

УДК 338.2

JEL C02

DOI: <http://doi.org/10.25728/econbull.2021.3.2-iosifov>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ<sup>1</sup>

**Иосифов Валерий Викторович**

*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия*

*e-mail: [iosifov\\_v@mail.ru](mailto:iosifov_v@mail.ru); SPIN-код: 3558-0754; ORCID ID – нет*

**Аннотация:** Моделирование реконфигурируемых производственных систем является важным направлением исследований, имеющим широкий спектр практических приложений. В настоящей работе строится модель реконфигурируемой производственной системы на основе сетей Петри, которая может быть использована для современных производств инновационной продукции с плохо прогнозируемым спросом, в частности для производств электромобилей и их компонент.

**Ключевые слова:** производственная система, реконфигурация, масштабируемость, моделирование, сеть Петри

## MODELING RECONFIGURABLE PRODUCTION SYSTEMS USING PETRI NETS

**Iosifov Valery Viktorovich**

*Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia*

*e-mail: [iosifov\\_v@mail.ru](mailto:iosifov_v@mail.ru); SPIN Code: 3558-0754; ORCID ID - no*

**Abstract:** Modeling reconfigurable production systems is an important area of research with a wide range of practical applications. In this work, we construct a model of a reconfigurable production system based on Petri nets, which can be used for modern production of innovative products with poorly predicted demand, in particular for the production of electric vehicles and their components.

**Keywords:** production system, reconfiguration, scalability, modeling, Petri net

**Введение.** В современных экономических условиях часто изменяющегося спроса на продукцию эффективность производственной системы во многом зависит от ее способности подстраиваться под различные объемы производства. Особенно важным данный аспект является для производственных систем, выпускающих

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-010-00589 «Разработка методологии и инструментария оценки эффективности вариантов государственной поддержки инновационных транспортных технологий в контексте новой климатической политики России».

инновационную продукцию, спрос на которую прогнозируется с большой долей неопределенности. Актуальным практическим примером такой ситуации может быть развитие производства электромобилей в России в соответствии с Распоряжением Правительства РФ №2290-р от 23.08.2021, в котором запланированы объемы производства электромобилей, но наличие спроса на них не гарантировано.

В литературе производственные системы, обладающие способностью быстрой адаптации к различным объемам производства, получили название реконфигурируемых производственных систем (от англ. Reconfigurable Manufacturing Systems, RMS). Базисными характеристиками RMS являются модульность, интегрируемость, кастомизация, конвертируемость и диагональность [1]. Системы RMS также, как правило, обладают высокой масштабируемостью. RMS чаще всего используется в автоматизированных отраслях, где существует двухуровневая система конфигурации: системный уровень и машинный уровень. Следовательно, требуется и двухуровневый контроль. Системный уровень основан на программном управлении, а машинный уровень основан на кодах G&M. Управление на уровне программного обеспечения основано на алгоритмах, которые различаются в зависимости от типа машины, требований к продукту, качества и количества запросов клиентов и т. д.

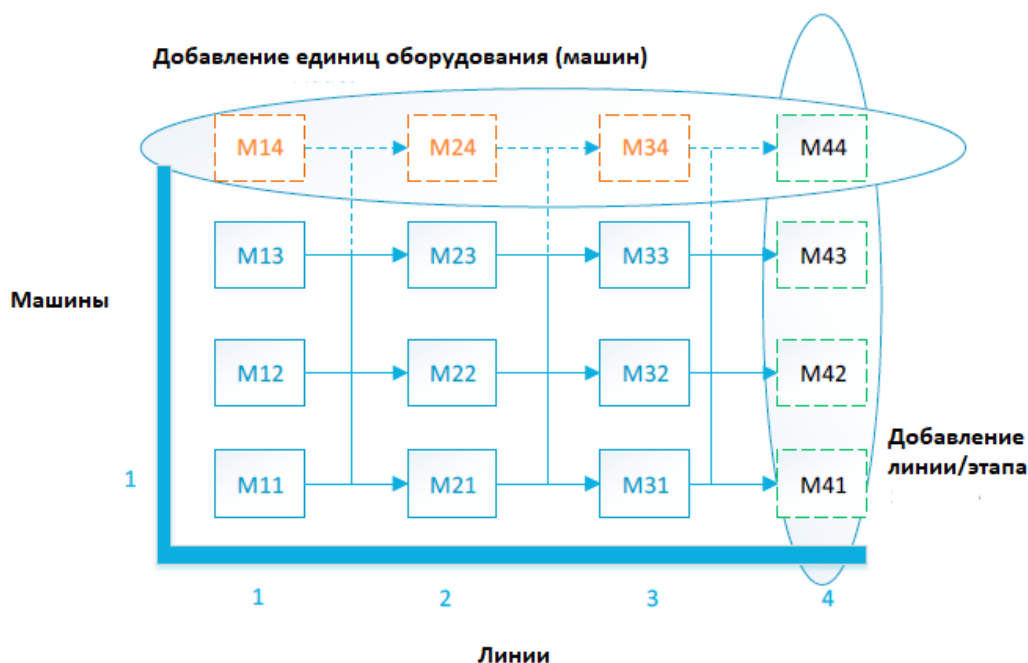
В случае RMS эти алгоритмы чаще фокусируются на улучшении ключевой характеристики. Например, алгоритм, оптимизированный для масштабируемости RMS, может быть не так оптимизирован для модульности. Эти алгоритмы, когда они закодированы на программируемых языках, образуют систему управления уровнем машины.

Одним из популярных методов оптимизации алгоритмов являются сети Петри [2]. Это инструмент моделирования, дающий как математическое, так и графическое представление форм для множества систем. Сети Петри позволяют моделировать распределенные, детерминированные, стохастические, параллельные и асинхронные процессы. Сети Петри можно использовать как графический инструмент, а также, как инструмент математического моделирования. В качестве графического инструмента сети Петри могут использоваться для представления систем в виде потоковых графиков, а в качестве математической модели они позволяют составить алгебраические уравнения, уравнения состояния и другие аналогичные математические уравнения для определения системы.

Многие авторы использовали модели сетей Петри для моделирования производственных систем. Например, Ву и др. [3] разработали модель для сложных облачных производственных систем для оценки производственных показателей и, при необходимости, планирования масштабируемости в будущем. Луо и др. [4] использовали гибридный эвристический метод Петри для построения сетевой модели, которая бы избавила производственную систему от тупиков. Лей и другие использовали аналогичный подход для разработки оптимального плана процесса для планирования без тупиков [5, 6]. В работе [7] разработана агентная модель сети Петри для масштабируемой RMS. Большинство работ, которые можно найти в литературе по моделям Петри, в основном использовались для контроля взаимоблокировок, планирование, облачных системы и т. д.

**Построение сети Петри.** В данной работе для построения модели реконфигурируемой производственной системы использовались следующие предположения:

- масштабируемость системы возможна как на уровне одной единицы оборудования (машины), так и на уровне производственной линии/этапа производственного процесса (рис. 1);
- все машины в одной линии идентичны;
- новые добавляемые машины доступны так же, как и существующие (используемые);
- время транспортировки от одной линии к другой остается неизменным из-за добавления / удаления машин.



**Рис. 1** Масштабируемость производственной системы

Предлагаемая модель может охватывать как геометрические, так и производственные изменения при условии масштабируемой настройки. Исходные данные для модели это: 1) существующие данные настройки; 2) стандарт использования инструмента (TAD) как для существующей, так и для новой детали; 3) матрица приоритета; 4) геометрические элементы; 5) производственный спрос (существующий и предполагаемый).

Схема работы по масштабированию представлена на рис. 2. Модель использует данные как существующей, так и предлагаемой новой единицы оборудования как вход (input). После этого производится сравнение по входным данным. Если различия незначительны, масштабируемая установка остается без изменений. Если различия значительны, создаются требования к этапу, далее они

сравниваются с настройками и, если они жизнеспособны, предоставляются в качестве выходных данных (output).

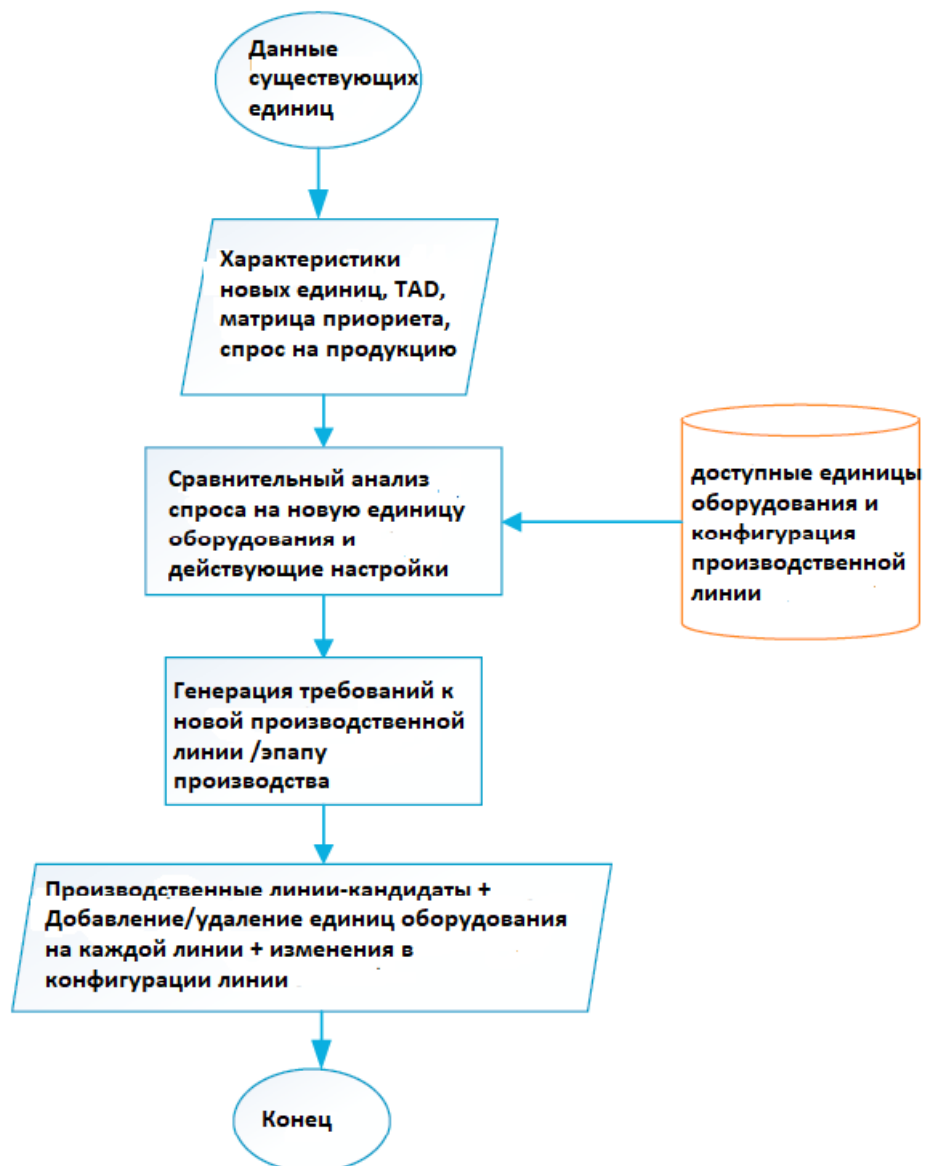


Рис. 2 Диаграмма рабочего потока по масштабированию производственной системы

Алгоритм модели (рис. 3) начинается с того, что уже существующие данные о производственной линии и новые данные предполагаемых единиц оборудования назначаются как входные. Далее эти данные используются для проведения операции кластеризации и последовательной группировки операций для каждого этапа (обозначим последовательность операций как ОС). После этого выполняется сравнение: является ли новая кластеризация (ОС<sub>n</sub>) такой же или отличной от существующей настройки кластеризации (ОС<sub>0</sub>). В случае различия вычисляется новое количество этапов/линий производственного процесса (S<sub>n</sub>). Далее запускается первый цикл алгоритма (J ≤ S<sub>n</sub>). В нем, в зависимости от потребности производства и времени работы на каждом этапе, вычисляется количество машин,

необходимых на каждом этапе/линии. Также осуществляется проверка производительности: если мощность расчетного количества машин превышает производительность этапа, то цикл запускается повторно для регулировки в соответствии с максимальной производительностью этапа.

После завершения цикла выполняется еще одна проверка. Сравняются существующая матрица приоритета и стандарт использования инструментов ( $PM_0, TAD_0$ ) по сравнению с новой матрицей приоритета и стандартом использования инструмента ( $PM_n, TAD_n$ ). Если они разные, запускается второй цикл алгоритма ( $K \leq S_n$ ). В большинстве случаев для каждой операции возможно существование более одного стандарта использования инструмента TAD. Из них выбирается наиболее подходящий, т.е. наиболее общий. После выбора стандарта необходимо рассчитать повороты, которые при переключении машины от операции к операции. Когда все повороты вычислены, запускается последний цикл ( $m \leq$  количество этапов). В нем общая последовательность операций разделена на этапные требования, предоставляющие пользователю следующие необходимые результаты: 1) общая последовательность операций; 2) требования к этапам; 3) изменения (при необходимости) в существующих масштабируемых настройках.

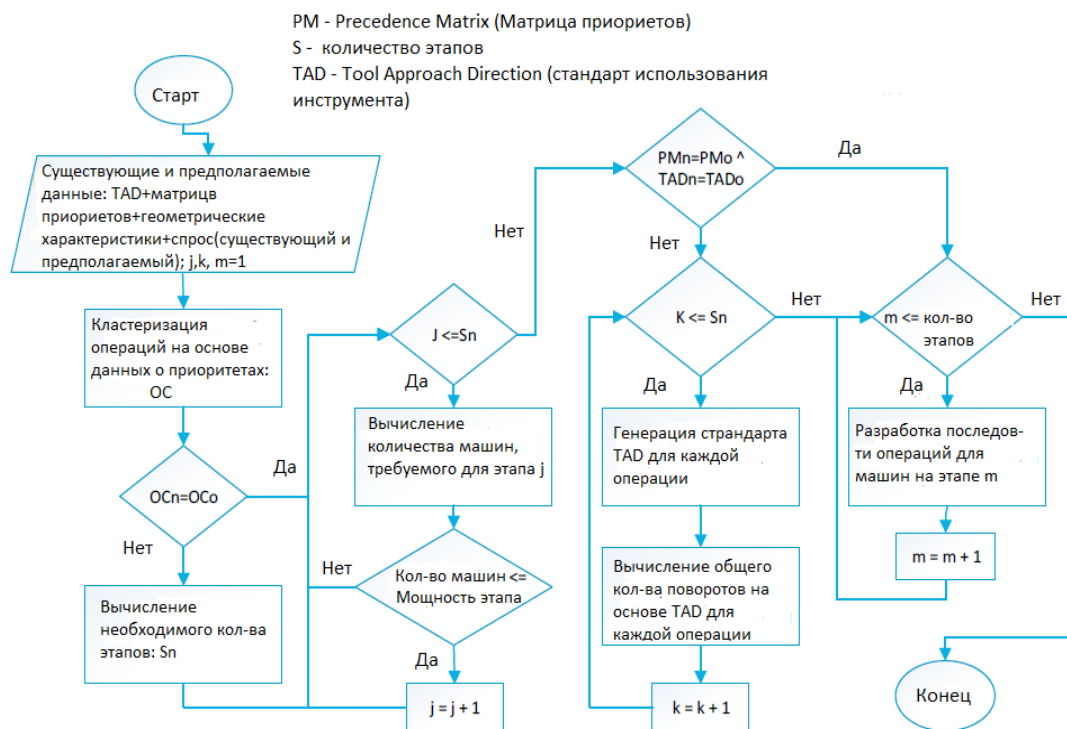


Рис. 3 Алгоритм масштабирования производственной системы

На следующем этапе на основе разработанного алгоритма строится сеть Петри (табл. 1)

Таблица 1

Описание множества вершин и переходов сети Петри

Ранг	Имя	Описание
<b>Вершины</b>		
1	$P_0$	Вход: существующие и предполагаемые данные: стандарты использования инструментов+ матрица приоритетов+ геометрические характеристики+ спрос + j, k, m=1
2	$P_1$	Алгоритм для кластерного анализа готов
3	$P_2$	Кластеризация выполнена
4	$P_3$	Данные подготовлены для анализа требований каждого этапа
5	$P_4$	Количество этапов вычислено. Алгоритм для первого цикла готов.
6	$P_5$	Вычислено количество машин, необходимых для этапа j
7	$P_6$	Проверка мощности этапа выполнена. Количество машин, необходимых для этапа j, определено.
8	$P_7$	Итерации завершены.
9	$P_8$	Цикл 1 не активен
10	$P_9$	Цикл 1 активен
11	$P_{10}$	Количество машин для каждого этапа определено
12	$P_{11}$	Сравнение существующих и новых TAD и матриц приоритетов выполнено. Цикл активирован.
13	$P_{12}$	Подходящие стандарты операций определены для этапа k
14	$P_{13}$	Цикл 2 завершен.
15	$P_{14}$	Цикл 2 не активен
16	$P_{15}$	Цикл 2 активен
17	$P_{16}$	Повороты определены для этапа m
18	$P_{17}$	Итерации завершены
19	$P_{18}$	Система готова для разработки последовательности операций для машин на этапе m
20	$P_{19}$	Последовательности операций для машин этапа m определены
21	$P_{20}$	Цикл завершен
22	$P_{21}$	Цикл завершен
23	$P_{22}$	Конец
<b>Переходы</b>		
1	$T_0$	Кластеризация операций этапа на основе данных о приоритетах
2	$T_1$	Сравнение новой и старой кластеризации этапа: кластеризации различны
3	$T_2$	Вычисление необходимого количества этапов $S_n$
4	$T_3$	Инициализации цикла
5	$T_4$	Кластеризации совпадают
6	$T_5$	Вычисление количества машин, необходимых для этапа j
7	$T_6$	Количество машин $\leq$ мощность этапа
8	$T_7$	$j=j+1$
9	$T_8$	Количество машин $>$ мощность этапа
10	$T_9$	$j \leq S_n$
11	$T_{10}$	$j > S_n$
12	$T_{11}$	Инициализация второго цикла

13	T <sub>12</sub>	$PM_n = PM_o \wedge TAD_n = TAD_o$
14	T <sub>13</sub>	Генерация стандартов TAD для каждой операции
15	T <sub>14</sub>	Определение необходимых поворотов на основе TAD
16	T <sub>15</sub>	$k=k+1$
17	T <sub>16</sub>	$k \leq$ количество операций
18	T <sub>17</sub>	$k >$ количество операций
19	T <sub>18</sub>	Инициализация третьего цикла
20	T <sub>19</sub>	Разработка последовательности операция для машин на этапе m
21	T <sub>20</sub>	$m=m+1$
22	T <sub>21</sub>	$m \leq$ количество этапов
23	T <sub>22</sub>	$m >$ количество этапов
24	T <sub>23</sub>	$PM_n \neq PM_o \wedge TAD_n \neq TAD_o$

Сеть Петри с вершинами и переходами, определенными в табл. 1, представлена на рис. 4.

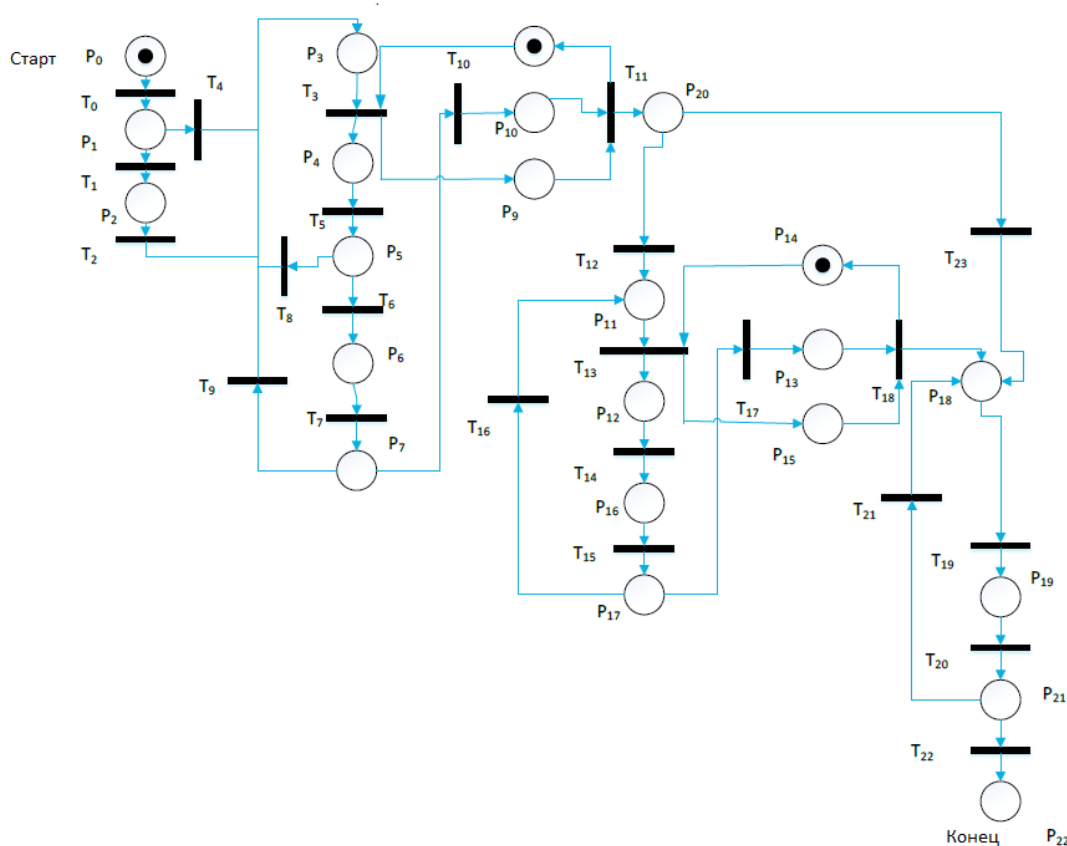


Рис. 4 Сеть Петри для процесса масштабирования производственной системы

**Описание алгоритма реконфигурации производственной системы.** Алгоритм начинается с использования существующей / предлагаемой настройки и наборов данных детали в качестве «входных» в точке P0. Кластеризация операций выполняется в соответствии с приоритетом в T0. После завершения кластеризации токен перемещается в P1. После этого, если новая и предыдущая части похожи, срабатывает переход T4, перемещая токен в P3. Если нет, то запускается переход

T1, перемещая токен в P2. После этого запускается T2 для вычисления количества этапов в масштабируемой системе, необходимого для новой части, и токен перемещается в P3. На этом этапе для запуска T3 процесс должен быть одновременно в P8 и в P3. Таким образом, T3 запускается, и процесс перемещается в P4 и P9, указывая на инициирование первого цикла (вычисление количество машин на каждом этапе). Затем, чтобы запустить T11, токен должен находиться в P9 и в P10. Следовательно, T11 не сработает, и только нахождение процесса в P4 вызовет срабатывание T5 (вычисление количества машин на этапе 1) и переход процесса в P5. Теперь есть еще одно утверждение if else. Если количество машин больше максимального, то T8 запустит повторное выполнение итерации до P3 для этапа 1, чтобы повторно вычислить подходящее количество машин. Если количество машин подходит, то произойдет переход T6 после чего - переход T7 чтобы перейти к следующему этапу.

Этап 2 переводит токен в P7. На этом этапе проводится еще одна проверка: если количество машин для всех этапов вычислено, то запускается переход T10, иначе запускается переход T9 для другой итерации следующего этапа масштабируемой системы. После того, как все этапы/машины вычислены, запускается переход T10, перемещая токен в P10. Если процесс находится одновременно в вершинах P10 и P9, то срабатывает переход T11, который перемещает процесс обратно в P8 (1-й цикл завершен) и P20.

Если новая и предыдущая настройки совпадают ( $PM_n = PM_o \wedge TAD_n = TAD_o$ ), сработает переход T23, который пропускает второй цикл алгоритма. В противном случае сработает переход T12 сработает, который переводит модель в следующий раздел. Как и в первом цикле требуется одновременное нахождение токена в вершинах P14 и P11, и после активации перехода T13 процесс переместится в P15(второй цикл) и P12. Переходы T14 и T15 срабатывают последовательно, переводя процесс от P12 до P16 и, наконец, до P17 для расчета наиболее подходящих TAD, которые потребуются для операций, выполняемых на этапе 1. Затем цикл повторно запускается через T17 для следующего этапа и так далее. Как только все TAD для всех этапов определены, запускается переход T17, переводя маркер процесса в P13, указывая на завершение второго цикла. Нахождение маркера в вершинах P13 и P15 на этом этапе ведет к срабатыванию перехода T18, который переводит маркер на P14 (второй цикл завершен) и P18 (инициирование третьего цикла). В последнем цикле маркер перемещается к P19 и P21, запуская переходы T19, T20 и T21 для разработки соответствующих последовательности операций на каждом этапе на основе TAD, кластеров, вращений, а также других связанных данных. На этом алгоритм процесса заканчивается и процесс переходит в вершину P22.

Построенная модель может использоваться для масштабирования различных производственных систем, как автоматизированных, так и работающих в условиях ручного управления.

## **Литература**

1. Hasan S.M., Butt S.U., Baqai A.A. A petri-model for scalable systems with variable stages based on changing product demands. *Procedia Manufacturing*, 17 (2018), p.198-205.



2. Кудж С.А. Логинова А.С. Моделирование с использованием сетей Петри // Вестник МГТУ МИРЭА, 2015. № 1(6), С. 10-22
3. Wu, Dazhong, David W. Rosen, and Dirk Schaefer. Scalability planning for cloud-based manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137.4 (2015): 040911.
4. Luo, JianChao, et al. Deadlock-free scheduling of automated manufacturing systems using Petri nets and hybrid heuristic search. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 45.3 (2015): 530-541. [14] Lei, Hang, et al. Deadlock-free scheduling for flexible manufacturing systems using Petri nets and heuristic search. *Computers & Industrial Engineering* 72 (2014): 297-305.
5. Lei, Hang, et al. Hybrid heuristic search approach for deadlock-free scheduling of flexible manufacturing systems using Petri nets. *Applied Soft Computing* 55 (2017): 413-423.
6. Hsieh, Fu-Shiung. Design of scalable agent-based reconfigurable manufacturing systems with Petri nets. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*(2018): 1-12.

### **References**

1. Hasan S.M., Butt S.U., Baqai A.A. A petri-model for scalable systems with variable stages based on changing product demands. *Procedia Manufacturing*, 17 (2018), p.198-205.
2. Kuj S.A. Loginova A.S. Modeling using Petri nets // *Bulletin of MSTU MIREA*, 2015. No. 1 (6), pp. 10-22
3. Wu, Dazhong, David W. Rosen, and Dirk Schaefer. Scalability planning for cloud-based manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137.4 (2015): 040911.
4. Luo, JianChao, et al. Deadlock-free scheduling of automated manufacturing systems using Petri nets and hybrid heuristic search. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 45.3 (2015): 530-541. [14] Lei, Hang, et al. Deadlock-free scheduling for flexible manufacturing systems using Petri nets and heuristic search. *Computers & Industrial Engineering* 72 (2014): 297-305.
5. Lei, Hang, et al. Hybrid heuristic search approach for deadlock-free scheduling of flexible manufacturing systems using Petri nets. *Applied Soft Computing* 55 (2017): 413-423.
6. Hsieh, Fu-Shiung. Design of scalable agent-based reconfigurable manufacturing systems with Petri nets. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*(2018): 1-12.

*Поступила в редакцию 8 ноября 2021 г.*