

УДК 62-5

DOI 10.47367/0021-3497\_2024\_3\_207

**ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ  
ПРИ ЦИКЛОГРАММИРОВАНИИ МАШИН-АВТОМАТОВ**

**APPLICATION OF PETRI NETS  
IN THE CYCLOGRAMMING OF AUTOMATIC MACHINES**

*Е.Н. ХОЗИНА, Л. АЛЬВАРИ, П.А. КОРОЛЕВ, О.С. ЖУРАВЛЕВА*

*E.N. KHOZINA, L. ALWAARI, P.A. KOROLEV, O.S. ZHURAVLEVA*

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(The Kosygin State University of Russia)

E-mail: zhuravleva-os@rguk.ru

*В статье приводятся результаты теоретического исследования возможности применения нестандартных методов при циклограммировании машин-автоматов. Приведена классификация существующих методов циклограммирования. На основании анализа особенностей структуры и построения так называемых сетей Петри, а также оценки их преимуществ и недостатков предложено их использование при циклограммировании сложных систем машин-автоматов. Для ткацкой машины с малогабаритными прокладчиками утка разработана цикловая диаграмма механизмов, участвующих в прокладывании уточной нити, выполненная на базе простой сети Петри с помощью специализированного программного инструмента CPN Tools. Полученная цикловая диаграмма может быть полезна при моделировании и анализе технологического процесса прокладывания утка, а также синтезе, структурировании, оптимизации, визуализации и возможности цифровизации всего процесса ткачества. Осуществлен сравнительный анализ традиционного метода циклограммирования и моделирования цикловых диаграмм посредством применения сетей Петри, позволивший выявить высокую степень универсальности, информативность и наглядность последнего, что подтверждает возможность его применения при циклограммировании сложных систем машин-автоматов.*

*The article presents the results of the theoretical study of the possibility of using non-standard methods in the automatic machines cyclogramming. The classification of the existing methods of cyclogramming is given. Based on an analysis of the structural features and construction of the so-called Petri nets, as well as an assessment of their advantages and disadvantages, their use in cyclogramming complex systems of automatic machines is proposed. For a weaving machine with small-sized*

*weft inserters, a cyclic diagram of the mechanisms involved in laying the weft thread has been developed, made on the basis of a simple Petri net using a specialized software tool CPN Tools. The resulting cyclic diagram can be useful in modeling and analyzing of the technological process of weft inserting, as well as synthesis, structuring, optimization, visualization and the possibility of digitalization of the weaving process. A comparative analysis of the traditional method of cycloprogramming and modeling of cyclic diagrams through the use of Petri nets has been carried out, which made it possible to identify a high degree of versatility, information content and clarity of the latter, which confirms the possibility of its use in cycloprogramming complex systems of automatic machines.*

**Ключевые слова:** цикловая диаграмма, метод циклограммирования, граф, сеть Петри, условие (позиция), событие (переход), специализированное программное обеспечение CPN Tools, механизмы прокладывания уточной нити.

**Keywords:** cyclic diagram, method of cycloprogramming, graph, Petri net, condition (position), event (transition), specialized software CPN Tools, weft insertion system.

### *Введение*

Современные производства в настоящее время оснащены цикловыми машинами-автоматами и широко их используют. Это и автоматические швейные машины, и некоторые упаковочные автоматы, и различные ткацкие станки. В цикловых машинах-автоматах за определенный период времени осуществляется полный комплекс технологических работ и процессов, причем по окончании этого периода все узлы и механизмы машины возвращаются в точно такое же положение, в котором они находились в начале цикла [1].

Цикловые машины-автоматы представляют собой достаточно сложные технические системы, работа которых основана на четком взаимодействии составляющих их механизмов друг с другом. Это взаимодействие достигается за счет использования цикловых диаграмм (ЦД), т. е. конструкторских документов, отображающих характер взаимодействия, продолжительность и соотношение в пределах определенного временного интервала рабочих ходов, холостых ходов и выстоев исполнительных звеньев механизмов машины при выполнении ею заданных технологических функций [2, 3]. Цикловые диаграммы применяются для анализа требуемой синхрониза-

ции перемещений рабочих звеньев механизмов и оценки возможности полного или частичного совмещения технологических операций с целью сокращения продолжительности цикла и улучшения технико-экономических параметров машины-автомата.

Современная классификация цикловых диаграмм [1] выделяет пять основных классификационных признаков: внешний вид ЦД (форма их представления); способ реализации ЦД (принцип построения ЦД); вид цикла; метод моделирования ЦД (метод циклограммирования); цель разработки ЦД. Среди перечисленных признаков можно выделить метод моделирования ЦД, представляющий собой определенный набор инструментов и методик, с помощью которых синтезируются, анализируются и оптимизируются ЦД машин-автоматов.

### *Методы*

До настоящего времени при проектировании и модернизации машин-автоматов использовались в основном традиционные методы. Примером применения традиционных методов при моделировании ЦД может служить построение ЦД механизмов, участвующих в прокладывании утка на бесчелночных ткацких машинах типа СТБУ (рис. 1), относящихся к группе цикловых машин-автоматов. На рис. 1 циф-

рами от 1 до 8 обозначены следующие механизмы: 1 – торсионный боевой механизм; 2 – раскрыватель пружины прокладчика утка; 3 – возвратчик уточной нити; 4 – раскрыватель пружины возвратчика утка; 5 – подъемник прокладчиков утка; 6 – компенсатор утка; 7 – тормоз утка; 8 – зевобразовательный механизм.

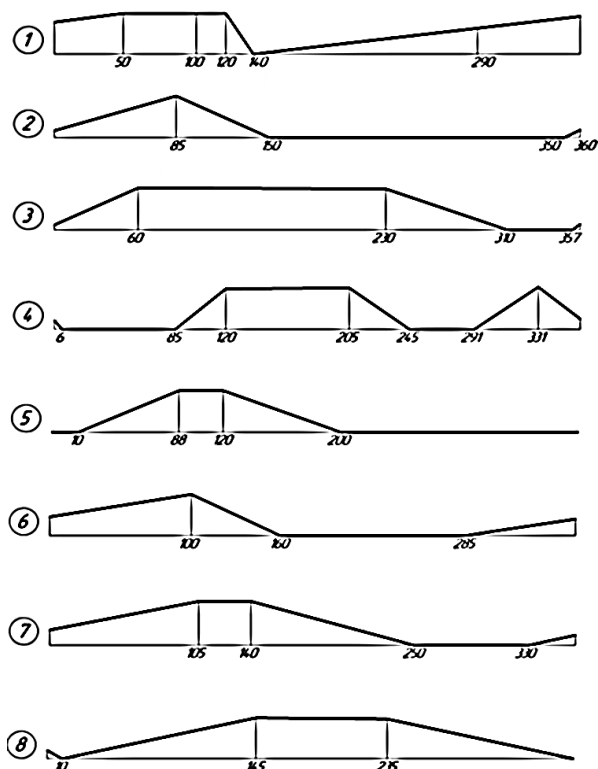


Рис. 1

На традиционной ЦД с помощью прямых и наклонных линий показываются перемещения и выстой механизмов, а также значения углов поворота распределительного вала, соответствующие заданным движениям. К недостаткам таких ЦД следует отнести отсутствие визуализации взаимодействия механизмов друг с другом, что является серьезным препятствием для их оптимизации.

Проведенное аналитическое исследование научно-технических источников [1, 4...7] показало возможность использования для циклограммирования не только традиционных методов, но и таких, как сетевой, векторный и метод ориентированных графов. Их использование при циклограммировании позволит исключить указанные

выше недостатки традиционной ЦД. Обобщенная классификация методов циклограммирования представлена на рис. 2.

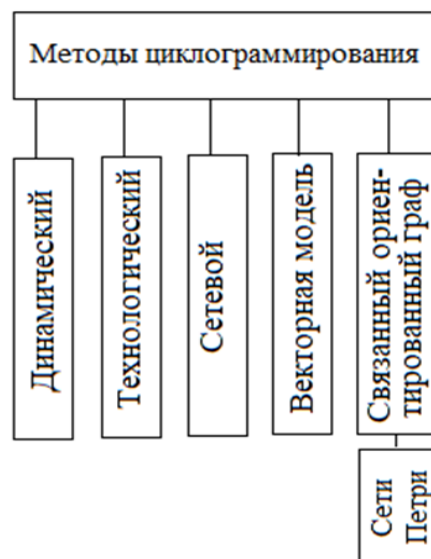


Рис. 2

Перспективным направлением в циклограммировании сложного технологического оборудования является построение ЦД на основе использования так называемых сетей Петри, отличающихся возможностью моделирования параллельных и недетерминированных процессов и наглядностью представления взаимодействия механизмов в сложной технологической системе.

Сети Петри можно считать частным случаем ориентированного графа, отличительными особенностями которого являются его двудольность и направленность [7, 8]. Двудольность сетей Петри проявляется в том, что они характеризуются наличием двух типов вершин – позиций и переходов, причем дуги не могут соединять вершины одного типа, а направленность – тем, что каждая дуга направлена от элемента одного множества (позиций или переходов) к элементу другого множества (переходов или позиций). Таким образом, сети Петри представляют собой двудольный ориентированный (бихроматический) мультиграф, основные элементы которого изображены на рис. 3.

Графически сети Петри изображаются с помощью кружков, палочек и стрелок, где

кружки обозначают условия (позиции), полочки – события (переходы), а стрелки (дуги) соединяют условия и события. Направленные дуги могут соединять только условия с событиями, а события с условиями, т. е. каждая позиция может быть входной или выходной для одного или нескольких переходов.

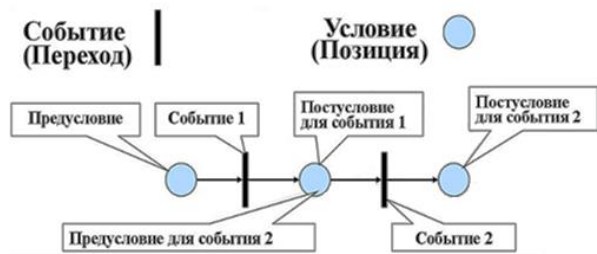


Рис. 3

Математически сеть Петри можно представить в виде:

$$N = (P, T, F, m_i), \quad (1)$$

где  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  – множество мест (условий, позиций);  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  – множество переходов (событий);  $F$  – отношение инцидентности;  $m_i$  – маркировка, т. е. размещение меток в местах сети Петри.

Следует отметить, что множества  $P$  и  $T$  находятся в отношении непересечения, т. е.

$$P \cap T = \emptyset, \quad (2)$$

а  $F$  является подмножеством объединения декартовых произведений множеств  $P$  и  $T$ , т. е.

$$F \subseteq P \times T \cup T \times P. \quad (3)$$

Существует множество разновидностей сетей Петри, однако все они являются лишь различными модификациями простых сетей Петри, среди главных преимуществ которых – наименьшее количество элементов, простота построения, универсальность, а также возможность осуществления с их помощью цифровизации процесса циклограммирования. Сети Петри идеально подходят

для моделирования сложных систем, в которых несколько процессов осуществляются одновременно [9]. Все это позволяет использовать сети Петри для циклограммирования машин-автоматов.

#### Результаты и обсуждения

Рассмотрим применение сетей Петри для моделирования ЦД механизмов, участвующих в прокладывании утка на бесчелночных ткацких машинах типа СТБУ, традиционная ЦД которых представлена выше (см. рис. 1). Для построения модели ЦД с помощью сетей Петри будем использовать специализированное программное обеспечение CPN Tools.

CPN Tools (Timed Coloured Petri Nets) – это инструмент, широко используемый при построении сетей Петри. Он предоставляет развитую среду для построения, моделирования и выполнения анализа моделей CPN и состоит из симулятора CPN на основе машинного обучения (внутренняя часть) и редактора CPN (интерфейсная часть), который разработан на языке программирования БЭТА с использованием системы разработки Mjølner [10, 11].

На рис. 4 приведена ЦД группы механизмов прокладывания уточной нити, выполненная с помощью сетей Петри в среде CPN Tools. На ней в кружках буквами  $p_i$  обозначены условия (в листинге программы обозначается словом «string»), выполнение которых требуется для достижения событий  $t_j$ , представленных в виде квадратов. Полученная сеть Петри содержит 9 мест  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_9\}$  и 5 переходов  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_5\}$ .

На рис. 4 использованы следующие обозначения:  $p_1$  – движение раскрывателя пружины прокладчика;  $p_2$  – движение возвратчика утка с нитью к прокладчику утка;  $p_3$  – подъем прокладчика;  $p_4$  – подъем ремизных рам;  $p_5$  – конец подъема раскрывателя пружины прокладчика;  $p_6$  – прокладчик на линии боя;  $p_7$  – движение вперед раскрывателя пружины возвратчика утка;  $p_8$  – полное первое раскрытие пружины возвратчика утка;  $p_9$  – полет прокладчика утка через зев;  $t_1$  – полное раскрытие пружины прокладчика;  $t_2$  – касание прокладчиком упора;  $t_3$  – встреча возвратчика утка и прокладчика

утка;  $t_4$  – начало первого раскрытия пружины возвратчика;  $t_5$  – бой. Для маркировки сети применяются зеленые кружки с

цифрой внутри, означающей количество меток в позициях сети Петри.

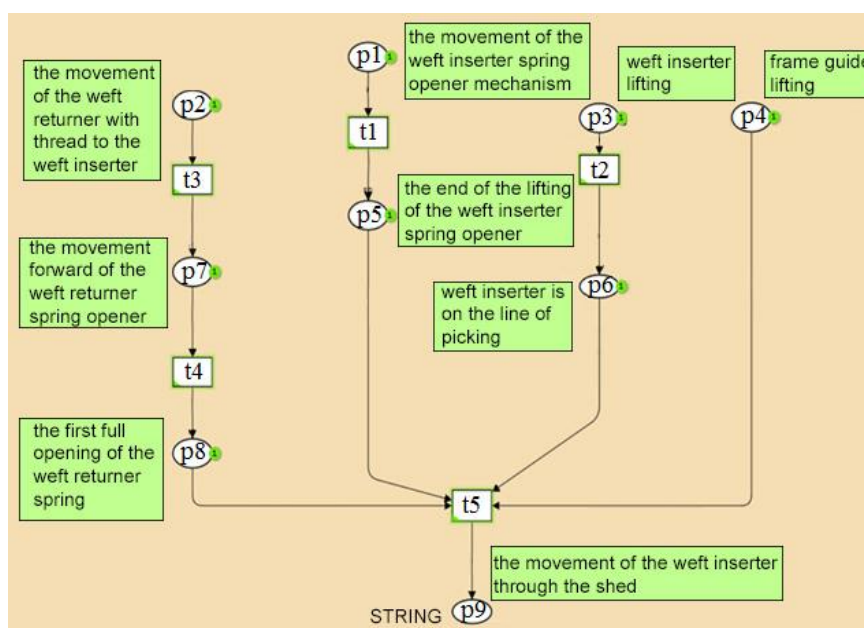


Рис. 4

Полученная с помощью сетей Петри ЦД может быть полезна при моделировании и анализе технологического процесса прокладывания утка, а также структурировании и визуализации всего процесса ткачества. Кроме того, сети Петри позволяют наглядно оценить характер и эффективность взаимодействия механизмов друг с другом и выявить возможность оптимизации ЦД за счет ее уплотнения, что приведет к сокращению длительности технологического цикла и улучшению технико-экономических параметров машин-автоматов.

Сравнительный анализ традиционного метода циклограммирования и сетей Петри позволяет сделать вывод о том, что последний является более универсальным и простым с точки зрения построения методом. Циклограммирование машин-автоматов с применением сетей Петри позволяет наглядно отображать характер взаимодействия механизмов внутри сложной системы, учитывать такие важные аспекты проектирования механизмов, как точность их изготовления и работы, а также пригоден для обработки с помощью ЭВМ, что значительно ускоряет процесс моделирования ЦД. Однако сети Петри не показывают

временные взаимодействия между механизмами, что ограничивает их использование при циклограммировании цикловых машин-автоматов.

## ВЫВОДЫ

1. Выявлена возможность использования сетей Петри при моделировании цикловых диаграмм машин-автоматов различного назначения.
2. Проведен сравнительный анализ традиционных методов циклограммирования и моделирования цикловых диаграмм с помощью простых сетей Петри.
3. На примере построения цикловой диаграммы механизмов ткацкой машины оценены преимущества и недостатки применения сетей Петри при циклограммировании машин-автоматов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хозина Е.Н., Журавлева О.С., Альвари Л., Зиёдуллоев Н.Н. Классификация цикловых диаграмм машин-автоматов // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2022): сб-к матер. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. С. 286...290.

2. Антонов В.С., Антонов В.В. Общие вопросы синтеза цикловых диаграмм работы ткацких машин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 6. С. 90...93.

3. Лапхи Д.И. Использование цикловой диаграммы для формирования исходных данных при построении параметрической модели ткацкой машины // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2014. № 3. С. 80...83.

4. Джомартов А.А., Уалиев Г. Математическая модель движения машины-автомата совместно с циклограммой механизмов // Проблемы механики современных машин. 2012. Т. 2. С. 143...156.

5. Graph-based modelling in engineering / ed. by S. Zawislak, J. Rysinski. Switzerland: Springer International Publ, 2017. 247 p. (Mechanisms and Machine Science; vol. 42). – ISBN 978-3-319-39018-5. – ISBN 978-3-319-39020-8. – doi:10.1007/978-3-319-39020-8.

6. Jomartov A.A. Multi-objective optimization of cyclogram mechanisms machine-automaton // Proceedings of the World Congress on Engineering WSE 2011, London, U.K., 6–8 July 2011. London, 2011. Vol. 3.

7. Шмырин А.М., Седых И.А. Нечеткие по состояниям и структуре сети Петри как разновидность окрестностных систем // Информационные технологии моделирования и управления. Вып. 5. Воронеж: Научная книга, 2008. С. 553...558.

8. Application and Theory of Petry Nets and Concurrency // 34th International Conference, PETRINETs, Milan, Italy. 2013. 420 p.

9. Кудж С.А., Логинова А.С. Моделирование с использованием сетей Петри // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015, №1 (6). С. 10...22.

10. <https://cpnide.org/>

11. Carrasquel J.C., Morales A., Villapol M.E. Prosega / CPN: An extension of CPN Tools for Automata-based Analysis and System Verification. Trudy ISP RAN / Proc. ISP RAS. Vol. 30, issue 4, 2018. P. 107...128.

## REFERENCES

1. Khozina E.N., Zhuravleva O.S., Alwaari L., Ziedullov N.N. Classification of cyclic diagrams of automatic machines // Design, technologies and innovations in textile and light industry (INNOVATIONS-

2022): collection of materials of the International Scientific and Technical Conference. Part 2. Moscow Kosygin Russian State University, 2022. P. 286...290.

2. Antonov V.S., Antonov V.V. General issues of synthesis of cycle diagrams of weaving machines // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2009. № 6. P. 90...93.

3. Lashkhi D.I. Usage of the cycle diagram for forming input data when constructing the parametric model of the machine // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2014. № 3. P. 80...83.

4. Dzhomartov A.A., Ualiev G. A mathematical model of the movement of an automatic machine together with a cyclogram of mechanisms // Problems of mechanics of modern machines. 2012, vol. 2. P. 143...156.

5. Graph-based modelling in engineering / ed. by S. Zawislak, J. Rysinski. Switzerland: Springer International Publ, 2017. 247 p. (Mechanisms and Machine Science; vol. 42). – ISBN 978-3-319-39018-5. – ISBN 978-3-319-39020-8. – doi:10.1007/978-3-319-39020-8.

6. Jomartov A.A. Multi-objective optimization of cyclogram mechanisms machine-automaton // Proceedings of the World Congress on Engineering WSE 2011, London, U.K., 6–8 July 2011. London, 2011. Vol. 3.

7. Shmyrin A.M., Sedykh I.A. Fuzzy states and structure of Petri nets as a kind of neighborhood systems // Information technologies of modeling and control. Issue 5. Voronezh: Scientific Book, 2008. P. 553...558.

8. Application and Theory of Petry Nets and Concurrency // 34th International Conference, PETRINETs, Milan, Italy. 2013. 420 p.

9. Kudzh S.A., Loginova A.S. Modeling using Petri nets // Vestnik MGTU MIREA. 2015. №1 (6). P. 10...22.

10. <https://cpnide.org/>

11. Carrasquel J.C., Morales A., Villapol M.E. Prosega / CPN: An extension of CPN Tools for Automata-based Analysis and System Verification. Trudy ISP RAN / Proc. ISP RAS. Vol. 30, issue 4, 2018. P. 107...128.

Рекомендована кафедрой технологических машин и мехатронных систем РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 02.04.24.