4
		T01	2
P1,1 0	10	T00	8
		T20	2
P1,1 1	218	T10	75
		T20	68
		T00	70
		T01	4
		T11	1
P1,1 2	124	T10	29
		T00	26
		T20	68
		T21	1
P1,2 1	39	T10	18
		T20	6
		T00	12
		T11	1
		T01	2
P1,2 2	48	T20	16
		T10	26
		T00	6
P1,0 2	14	T00	5
		T20	2
		T10	7

Переходы из определенной позиции приведены на рис. 4.

Аналогичный переход из набора позиций второго уровня в третий приведен в табл. 2.

При моделировании можно представить сеть Петри, которая состоит из набора «слоев». Каждый из них содержит свой набор позиций и переходов и отражает завершение одного этапа и начало следующего. Поскольку обрабатывается статистическая информация, то следует добавить «слой», отвечающий за перемещение от исходных данных к данным первого этапа, и аналогичный – от второго этапа к выходным значениям. Таким образом, сеть Петри будет состоять из четырёх «слоев» схожей структуры.

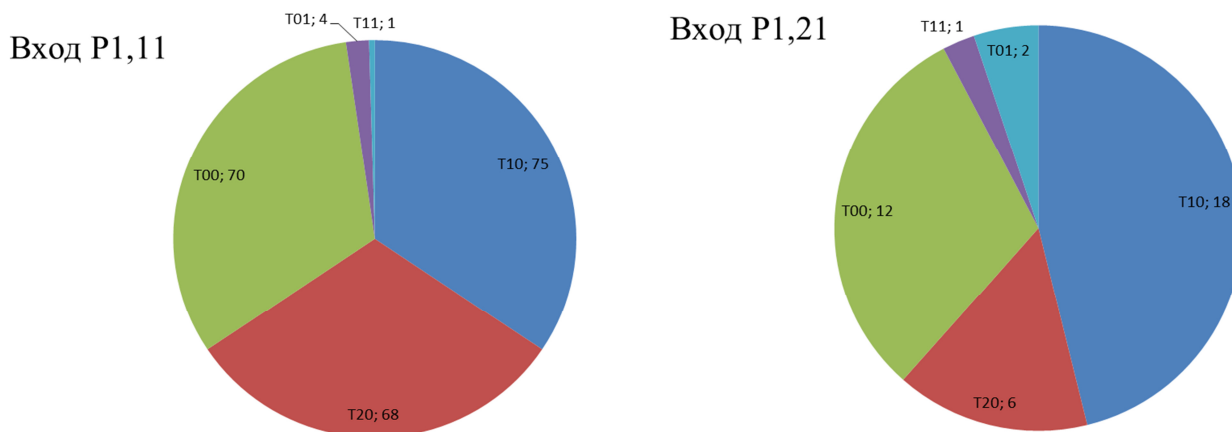


Рис. 4. Переходы из наборов входных значений в наборы выходных значений

Таблица 2
Пример переходов из позиций второго уровня в третий

Вход P2	Сумма переходов	Вход в набор (P3)	Кол-во переходов, P3
P2,00	135	T11	13
		T21	65
		T20	22
		T12	23
		T22	4
		T02	2
		T10	6
P2,01	8	T10	2
		T11	1
		T20	1
		T21	4
P2,10	177	T12	32
		T11	40
		T21	80
		T20	10
		T22	9
		T10	6
P2,11	6	T11	1
		T21	1
		T20	4
P2,12	1	T21	1
P2,20	176	T21	67
		T20	18
		T12	19
		T11	62
		T22	3
P2,21	1	T10	7
		T21	1

В общем виде каждый «слой» содержит сведения об очередном этапе процесса, где све-

дения об очередном этапе процесса разбиты на n наборов. Каждый набор представляет определенную позицию, в которой значение отражает долю данных, соответствующих ему. Из каждой позиции исходят стрелки в k переходов, обозначающих наборы статистических данных следующего этапа производственного процесса. Количество указанных стрелок в каждый переход соответствует количеству зафиксированных процессов соответствующего набора очередного этапа, перешедших в определённый переходом набор следующего этапа.

Обозначения в данной сети Петри:

- В нулевом слое:
 - начальную позицию P0.
- переходы T1,01, T1,10, T1,11, T1,12, T1,21, T1,22, T1,02;
- В первом слое:
 - входные позиции P1,01, P1,10, P1,11, P1,12, P1,21, P1,22, P1,02;
 - переходы T2,00, T2,01, T2,02, T2,10, T2,11, T2,12, T2,20, T2,21;
- Во втором слое:
 - входные позиции P2,00, P2,01, P2,10, P2,11, P2,12, P2,20, P2,21;
 - переходы T3,02, T3,10, T3,11, T3,12, T3,20, T3,21, T3,22;
- В третьем слое:
 - входные позиции P3,02, P3,10, P3,11, P3,12, P3,20, P3,21, P3,22;

Рассмотрены участки сети Петри, показывающие количество переходов наблюдаемых данных от одного этапа к другому по разным наборам, соответствующие табл. 2. Так же на рисунках видно сколько всего переходов в P2 (1Этап) по каждому набору. На рис. 5 представлена описываемая сеть Петри сложного производственного процесса.

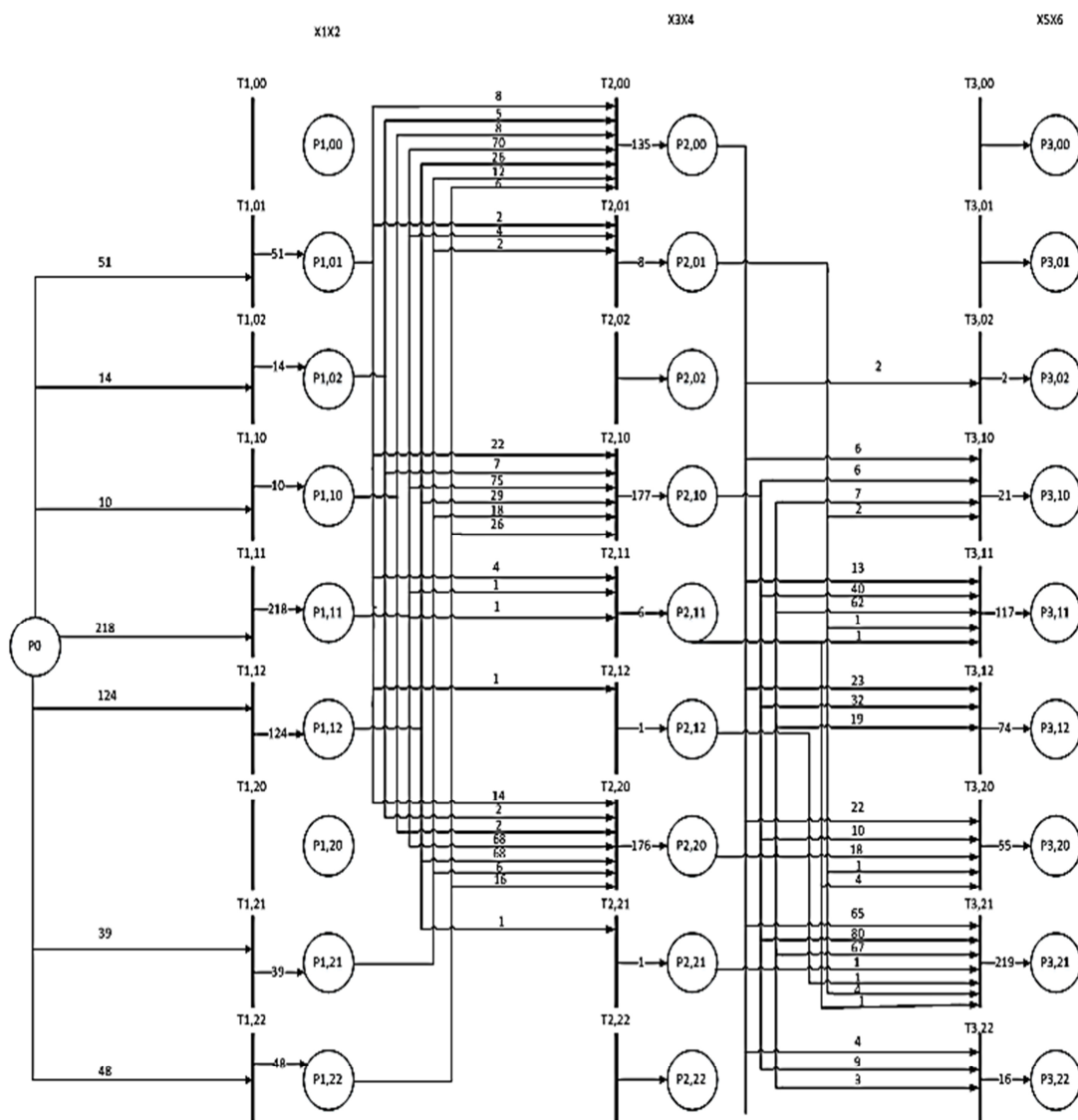


Рис. 5. Сеть Петри сложного производственного процесса

Обсуждение результатов

Анализ сложных технологических процессов показал, что выбранные технологические цепочки удобно моделировать с применением иерархических сетей Петри. В работе рассмотрены подходы формирования алфавитов технологических величин, формирующих позиции и переходы многослойных сетей Петри. Каждая рассматриваемая стадия реализации многоэтапного технологического процесса включает ряд операций, характеризующихся наличием определенного набора реализуемых технологических факторов.

Разрабатываемая иерархическая сеть Петри учитывает особенности клеток и алфавитов случайных величин соответствующей итеративной сети. Это дает возможность формировать вложенные сети Петри, которые модели-

руют процесс функционирования каждой стадии обработки. Применяя данный подход к многостадийному производственному процессу, иерархия дает возможность учесть сложность выполняемых переходов между выбранными слоями состояний, которые соответствуют определенным переделам.

Заключение

При исследовании сложных систем и выборе методов управления ими, учитываются функциональные связи между алфавитами факторов и выходных свойств. Описаны подходы моделирования сложных объектов с учетом иерархии клеток с использованием итеративных сетей и сетей Петри.

Целью применения итеративных сетей Петри является совершенствование процессов

моделирования и управления режимами функционирования сложных производственных систем.

Предлагаемый метод характеризуется применением клеточной интерпретации исследуемых процессов и дает возможность представлять сложные многостадийные системы в виде иерархии клеток. Анализируемые режимы функционирования описываются в виде сочетаний алфавитов рассматриваемых технологических параметров, которые каждой клетке формируют позиции сети Петри, соответствующие описываемому этапу обработки.

При моделировании рассматривается сеть Петри, которая состоит из набора «слоев». Каждый из них содержит свой набор позиций и переходов и отражает завершение одного этапа и начало следующего.

В результате приведен пример моделирования сложной производственной системы с использованием сетей Петри.

В итоге, использование дискретных итеративных сетей и сетей Петри дает возможность находить оптимальные режимы функционирования и анализировать динамику их коррекции.

Литература

1. Identification of complex production systems with using iterative networks / A.M. Korneev, L.S. Abdullakh, A.B. Sukhanov, S.D. Antar, Kh.M. Al-jonid // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7(3.5). Pp. 37-39.

2. Automated control system functions for complex structured technological processes / A.M. Korneev, T.A. Smetannikova, T.V. Lavrukhhina, F.A. Al-Saeedi // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1155, III International Scientific Conference: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP-III 2021), Krasnoyarsk, Russian Federation. Mater. Sci. Eng. 1155 012048.

3. Blocks of cell-hierarchical identification and optimization of complex spatially distributed production systems / A. Korneev, T. Lavrukhhina, T. Smetannikova, M. Pantyushin // Proceedings - 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2023. Pp. 664-668.

4. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри и моделирование распределенных систем. Москва: Наука. Физматлит, 2004. С. 337-352.

5. Блюмин С.Л., Шмырин А.М., Седых И.А. Сети Петри с переменной недетерминированностью как окрестностные системы // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3. 2 (33). С. 228-233.

6. Kuzmuk V.V., Supronenko O.O. Modified Petri net and parallel process simulation device. K.: Maklout, 2010. 260 p.

7. Седых И.А., Стеганцев Н.В. Моделирование цементного производства на основе систем массового обслуживания с использованием GPSS // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2016. № 3 (29). С. 28-33.

8. Седых И.А., Анисеев Е.С. Применение раскрашенных временных сетей Петри для моделирования цементного производства // Вестник Донского государственного технического университета. Ростов-на-Дону, 2016. № 4(87). С. 140-145.

9. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ систем с распределенной структурой. М.: Научный мир, 2004. 208 с.

Поступила 19.04.2024; принята к публикации 03.09.2024

Информация об авторах

Корнеев Андрей Матиславович — д-р техн. наук, профессор кафедры общей механики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: weenrok@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3829-9709

Лаврухина Тамара Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: lavrukhhina_tv@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0677-4501

Сметанникова Татьяна Андреевна — канд. техн. наук, доцент кафедры дизайна и художественной обработки материалов, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: aveenrok@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0821-8034

Ерохин Лев Константинович — аспирант кафедры общей механики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: erokhin.lk@gmail.com

MODELING A MULTISTAGE TECHNOLOGICAL PROCESS IN THE FORM OF A PETRI NET

A.M. Korneev, T.V. Lavrukhhina, T.A. Smetannikova, L.K. Erokhin

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: the issues of description of multistage production processes of hierarchical iterative networks and Petri nets are considered. Separate processing stages are represented as cells of an iterative network characterized by a set of inputs, outputs and states. For each cell information coding is performed, alphabets of inputs, outputs and states are formed. The paper

considers the hierarchy of cells of a discrete iterative network. The use of Petri nets makes it possible to model the interaction of alphabets of individual factors and to study transitions from one state to another. Combinations of alphabets of considered technological parameters of each cell form Petri net positions corresponding to the described processing stage. In modeling it is possible to present a Petri net, which consists of a set of "layers". Each of them contains its own set of positions and transitions and reflects the completion of one stage and the beginning of the next. Since statistical information is processed, a "layer" should be added, which is responsible for moving from the input data to the data of the first stage, and a similar one - from the second stage to the output values. In general, each "layer" contains information about the next step of the process, where information about the next step of the process is divided into given sets. Each set represents a certain position, where the value reflects the fraction of data corresponding to it. From each position there are arrows to the transitions, indicating sets of statistical data of the next stage of the production process. The number of indicated arrows to each transition corresponds to the number of fixed processes of the corresponding set of the next stage that have passed to the set of the next stage defined by the transition. In the study of complex systems and the choice of methods for their control, functional relations between alphabets of factors and output properties are taken into account. Approaches of modeling complex objects taking into account the hierarchy of cells using iterative networks and Petri nets are described

Key words: Petri net, discrete iterative networks, cell hierarchy, alphabets of factors, cell of iterative chain, Petri net parameters

References

1. Korneev A.M., Abdullakh L.S., Sukhanov A.B., Antar S.D., Al-jonid Kh.M. "Identification of complex production systems with using iterative networks", *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7 (3.5), pp. 37-39.
2. Korneev A.M., Smetannikova T.A., Lavrukhina T.V., Al-Saeedi F.A. "Automated control system functions for complex structured technological processes", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1155, III International Scientific Conference: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP-III 2021), Krasnoyarsk, Russian Federation. Mater. Sci. Eng. 1155 012048 DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012048.
3. Korneev A., Lavrukhina T., Smetannikova T., Pantyushin M. "Blocks of cell-hierarchical identification and optimization of complex spatially distributed production systems", *proc. of the 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA*, 2023, pp. 664–668.
4. Lomazova I.A. "Nested Petri nets and modeling of distributed systems" ("Vlozhennyye seti Petri i modelirovaniye raspredelennykh system"), Moscow, Nauka. Fizmatlit, 2004, pp. 337–352.
5. Blyumin S.L., Shmyrin A.M., Sedykh I.A. "Petri nets with variable non-determinism as neighborhood systems", *Control systems and information technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2008, no. 3. 2 (33), pp. 228-233
6. Kuzmuk V.V., Supronenko O.O. "Modified Petri net and parallel process simulation device", Kiev, Maklout, 2010, 260p.
7. Sedykh I.A., Stegantsev N.V. "Modeling of cement production based on queuing systems using GPSS", *The Bulletin of the Lipetsk State Technical University (Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, no. 3 (29), 2016, pp. 28-33.
8. Sedykh I.A., Anikeev E.S. "Application of colored temporary Petri nets for modeling cement production", *The Bulletin of the Don State Technical University (Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, no. 4 (87), pp. 140-145.
9. Lomazova I.A. "Nested Petri nets: modeling and analysis of systems with a distributed structure" ("Vlozhennyye seti Petri: modelirovaniye i analiz sistem s raspredelennoy strukturoy"), Moscow, Nauchnyy mir, 2004, 208 p.

Submitted 19.04.2024; revised 03.09.2024

Information about the authors

Andrey M. Korneev – Cand. Sc. (Technical), Professor, Department of Theoretical Mechanics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk 398055, Russia), e-mail: weenrok@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3829-9709

Tamara V. Lavrukhina - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Automated Control Systems, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk 398055, Russia), e-mail: lavrukhina_tv@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0677-4501

Tatyana A. Smetannikova - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Design and Artistic Processing of Materials, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk 398055, Russia), e-mail: korneeva@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0821-8034

Lev K. Erokhin – Postgraduate Student, the Department of General Mechanics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk 398055, Russia), e-mail: erokhin.lk@gmail.com