

DOI: 10.15593/2499-9873/2020.2.02

УДК 510.67

А.Н. Сочнев

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ СЕТЯМИ ПЕТРИ

Рассмотрены вопросы представления результатов имитационных экспериментов с моделями на основе сетей Петри для исследователя. Выявлена и обоснована необходимость качественного пересмотра применяемых способов визуализации сетями Петри как самих процессов, так и результатов моделирования. Анализ публикаций по тематике сетей Петри позволил сделать вывод о том, что визуализация таких моделей и результатов их моделирования является известным слабым местом. Именно этот фактор существенно ограничивает применение сетей Петри как инструмента решения практических задач.

Проанализированы характерные особенности задачи календарного планирования и применяемых форм представления результатов ее решения. На основе анализа литературных источников и эмпирических данных обоснована целесообразность решения задачи планирования на основе предварительного имитационного моделирования сетями Петри. Формализован способ автоматического формирования диаграмм Гантта. Определены механизмы идентификации состояния ресурсов системы по переходам сетевой модели. При разработке подхода максимально использованы уже имеющиеся в имитационной сетевой модели атрибуты и характеристики ее элементов.

Приведен пример использования предложенного подхода на основе модели типового роботизированного технологического комплекса. По результатам эксперимента выявлено, что программная реализация описанных формальных правил не влияет в значимой степени на скорость имитации. Предложенный подход обладает универсальностью в той же степени, как и используемый математический аппарат временных сетей Петри. Это позволяет описывать результаты моделирования систем и процессов разных видов, например транспортных или информационных. Важным преимуществом реализованного механизма связи сетей Петри и диаграмм Гантта является и перенос динамического характера сетей в процедуры анализа процессов на основе диаграмм. Существует также возможность внесения стохастических характеристик процессов как в имитационную модель, так и в формируемую диаграмму Гантта.

Направлением дальнейших исследований по теме статьи может быть применение и соответствующая доработка полученных формальных правил имитации сети с идентификацией ресурсов для других часто применяемых на практике классов сетей Петри, например цветных сетей Петри или E-сетей.

Ключевые слова: диаграмма Гантта, временная сеть Петри, оперативно-календарное планирование, NP-трудные задачи, дискретные производственные системы, имитационное моделирование, сетевое планирование и управление, уравнения состояния, инцидентность ресурсов и переходов, автоматизация моделирования.

A.N. Sochnev

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

METHODS FOR PRESENTING PETRI NETS MODELING RESULTS OF PRODUCTION SYSTEMS

The article considers the issues of presenting the results of simulation experiments with models based on Petri nets for a researcher. The need for a qualitative review of the applied methods for visualizing Petri nets of both the processes themselves and the modeling results has been identified and

justified. An analysis of publications on the subject of Petri nets allowed us to conclude that the visualization of such models and the results of their modeling is a known weak point. It is this factor that significantly limits the use of Petri nets as a tool for solving practical problems.

The characteristic features of the calendar planning problem and the applied forms of presenting the results of its solution are analyzed. Based on the analysis of literary sources and empirical data, the feasibility of solving the planning problem on the basis of preliminary simulation modeling by Petri nets is substantiated. The method of automatic formation of Gantt diagrams is formalized. The mechanisms for identifying the state of system resources by transitions of the network model are determined. In developing the approach, the attributes and characteristics of its elements already existing in the simulation network model were used to the maximum.

An example of using the proposed approach based on the model of a typical robotic technological complex is given. According to the results of the experiment, it was revealed that the software implementation of the described formal rules does not significantly affect the speed of model simulation for the presented robotic system. The proposed approach has the same versatility as the mathematical apparatus used timed Petri nets. This allows us to describe the results of modeling systems and processes of different types, for example, transport or information. An important advantage of the implemented mechanism for the connection of Petri nets and Gantt diagrams is the transfer of the dynamic nature of networks to the process analysis procedures based on diagrams. There is also the possibility of introducing stochastic characteristics of the processes both in the simulation model and in the generated Gantt diagram.

The direction of further research on the topic of the article may be the application and corresponding refinement of the obtained formal rules for simulating a network with identification of resources for other classes of Petri nets often used in practice, for example, color Petri nets or E-nets.

Keywords: Gantt chart, timed Petri net, operational scheduling, NP-hard tasks, discrete production systems, simulation, network planning and control, equations of state, incidence of resources and transitions, modeling automation.

Введение

Задачи календарного планирования возникают в различных сферах деятельности, в том числе при проектировании новых изделий и запуске их в производство, составлении расписаний движения транспорта, планировании графиков выпуска и доставки продукции и т.д. Научный подход к календарному планированию проектов предложен и применен в конце 50-х гг. прошлого века [1]. Были разработаны такие технологии, как PERT (Project Evaluation and Review Technique) и СРМ (Critical Path Method) [2] (в отечественной литературе – сетевое планирование и управление) [3]. Характерной особенностью этих технологий является представление проекта в виде комплекса взаимосвязанных работ. Известно, что большинство задач календарного планирования с учетом ограничений на ресурсы являются NP-трудными. Особую актуальность эти задачи приобретают при планировании крупномасштабных проектов, требующих больших затрат ресурсов [4, 5].

Одним из наиболее популярных и наглядных способов представления расписаний и календарных графиков являются диаграммы Гантта [6, 7]. На диаграммах Гантта на одной оси лентами изображаются все операции, выполняемые последовательно на данной машине для различных работ. Основное достоинство диаграммы Гантта состоит в удобном графическом представлении набора работ, позволяющем

абсолютно точно идентифицировать: время начала операции, время завершения, исполнителя, набор предшествующих и набор последующих работ, способ выработки критического пути. Основными недостатками диаграмм Гантта можно считать недостаточную гибкость, невозможность отображения значимости или ресурсоемкости работ, сущности работ. Для крупных проектов диаграмма Гантта становится чрезмерно тяжеловесной и теряет всякую наглядность. Несмотря на указанные недостатки, в настоящее время диаграммы Гантта фактически являются стандартным средством представления календарных планов-графиков.

С учетом сложности аналитического описания реальных систем для решения задач планирования производства целесообразно использовать методы имитационного моделирования [8, 9]. Для имитационного моделирования дискретных производственных систем широко применяется математический аппарат сетей Петри. Среди основных преимуществ сетей Петри можно отметить то, что они позволяют с требуемой точностью представлять ветвящиеся, параллельные, циклические процессы, обладают средствами анализа, а также моделирования в реальном масштабе времени. Сети Петри позволяют с достаточной степенью детализации моделировать процессы управления в параллельных системах и протоколы взаимодействия. В них имеются простые конструкции для описания структур параллелизма: последовательная композиция, выбор, параллельное слияние [8, 10].

Вместе с тем сети Петри имеют некоторые недостатки, полный анализ которых выходит за рамки данной статьи. Важным недостатком можно считать трудоемкость разработки моделей, и многие исследователи стараются максимально автоматизировать этот процесс [8, 11, 12]. Можно отметить также невыразительность и сложность аппарата сетей Петри, как средства визуализации моделируемого процесса, так и результатов имитационных экспериментов [13, 14]. Задачей представляемой работы является автоматизированное формирование диаграмм Гантта и, по возможности, других форм визуализации результатов по итогам имитационного эксперимента с сетью Петри как механизма минимизации отмеченного недостатка.

1. Модификация аппарата временных сетей Петри

Формирование диаграммы Гантта требует наличия в качестве результатов моделирования данных об активности каждого ресурса системы либо каждого объекта. Применительно к сетям Петри такая ин-

формация в общем случае отсутствует. Сети Петри оперируют своими специфическими понятиями позиций, переходов, маркировки и др. Эти объекты напрямую не связаны с ресурсами [8, 15]. В некоторых реализациях сетей Петри вводятся дополнительные атрибуты позиций и переходов, связывающие их с ресурсами. В то же время, по мнению автора, требуется формализованный подход для контроля состояния сетевой модели на каждом шаге моделирования.

Формально временные сети задаются набором из пяти элементов $TPN = (P, T, E, x_0, Z)$, где P , T , E имеют обычный для сетей Петри смысл (позиции, переходы, дуги), x_0 – начальная маркировка сети, а $Z: P \rightarrow R^+$ – функция времени задержки маркеров в позициях сети. Переходам t_j сопоставлены значения времени z_j , отражающие длительность выполнения соответствующих операций моделируемого процесса. Исходя из анализа приведенных правил можно предложить в качестве основы для формирования диаграммы Ганта использовать атрибуты занятости переходов. Поскольку с практической точки зрения целесообразно описывать сети Петри в матричном виде, введем векторы w и v , элементы которых будут определять занятость переходов и время занятости соответственно. Размерность вектора определяется количеством переходов.

Таким образом, динамика имитационной модели на основе сети Петри будет определяться следующими ниже уравнениями изменения состояний.

Условие запуска срабатывания переходов

$$\forall t_j : \forall p_i \in I(t_j) : x_i[k] \geq B^- \cdot u_j[k], j = 1, m, i = 1, n.$$

Правило изменения состояния входных позиций переходов

$$x[k+1] = x[k] - B^- \cdot u[k].$$

Изменение атрибутов переходов

$$w[k+1] = u[k];$$

$$v_j[k+1] = v_j[k] + z_j \cdot u_j[k], j = 1, m.$$

Условие завершения срабатывания переходов

$$\forall t_j : (v_j[k] < \tau) \wedge (w_j[k] = 1), j = 1, m.$$

Правило изменения состояния выходных позиций переходов

$$x[k+1] = x[k] + B^+ \cdot u[k].$$

Изменение значений таймеров активных переходов

$$v_j[k+1] = \begin{cases} v_j[k] - \tau, & \text{если } v_j[k] \geq \tau \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad j = 1, m.$$

Здесь x – вектор состояния позиций (маркировка), B^- – матрица входных инцидентов сети, B^+ – матрица выходных инцидентов сети, z – вектор задержек переходов, u – вектор запуска срабатывания переходов, w – вектор флагов срабатывания переходов, v – вектор таймеров срабатывания переходов, m – количество переходов, n – количество позиций.

2. Пример решения задачи календарного планирования

Имеется технологический агрегат (станок), осуществляющий обработку изделий; робот-манипулятор, осуществляющий установку заготовок и снятие готовых изделий с агрегата, а также оперативный накопитель для хранения объектов производства. Например, такую структуру имеют однопозиционные роботизированные технологические комплексы (РТК) на базе токарных станков моделей 16К20Ф3, Т5К20РФ3 или 16К20Т1 (рис. 1).

Модель описанной системы приведена на рис. 2. Пояснения к элементам модели приведены в табл. 1. Параметры модели содержит табл. 2.

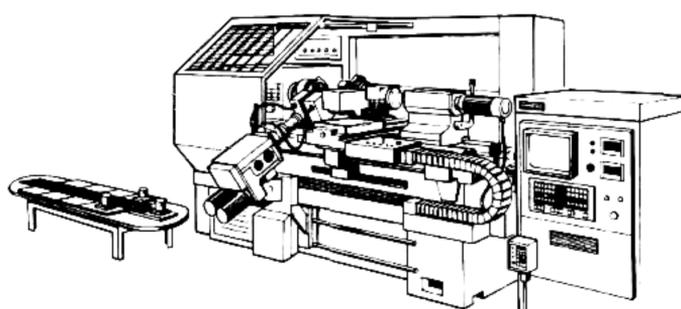


Рис. 1. РТК на основе станка 16К20Ф3

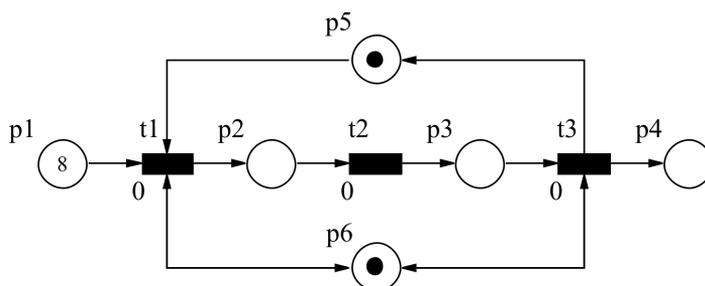


Рис. 2. Сетевая модель системы

Таблица 1

Назначение элементов модели

Функциональное назначение позиций сети	
Позиция	Назначение
p1	Входной накопитель заготовок
p2	Заготовка в станке
p3	Готовая деталь в станке
p4	Выходной накопитель деталей
p5	Состояние станка (свободен/занят)
p6	Состояние робота (свободен/занят)
Функциональное назначение переходов сети	
Переход	Назначение
t1	Установка заготовки (роботом) в станок
t2	Обработка заготовки
t3	Снятие детали (роботом) со станка

Таблица 2

Исходные данные для моделирования

Параметры переходов		
Переход	Назначение	Длительность
t1	Установка заготовки (роботом) в станок	0,2
t2	Обработка заготовки	1,2
t3	Снятие детали (роботом) со станка	0,4
Начальная маркировка позиций		
Позиция	Назначение	Маркировка
x(p1)	Входной накопитель заготовок	8
x(p5), x(p6)	Состояние станка, робота (свободен)	1
Остальные		0

В программе MathCad были реализованы матричные уравнения изменения состояний и получены значения вектора маркировки сети. На основе интерпретации значений вектора v получены данные, требуемые для представления диаграммы Ганта. В данном примере интерпретация довольно проста, поскольку имеется всего два ресурса (робот и станок) и легко соотнести переходы сети с используемыми ресурсами. В реальных моделях одному ресурсу могут соответствовать десятки переходов. В таких случаях возможно в матричном виде описать отношение инцидентности ресурсов и переходов.

Идентификация ресурсов в сетевой модели может быть реализована определением связи каждого перехода и соответствующего физического ресурса системы. Компьютерное моделирование предполагает матричное определение сетевой модели. В связи с этим целесообразно задать матрицу инцидентности ресурсов и переходов R :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{km} \end{pmatrix},$$

где r_{ij} – отношение инцидентности i -го ресурса и j -го перехода; k – количество ресурсов; m – количество переходов.

Контроль используемых ресурсов может осуществляться по следующему правилу:

$$b[k] = R \cdot w[k],$$

где $b[k]$ – вектор состояния ресурсов; $w[k]$ – индикатор активности перехода на текущем такте.

По результатам имитационного эксперимента построена диаграмма Ганта для производственной системы (рис. 3). Верхняя лента на графике отображает операции станка, нижняя – работа. Форма ее представления имеет некоторые особенности, связанные с используемой программой. Необходимо также отметить особенность визуализации, связанную с дискретным характером состояний временной сети Петри.

Решение задачи оперативно-календарного планирования предполагает также определение графиков выпуска продукции. Применительно к терминологии теории сетей Петри они соответствуют графикам изменения маркировок позиций сети (рис. 4). С точки зрения определения объема готовой продукции анализируется маркировка позиции p_4 , при необходимости можно также оценить объем незавершенного производства и занятость ресурсов.

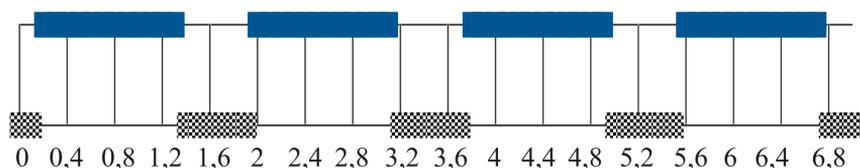


Рис. 3. Диаграмма Гантта: ▨ – робот; ■ – станок



Рис. 4. График изменения маркировки сети:

- Маркировка p_1
- Маркировка p_2
- Маркировка p_3
- Маркировка p_4
- Маркировка p_5
- Маркировка p_6

Заключение

В представленной статье описаны следующие основные научные результаты:

1. Обоснована необходимость использования унифицированных форм представления результатов моделирования процессов сетями Петри.
2. Предложен формальный способ формирования диаграмм Гантта на основе вектора состояния сети Петри.
3. Описаны матричные уравнения изменения состояний временной сети Петри с пошаговым контролем ресурсов и их активности.

Список литературы

1. Макаров И.М., Рахманкулов В.З., Назаретов В.М. Робототехника и гибкие автоматизированные производства: в 9 кн. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1986. – 175 с.
2. Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 372 с.
3. Алгоритмы / С. Дасгупта, Х. Пападимитриу, У. Вазирани; МЦНМО. – М., 2014. – 320 с.
4. Оперативное управление в ГПС / В.Ф. Горнев, В.В. Емельянов, М.В. Овсянников. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
5. Лобанова А.М. Моделирование бизнес-процессов: учеб. и практикум для академ. бакалавриата. – М.: Юрайт, 2016. – 276 с.
6. Марычев П.И., Орлов С.П. Сеть Петри для моделирования проектов при проведении виртуальных аукционов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 2 (50). – С. 34–39.
7. Федосеева А.А. Представление технологического процесса производства таблетированных лекарственных препаратов с помощью блок–схем и временных сетей Петри // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 5. – С. 385–389.
8. Сочнев А.Н. Сетевые модели в системах управления производством: монография / Сиб. федер. ун-т. – Красноярск, 2014. – 162 с.
9. Воробьев С.А. Планирование и управление дискретным производством на основе временных сетей Петри с переменной нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2002. – 149 с.
10. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 263 с.
11. Кониченко А.В., Цепов Ю.А. Дополнение IDEF0 моделей диаграммами Гантта при управлении проектами // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2005. – № 10. – С. 130–136.
12. Муханов Б.К., Токтасынова Н.Р., Рахманбеков Н.А. Разработка системы оперативно-календарного планирования на основе сетей Петри в среде AnyLogic // Вестник автоматизации. – 2017. – № 1 (55). – С. 48–52.
13. Паршина И.С. Оптимизация производства на уровне цеха как основная задача MES-систем // Вестник МГТУ СТАНКИН. – 2019. – № 4 – С. 7–13.
14. Шестаков А.М. Моделирование программы таксономии технологий изготовления деталей машиностроительного профиля с помощью сетей Петри // Программные продукты и системы. – 2014. – № 2 (106). – С. 161–164.

15. Сидорович Н.И. Совершенствование оперативно-календарного планирования на промышленных предприятиях // Наука и инновации. – 2015. – № 8. – С. 23–26.

References

1. Makarov I. M., Rakhmankulov V. Z., Nazaretov V. M. Robototekhnika i gibkie avtomatizirovannye proizvodstva. V 9–ti kn. Kn. 5. Modelirovanie robototekhnicheskikh sistem i gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstv: ucheb. posobie dlia vtuzov [Robotics and flexible automated production. In 9 vol. Vol. 5. Modeling of robotic systems and flexible automated production: textbook. allowance for technical colleges]. Moscow, Vyssh. shk., 1986, 175 p.

2. Zagidullin R.R. Upravlenie mashinostroitel'nym proizvodstvom s pomoshch'iu sistem MES, APS, ERP [Management of machine-building production using MES, APS, ERP systems]. Staryi Oskol: Izdatel'stvo TNT, 2011, 372 p.

3. Dasgupta S., Papadimitriou Kh., Vazirani U. Algoritmy [The algorithms]. Moscow, MTsNMO, 2014, 320 p.

4. Gornev V. F., Emel'ianov V. V., Ovsianikov M. V. Operativnoe upravlenie v GPS [Operational control of FMS]. Moscow, Mashinostroenie, 1990, 256 p.

5. Lobanova A.M. Modelirovanie biznes-protsessov. Uchebnik i praktikum dlia akademicheskogo bakalavriata [Modeling business processes. Textbook and workshop for academic undergraduate]. Moscow, Iurait, 2016, 276 p.

6. Marychev P.I., Orlov S.P. Set' Petri dlia modelirovaniia proektov pri provedenii virtual'nykh auktsionov [Petri net for modeling projects during virtual auctions]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 2 (50), pp.34–39.

7. Fedoseeva A.A. Predstavlenie tekhnologicheskogo protsessa proizvodstva tabletirovannykh lekarstvennykh preparatov s pomoshch'iu blok–skhem i vremennykh setei Petri [Presentation of the technological process for the production of tablet medicines using flowcharts and temporary Petri nets]. *Zhurnal «Radioelektronni i komp'iuterni sistemi»*, 2013, no. 5, pp. 385 – 389.

8. Sochnev A.N. Setevye modeli v sistemakh upravleniia proizvodstvom: monografiia [Net models in production control systems: monograph]. Krasnoiarsk, Sib. federal. un-t, 2014, 162 p.

9. Vorob'ev S.A. Planirovanie i upravlenie diskretnym proizvodstvom na osnove vremennykh setei Petri s peremennoi nagruzkoi: Dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.14 [Planning and managing discrete production based on temporary variable load Petri nets]. Ph.D. thesis, Krasnoiarsk, 2002, 149 p.

10. Peterson Dzh. Teoriia setei Petri i modelirovanie sistem: Per. s angl [Theory of Petri Nets and System Modeling]. Moscow, Mir, 1984, 263 p.

11. Konichenko A.V., Tsepov Iu.A. Dopolnenie IDEF0 modeli diagrammami Gantta pri upravlenii proektami [Adding IDEF0 Models to Gantt Charts in Project Management]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannykh*, 2005, no. 10, pp. 130–136.

12. Mukhanov B.K., Toktasynova N.R., Rakhmanbekov N.A. Razrabotka sistemy operativno-kalendarного planirovaniia na osnove setei Petri v srede AnyLogic [Development of an operational-scheduling system based on Petri nets in AnyLogic environment]. *Vestnik avtomatizatsii*, 2017, no. 1 (55), pp. 48–52.

13. Parshina I.S. Optimizatsiia proizvodstva na urovne tsekha kak osnovnaia zadacha MES-sistem [Optimization of production at the workshop level as the main task of MES systems]. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2019, no. 4, pp.7-13.

14. Shestakov A.M. Modelirovanie programmy taksonomii tekhnologii izgotovleniia detalei mashinostroitel'nogo profil'ia s pomoshch'iu setei Petri [Modeling a taxonomy program for manufacturing technologies for parts of a machine-building profile using Petri nets]. *Programmnye produkty i sistemy*, 2014, no. 2 (106), pp. 161-164.

15. Sidorovich N.I. Sovershenstvovanie operativno-kalendarного planirovaniia na promyshlennykh predpriatiiakh [Improving operational calendar planning in industrial enterprises]. *Nauka i innovatsii*, 2015, no. 8, pp. 23-26.

Получено 11.02.2020

Принято 15.05.2020

Сведения об авторе

Сочнев Алексей Николаевич (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, завкафедрой «Робототехника и техническая кибернетика», Сибирский федеральный университет (660041, Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: asochnev@sfu-kras.ru).

About the author

Aleksei N. Sochnev (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Robotics and Technical Cybernetics, Siberian Federal University (660041, Krasnoyarsk, Svobodny st., 79, e-mail: asochnev@sfu-kras.ru).

Библиографическое описание статьи согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018:

Сочнев, А.Н. Способы представления результатов моделирования производственных систем сетями Петри / А. Н. Сочнев. – DOI 10.15593/2499-9873/2020.2.02. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2020. – № 2. – С. 29–40.

Цитирование статьи в изданиях РИНЦ:

Сочнев А.Н. Способы представления результатов моделирования производственных систем сетями Петри // Прикладная математика и вопросы управления. – 2020. – № 2. – С. 29–40. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.2.02

Цитирование статьи в references и международных изданиях:

Cite this article as:

Sochnev A.N. Methods for presenting petri nets modeling results of production systems. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2020, no. 2, pp. 29–40. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.2.02 (*in Russian*)