

В. П. Кулагин, д-р техн. наук, проф., e-mail: kulagin@mirea.ru,
А. А. Логинов, аспирант, e-mail: loginov.a.a@edu.mirea.ru,
РТУ МИРЭА, Москва

Анализ программных средств для работы с сетями Петри

Представлен обзор существующего программного обеспечения для моделирования с использованием сетей Петри (СП). Приведены особенности аппарата СП и преимущества его использования. Обоснована актуальность разработки и использования инструментальных средств для работы с СП. Проведен сравнительный анализ возможностей программных средств, включающий сравнение функций анализа и синтеза, возможностей по созданию библиотек, поддержки кроссплатформенности и др. Сделаны выводы о сферах применения описанного ПО.

Ключевые слова: сети Петри, дискретно-событийное моделирование, программное обеспечение для сетей Петри, CPN Tools, AnyLogic, MATLAB, APT, APO, PIPE, TAPAAL, СП с синхронизированными дугами, раскрашенные СП, PNML

Введение

Сети Петри (СП) впервые были описаны в 1962 г. немецким математиком Карлом Петри и к настоящему времени приобрели широкое применение во многих отраслях научных и практических исследований, связанных с анализом параллельно протекающих процессов и процедур использования разделяемых ресурсов. СП являются удобным математическим аппаратом для формализации, анализа и моделирования дискретно-событийных систем, они могут использоваться для эффективного моделирования различных технологических процессов [1, 6]. Анализ моделей вычислительных систем и устройств, выраженных в терминах СП (СП-моделей), позволяет на ранних этапах проектирования оценить корректность алгоритмов взаимодействия как отдельных устройств, так и работу всей системы в целом.

В связи с этим разработка и использование инструментальных средств, позволяющих наиболее полно и эффективно проводить анализ СП-моделей, не потеряло своей актуальности и в настоящий момент.

В данной работе проведен сравнительный анализ возможностей современных программных средств, моделирующих работу СП. В настоящее время существует ряд пакетов, исследующих свойства СП. В основном данные средства разработаны и поддерживаются

университетскими командами, но есть и пакеты, которые созданы и поддерживаются другими разработчиками. К ним, например, можно отнести MATLAB и AnyLogic. Однако стоит заметить, что работа в этих средах с СП возможна только с помощью сторонних библиотек.

Рассмотрим основные функциональные возможности современных пакетов, моделирующих работу и проводящих анализ СП.

CPN Tools

CPN Tools — одна из самых известных программ для моделирования СП. Данное программное обеспечение (ПО) является открытым и свободным [19]. Его разработкой занимается рабочая группа Университета Орхуса из Дании. Оно работает с мощным классом сетей, называемых иерархическими временными раскрашенными СП.

CPN Tools используется в большом числе реальных проектов, особенно в области телекоммуникаций, для построения и анализа СП-моделей.

Основными функциями CPN Tools являются: создание СП-моделей, анализ их поведения с помощью имитации динамики СП, а также построение и анализ пространства состояний модели. Кроме того, продукт позволяет по-

лучить информацию о таких свойствах СП, как живость и ограниченность.

CPN Tools позволяет проводить пошаговую имитацию для поиска и устранения ошибок в разрабатываемой модели, а также автоматическое выполнение определенного числа шагов. Кроме того, в CPN Tools включен специальный язык программирования для описания атрибутов элементов сети [2, 3].

Стоит отметить, что в CPN Tools присутствует функционал, который позволяет создавать пользовательские расширения на Java. Данный продукт поддерживает экспорт в формат PNML (Petri Net Markup Language), что обеспечивает совместимость с другими программными продуктами [23]. PNML — гибкий, основанный на XML формат, являющийся стандартом ISO/IEC, поддерживается рядом программных продуктов и подходит для описания параллельных систем [9, 12].

К недостаткам CPN Tools можно отнести низкую скорость работы, а также своеобразный интерфейс, который может быть непривычен новичкам. Кроме того, последние версии CPN Tools поддерживают работу только с Windows. Работа на других операционных системах (ОС) возможна с помощью виртуальной машины или Wine — программного обеспечения, позволяющего запускать ПО для Windows на таких ОС, как macOS, Linux и др. [20, 28].

AnyLogic

AnyLogic — коммерческая среда для имитационного моделирования, которая обладает бесплатной версией для использования в образовательном процессе. Однако бесплатная версия обладает рядом ограничений, включая, например, невозможность динамического создания более 50 000 агентов [4, 8].

Разработкой данного ПО занимается многонациональная команда из России, Европы и США. AnyLogic объединяет в себе несколько методов моделирования и используется во множестве коммерческих организаций и учебных заведений по всему миру [7].

AnyLogic написан на Java в Eclipse и является кроссплатформенным программным обеспечением. ПО позволяет манипулировать моделью

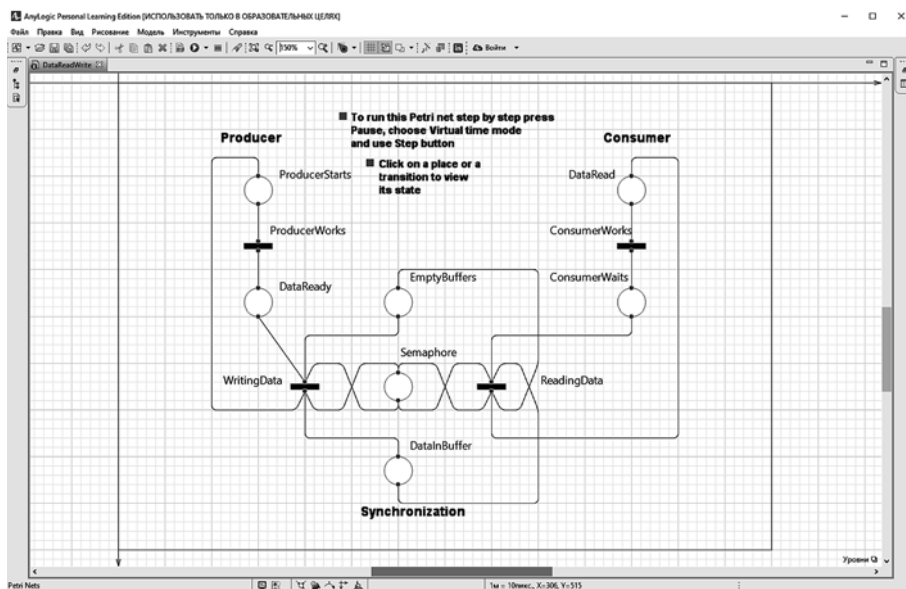


Рис. 1. Фрагмент сети Петри, построенной в AnyLogic

как с помощью графического интерфейса, так и с использованием языка программирования Java. AnyLogic располагает возможностью изменения параметров модели во время ее выполнения, что позволяет наглядно демонстрировать динамику моделируемой системы. Преимуществом данного продукта является наличие библиотеки объектов, которая позволяет создавать гибкие модели с наглядной визуализацией моделируемого процесса [5].

При создании AnyLogic не был нацелен на использование исключительно только СП, тем не менее, данный инструментарий предоставляет широкую базу для построения СП-моделей. В справке AnyLogic есть пример, позволяющий работать с СП, который используется в работе [18] для решения задачи об обедающих философах.

На рис. 1 представлен фрагмент СП, построенный в среде AnyLogic.

MATLAB Petri Net Toolbox

Petri Net Toolbox (PN Toolbox) представляет собой ПО, встроенное в окружение MATLAB. Согласно работе [21] поддерживается только одна платформа — Windows.

PN Toolbox разработан на кафедре автоматического управления и промышленной информатики Ясского технического университета им. Георге Асаки. Оно позволяет проводить моделирование и анализ СП-моделей.

ПО обладает графическим интерфейсом, и с его помощью возможно построить дерево до-

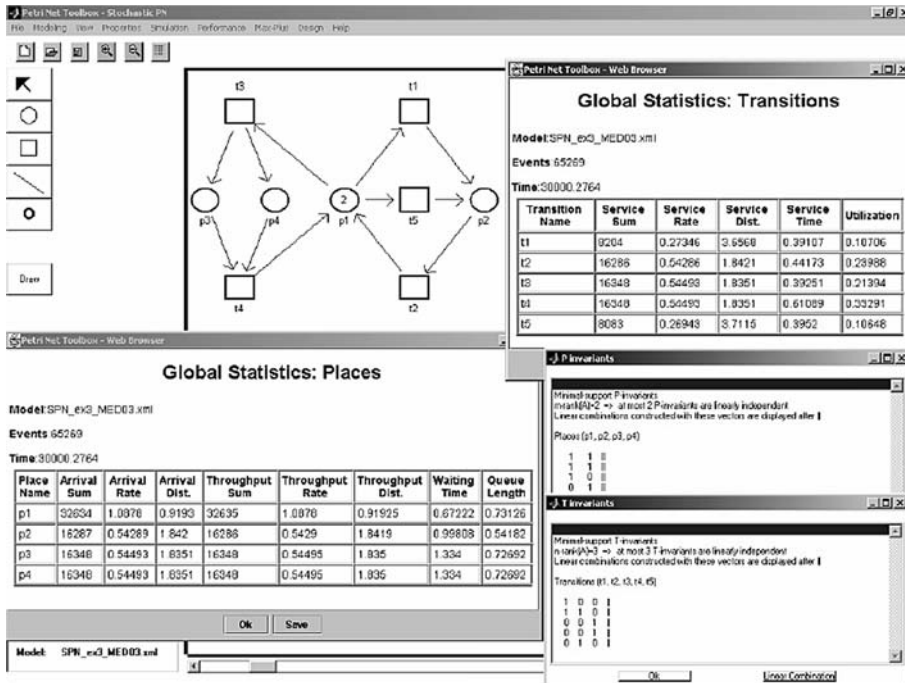


Рис. 2. Различная информация о СП, построенной в PN Toolbox

стижимых разметок (ДДР), которое может быть представлено как в виде списка, так и в виде графа; присутствует возможность отобразить СП в виде матриц инцидентности. Стоит отметить, что данный продукт позволяет определить свойства сети (ограниченность, живость и др.). Кроме того, PN Toolbox поддерживает расширения СП, включая стохастические и временные.

На рис. 2 представлена построенная в PN Toolbox СП и различная информация о ее функционировании [21, 22].

АРТ

АРТ является открытым и свободным программным обеспечением. Данный продукт, появившийся как проект студенческой группы университета Ольденбурга, написан на Java и может быть запущен на любой ОС, которая поддерживает JVM.

АРТ позволяет построить ДДР, отобразить матрицу инцидентности, а также определить такие свойства сети, как живость, ограниченность, наличие конфликтов и др.

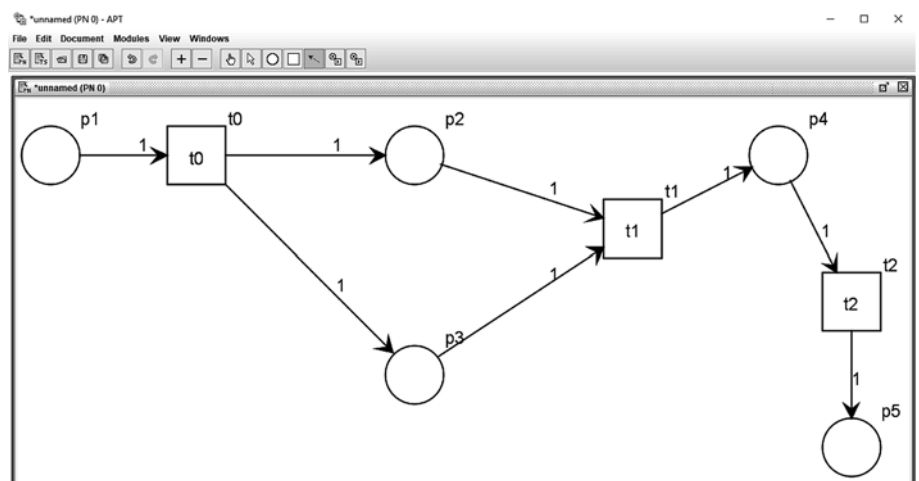


Рис. 3. Графический интерфейс ART-GUI

АРТ поддерживает синтез СП из помеченного графа, однако данная функция имеет ряд ограничений при синтезе параллельных фрагментов СП. При необходимости пользователь может выбрать свойства, которым должна соответствовать создаваемая СП [14].

АРТ поддерживает работу с форматом PNML, а также обладает модульной структурой, что позволяет легко расширять его функционал [10, 14].

АРТ представляет собой консольную утилиту, однако существует проект ART-GUI, который позволяет работать с АРТ в графическом окружении (рис. 3) [15].

АРО

АРО представляет собой веб-интерфейс для АРТ, написанный на языке программирования CoffeeScript. Данный продукт позволяет проводить имитацию, анализ и синтез СП в браузере.

Среди функций анализа присутствуют построение ДДР (рис. 4) и оценка таких свойств сети, как ограниченность, однородность, безопасность, живость и др. [17]. АРО имеет недостатки, аналогичные ПО АРТ.

PIPE

PIPE — кроссплатформенное программное обеспечение с открытым исходным кодом для разработки и анализа СП. ПО поддерживает работу с обобщенными стохастическими СП. Оно написано на языке программирования Java, а его разработка ведется с 2002—2003 г. на кафедре вычислительной техники Имперского колледжа Лондона [16, 24].

PIPE обладает графическим интерфейсом (рис. 5) и располагает механизмом для интеграции новых функций через подключаемые модули, что выгодно отличает его от других инструментов, функционал которых не может быть расширен пользователем.

PIPE поддерживает режим имитации работы СП, а также имеет модули, позволяющие отобразить матрицы инцидентности, строить ДДР. Кроме того, ПО позволяет определить свойства СП, включая живость и ограниченность, а также провести анализ ее производительности.

Следует отметить, что PIPE поддерживает работу с форматом PNML [24].

TAPAAL

TAPAAL представляет собой программное обеспечение с открытым исходным кодом, разработка которого ведется в университете Ольборга. Данный продукт является кроссплатформенным и написан с использованием языков C++ и Java [13, 25].

Функции для анализа СП включают имитацию работы, анализ достижимости разметки и верификацию СП [9, 13].

ПО обладает графическим интерфейсом, который основан на наработках проекта PIPE (рис. 6) [26].

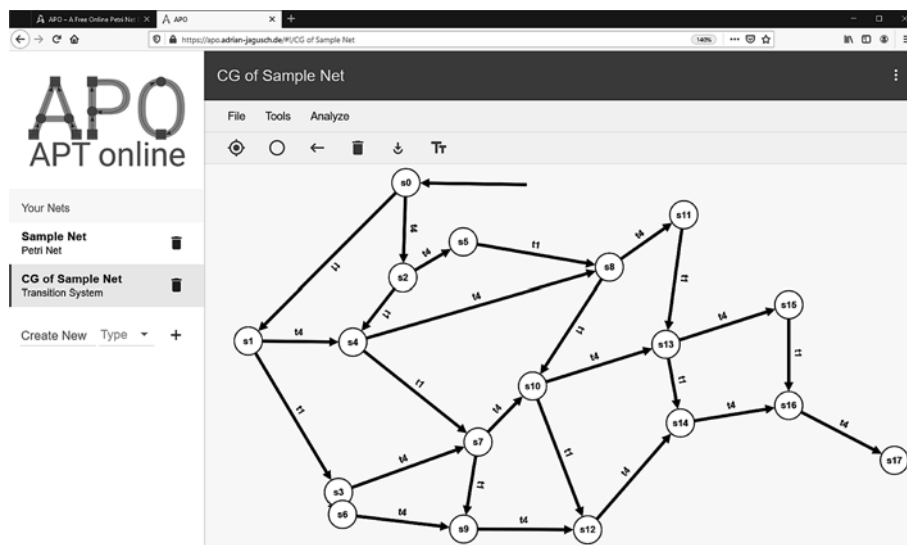


Рис. 4. ДДР сети Петри, построенной в APO

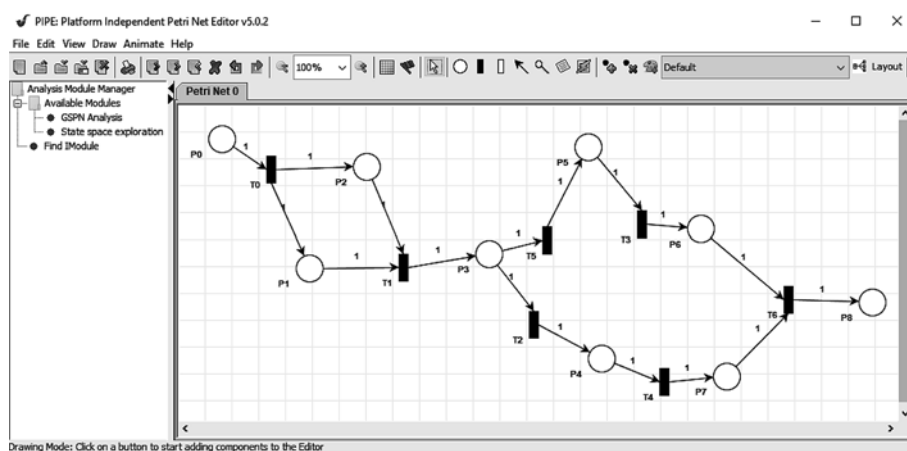


Рис. 5. Фрагмент программы, отображающий сеть Петри

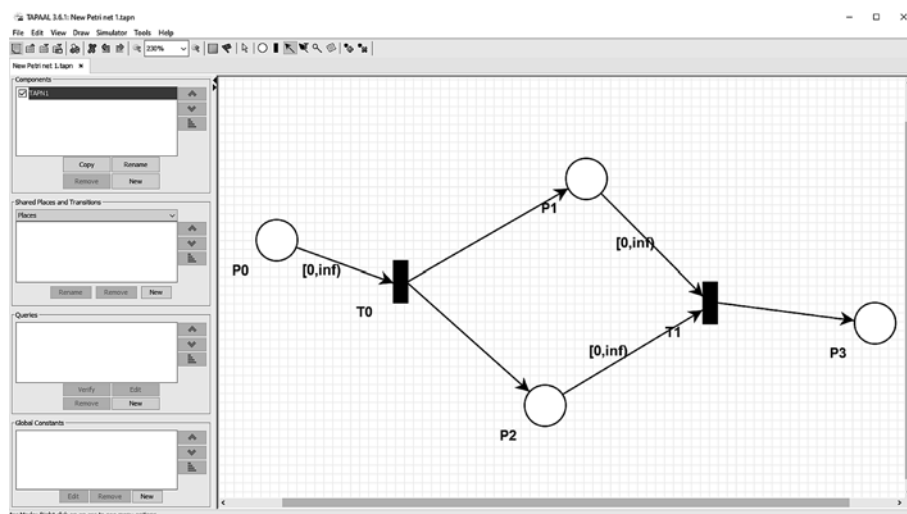


Рис. 6. Отображение графовой модели в TAPAAL

ТАРААЛ поддерживает работу СП с синхронизированными дугами. Этот тип СП является временным расширением классических СП. В нем каждая метка имеет свой возраст, а дуги, идущие к переходам, помечены временными интервалами, пропускающими метки с возрастом именно из этого диапазона (интервала) [13, 27].

ПО позволяет использовать ингибиторные дуги. Кроме того, поддерживается импорт и экспорт СП в PNML [9, 26].

Сравнительный анализ программных средств моделирования сетей Петри

Результаты анализа возможностей программных пакетов для моделирования СП сведены в представленную ниже таблицу.

Программные пакеты сравнивались по девяти критериям:

1. Возможность запуска на нескольких операционных системах (*Кроссплатформенное ПО*).
2. Язык программирования, на котором написано ПО (*язык программирования*).

Характеристики	CPN Tools	MATLAB Petri Net Toolbox	AnyLogic	АРТ	ТАРААЛ	PIPE	АРО	
Кроссплатформенное ПО	Нет	Да					Да ¹	
Язык программирования	BETA/Standart ML/Java	Н/Д	Java	Java	Java/C++	Java	CoffeeScript	
Графический интерфейс	Да			Да ²	Да			
Поддержка сторонних библиотек	Да	Н/Д		Да	Н/Д	Да	Н/Д	
Тип лицензии	Свободная	Коммерческая ³	Коммерческая ⁴	Свободная				
PNML	Да	Н/Д		Да	Да	Да	Н/Д	
Синтез СП	Н/Д	Н/Д	Н/Д	Синтез из графа переходов	Н/Д	Н/Д	Синтез из графа переходов	
Анализ СП	Оценка свойств сети	ДДР	Имитация работы	ДДР	Имитация работы	ДДР ⁵	ДДР	
		Оценка свойств сети						Матричное представление
	Имитация работы	Имитация работы		Оценка свойств сетей		Анализ достижимости	Имитация работы ⁵	
		Имитация работы ⁶		Верификация СП		Оценка свойств сетей ⁵		
Расширения СП	Иерархические временные раскрашенные СП	Временные СП	Н/Д	Н/Д	СП с синхронизированными дугами	Обобщенные стохастические СП	Н/Д	
		Стохастические СП						
		Обобщенные стохастические СП						

¹Открывается в браузере, т. е. может быть запущено через браузер на различных ОС.

²Проект art-gui позволяет работать с арт в графическом окружении.

³Для работы необходим MATLAB.

⁴Присутствует бесплатная версия для использования в образовательном процессе.

⁵Согласно [16] часть функций для анализа отсутствует в PIPE 5.

⁶Имитация возможна при использовании art-gui.

3. Наличие в ПО графического интерфейса (*графический интерфейс*).

4. Возможность добавления новых функций в ПО путем создания пользовательских модулей (*поддержка сторонних библиотек*).

5. Тип лицензии, под которой распространяется ПО (*тип лицензии*).

6. Поддержка формата PNML (*PNML*).

7. Возможность построения (синтеза) СП на основе каких-либо входных данных.

7.1. *Синтез СП из графа переходов* — возможность синтеза из графа переходов СП, соответствующей выбранным пользователем свойствам (таким как безопасность, живость и т. д.).

8. Возможность анализа СП (*ДДР*).

8.1. *Оценка свойств сетей* — возможность анализа СП на ограниченность, однородность и т. д.

8.2. *ДДР* — возможность построения дерева достижимых разметок для СП.

8.3. *Матричное представление* — возможность представления СП в матричном виде.

8.4. *Имитация работы* — возможность пошаговой имитации работы СП.

8.5. *Верификация* — возможность верификации СП.

9. Возможность работы с расширениями СП (*расширения СП*).

Заключение

В статье проведен сравнительный анализ некоторых используемых в настоящее время средств для работы с сетями Петри. По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

CPN Tools используется в большом числе реальных проектов и, пожалуй, является наиболее известным ПО для работы с СП [2, 3]. В силу своих возможностей данное ПО может быть использовано для проектирования систем со сложным взаимодействием между компонентами. Ввиду того, что этот продукт не является кроссплатформенным, он может быть запущен только на Windows [20]. Также стоит заметить, что ПО обладает своеобразным интерфейсом, который бывает непривычен новичкам.

AnyLogic и MATLAB обладают широким функционалом, позволяющим исследовать не только СП. Благодаря этому данные продукты дают специалисту большие возможности при условии приобретения коммерческой лицензии [8]. Стоит заметить, что для работы в этих

средах с СП необходима установка дополнительных расширений [18, 21, 22].

АРТ является достаточно функциональным и (что немаловажно) кроссплатформенным продуктом [14]. Однако данное ПО не обладает графическим интерфейсом (доступна только командная строка). Таким образом, чтобы воспользоваться его функционалом через графический интерфейс, пользователю придется воспользоваться проектом ART-GUI [14, 15]. АРТ может быть использован, во-первых, как ПО для проектирования дискретно-событийных систем и, во-вторых, как библиотека в разрабатываемых проектах [11, 14].

АРО отличается тем, что обладает простым интерфейсом и запускается прямо в браузере [17]. Данный продукт подойдет для использования в образовательном процессе в целях обучения основам аппарата СП.

PIPE обладает графическим интерфейсом, широким функционалом и может быть запущен на различных платформах [16, 24]. Кроме того, пользователь дополнительно может расширить функционал PIPE с помощью подключаемых модулей [24]. Данный программный продукт может быть использован при проектировании сложных систем, анализ которых подразумевает вероятностные и временные оценки.

ТАРААЛ является кроссплатформенным ПО, обладающим графическим интерфейсом, основанным на наработках проекта PIPE [13, 26]. Данный программный продукт может быть использован, если есть необходимость работать с СП с синхронизированными дугами, в которых метки могут быть связаны с функциями времени [13, 27].

В заключение можно отметить, что аппарат СП в настоящее время остается актуальным средством формализации, анализа и моделирования дискретно-событийных систем разного уровня сложности, и для работы с ним существует набор постоянно развивающихся функционально ориентированных программных модулей.

Список литературы

1. Булавский П. Е., Ваисов О. К. Формализация процессов электронного документооборота технической документации с помощью сетей Петри // Автоматика на транспорте. 2018. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-protseessov-elektronnogo-dokumentooborota-tehnicheskoy-dokumentatsii-s-pomoschyu-setey-petri> (дата обращения: 02.04.2020).

2. Дмитриев В. Н., Тушнов А. С., Сергеева Е. В. Имитационное моделирование системы мониторинга многозвенной сети передачи данных // Вестник АГТУ. Серия: Управление,

вычислительная техника и информатика. 2013. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-sistemy-monitoringa-mnogozvennoy-seti-peredachi-dannyh> (дата обращения: 02.04.2020).

3. **Зайцев Д. А., Шмелева Т. Р.** Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools: Учеб. пособ. по курсу "Математическое моделирование информационных систем" для подготовки магистров в отрасли связи. Одесса: ОНАТ, 2006. 60 с.

4. **Калугин А. И.** Оптимизационный эксперимент в среде AnyLogic // Наука и школа. 2015. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsionnyu-eksperiment-v-srede-anylogic> (дата обращения: 02.04.2020).

5. **Маликов Р. Ф.** Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6 / Учеб. пособ. Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. 296 с.

6. **Питерсон Дж.** Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.

7. **О компании** — инструмент имитационного моделирования AnyLogic // AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. URL: <https://www.anylogic.ru/company/about-us/> (дата обращения: 03.10.2020).

8. **Скачать** — инструмент имитационного моделирования AnyLogic // AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. URL: <https://www.anylogic.ru/downloads/> (дата обращения: 03.10.2020).

9. **Amparore E., Berthomieu B., Ciardo G., Dal Zilio S., Galil F., Hillah L. M., Hulin-Hubard F., Jensen P. G., Jezequel L., Kordon F., Le Botlan D., Liebke T., Meijer J., Miner A., Paviot-Adet E., Srba J., Thierry-Mieg Y., van Dijk T., Wolf K.** Presentation of the 9th Edition of the Model Checking Contest // TACAS 2019: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol. 11429. P. 50—68. doi:10.1007/978-3-030-17502-3_4.

10. **apt/extending.md** at master · CvO-Theory/apt · GitHub. URL: <https://github.com/CvO-Theory/apt/blob/master/doc/extending.md> (дата обращения: 28.09.2020).

11. **apt/obtaining.md** at master · CvO-Theory/apt · GitHub. URL: <https://github.com/CvO-Theory/apt/blob/master/doc/obtaining.md> (дата обращения: 13.09.2020).

12. **Billington J., Christensen S., van Hee K., Kindler E., Kummer O., Petrucci L., Post R., Stehno C., Weber M.** The Petri Net Markup Language: Concepts, Technology, and Tools // ICATPN 2003: Applications and Theory of Petri Nets 2003. Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2679. P. 483—505. doi:10.1007/3-540-44919-1_31.

13. **David A., Jacobsen L., Jacobsen M., Jørgensen K. Y., Møller M. H., Srba J.** (2012) TAPAAL 2.0: integrated development environment for timed-arc Petri nets // TACAS 2012: Tools

and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Lecture Notes in Computer Science. 2012. Vol. 7214. P. 492—497. doi:10.1007/978-3-642-28756-5_36.

14. **Best E., Schlachter U.** Analysis of Petri Nets and Transition System // ICE 2015: 8th Interaction and Concurrency Experience, EPTCS 189. P. 53—67. doi:10.4204/EPTCS.189.6.

15. **GitHub** — CvO-Theory/apt-gui. URL: <https://github.com/CvO-Theory/apt-gui> (дата обращения: 20.04.2020).

16. **GitHub** — sarahtattersall/PIPE: PIPE — Platform Independent Petri Net Editor. URL: <https://github.com/sarahtattersall/PIPE> (дата обращения: 20.07.2020).

17. **GitHub** — stromhalm/apo: An Application for online Petri net design and analysis. URL: <https://github.com/stromhalm/apo> (дата обращения: 20.07.2020).

18. **Leskovar R., Tanzler J., Bicher M.** Petri Net Modeling and Simulation in AnyLogic and MATLAB for ARGESIM Benchmark C4 "Dining Philosophers" // SNE Educational Note. 2014. Vol. 24, N. 1. P. 55—58.

19. **Licenses** — CPN Tools. URL: <http://cpntools.org/category/licenses/> (дата обращения: 02.04.2020).

20. **Linux/Mac OS X** — CPN Tools. URL: <http://cpntools.org/2018/01/15/linux-mac-os-x/> (дата обращения: 02.04.2020).

21. **MATLAB** Petri Net Toolbox — File Exchange — MATLAB Central. URL: https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/petri-net-toolbox.html (дата обращения: 02.04.2020).

22. **Matcovschi M. H., Mahulea C., Pastravanu O.** Petri Net Toolbox for MATLAB // Proceedings of the 11th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation MED'03. URL: https://www.researchgate.net/publication/242388510_Petri_Net_Toolbox_for_MATLAB (дата обращения 11.06.2020).

23. **Westergaard M.** CPN Tools 4: Multi-formalism and Extensibility // Application and Theory of Petri Nets and Concurrency, vol. 7927 pp. 400—409. Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-38697-8_22.

24. **Dingle N. J., Knottenbelt W. J., Suto T.** PIPE2: A Tool for the Performance Evaluation of Generalised Stochastic Petri Nets (PDF format). ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review (Special Issue on Tools for Computer Performance Modelling and Reliability Analysis). March 2009. Vol. 36(4). P. 34—39.

25. **tapaal.net**: Download. URL: <http://www.tapaal.net/download/> (дата обращения: 27.07.2020).

26. **tapaal.net**: Features. URL: <http://www.tapaal.net/features/> (дата обращения: 21.07.2020).

27. **tapaal.net**: Introduction. URL: <http://www.tapaal.net/> (дата обращения: 18.09.2020).

28. **WineHQ** — Run Windows applications on Linux, BSD, Solaris and macOS. URL: <https://www.winehq.org/> (дата обращения: 03.10.2020).

V. P. Kulagin, D. Tech. Sc., Professor, e-mail: kulagin@mirea.ru,
A. A. Loginov, Postgraduate Student, e-mail: loginov.a.a@edu.mirea.ru,
RTU MIREA, Moscow, 107996, Russian Federation

Analysis of Software Tools for Working with Petri Nets

There is provides an overview of the existing software for modeling using Petri nets. The features of the Petri nets and the advantages of its use are presented. The relevance of the development and use of tools for working with Petri nets is reasonable. A comparative analysis of the capabilities of software tools, including a comparison of the analysis and synthesis functions, the capabilities of creating libraries, cross-platform support, etc. Conclusions are drawn about the spheres of application of the described software.

Keywords: petri nets, discrete-event simulation, petri net modeling software, CPN Tools, AnyLogic, MATLAB, APT, APO, PIPE, TAPAAL, Timed-Arc Petri net, Coloured Petri net

References

1. **Bulavskii P. E., Vaisov O. K.** Formalization of electronic document management processes for technical documentation using Petri nets, *Avtomatika na Transporte*, 2018, no. 4, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-protseessov-elektronnogo-dokumentooborota-tehnicheskoy-dokumentatsii-s-pomoschyu-setey-petri> (date of access: 02.04.2020, in Russian).
2. **Dmitriev V. N., Tushnov A. S., Sergeeva E. V.** Simulation modeling of a multi-link data transmission network monitoring system, *Vestnik AGTU, Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, no. 2, 2013, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-sistemy-monitoringa-mnogozvennoy-seti-peredachi-dannyh> (date of access: 02.04.2020, in Russian).
3. **Zaitsev D. A., Shmeleva T. R.** Simulating of telecommunication systems with CPN Tools, Odessa, ONAT, 2006, 60 p. (in Russian).
4. **Kalugin A. I.** Optimization experiment in the AnyLogic environment (Optimizatsionnyi eksperiment v srede AnyLogic), *Nauka i shkola*, no. 4, 2015, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsionnyy-eksperiment-v-srede-anylogic> (date of access: 02.04.2020, in Russian).
5. **Malikov R. F.** Workshop on simulation of complex systems in the AnyLogic 6 environment, Ufa, BGPU, 2013, 296 p. (in Russian).
6. **Peterson J.** Petri net theory and system modeling, Moscow, Mir, 1984, 264 p. (in Russian).
7. **About us** — AnyLogic Simulation Software, available at: <https://www.anylogic.ru/company/about-us/> (date of access: 03.10.2020)
8. **Downloads** — AnyLogic Simulation Software, available at: <https://www.anylogic.ru/downloads/> (date of access: 03.10.2020).
9. **Amparore E., Berthomieu B., Ciardo G., Dal Zilio S., Galli F., Hillah L. M., Hulin-Hubard F., Jensen P. G., Jezequel L., Kordon F., Le Botlan D., Liebke T., Meijer J., Miner A., Paviot-Adet E., Srba J., Thierry-Mieg Y., van Dijk T., Wolf K.** Presentation of the 9th Edition of the Model Checking Contest, *TACAS 2019: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, Lecture Notes in Computer Science, 2019*, vol. 11429, pp. 50–68, Cham, Springer, doi:10.1007/978-3-030-17502-3_4.
10. **apt/extending.md** at master · CvO-Theory/apt · GitHub, available at: <https://github.com/CvO-Theory/apt/blob/master/doc/extending.md> (date of access: 28.09.2020).
11. **apt/obtaining.md** at master · CvO-Theory/apt · GitHub, available at: <https://github.com/CvO-Theory/apt/blob/master/doc/obtaining.md> (date of access: 13.09.2020).
12. **Billington J., Christensen S., van Hee K., Kindler E., Kummer O., Petrucci L., Post R., Stehno C., Weber M.** The Petri Net Markup Language: Concepts, Technology, and Tools, *ICATPN 2003: Applications and Theory of Petri Nets 2003, Lecture Notes in Computer Science, 2003*, vol. 2679, pp. 483–505, Berlin, Heidelberg, Springer, doi:10.1007/3-540-44919-1_31.
13. **David A., Jacobsen L., Jacobsen M., Jørgensen K. Y., Møller M. H., Srba J.** (2012) TAPAAL 2.0: integrated development environment for timed-arc Petri nets, *TACAS 2012: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, Lecture Notes in Computer Science, 2012*, vol. 7214, pp. 492–497, Berlin, Heidelberg, Springer, doi:10.1007/978-3-642-28756-5_36.
14. **Best E., Schlachter U.** Analysis of Petri Nets and Transition System, *ICE 2015: 8th Interaction and Concurrency Experience, EPTCS 189*, pp. 53–67, doi:10.4204/EPTCS.189.6.
15. **GitHub** — CvO-Theory/apt-gui, available at: <https://github.com/CvO-Theory/apt-gui> (date of access: 20.04.2020).
16. **GitHub** — sarahtattersall/PIPE: PIPE — Platform Independent Petri Net Editor, available at: <https://github.com/sarahtattersall/PIPE> (date of access: 20.07.2020).
17. **GitHub** — stromhalm/apo: An Application for online Petri net design and analysis, available at: <https://github.com/stromhalm/apo> (date of access: 20.07.2020).
18. **Leskovar R., Tanzler J., Bicher M.** Petri Net Modeling and Simulation in AnyLogic and MATLAB for ARGESIM Benchmark C4 "Dining Philosophers", *SNE Educational Note, 2014*, vol. 24, N. 1. P. 55–58.
19. **Licenses** — CPN Tools, available at: <http://cpntools.org/category/licenses/> (date of access: 02.04.2020).
20. **Linux/Mac OS X** — CPN Tools, available at: <http://cpntools.org/2018/01/15/linux-mac-os-x/> (date of access: 02.04.2020).
21. **MATLAB Petri Net Toolbox** — File Exchange — MATLAB Central, available at: https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/petri-net-toolbox.html (date of access: 02.04.2020).
22. **Matcovschi M. H., Mahulea C., Pastravanu O.** Petri Net Toolbox for MATLAB, *Proceedings of the 11th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation MED'03*, available at: https://www.researchgate.net/publication/242388510_Petri_Net_Toolbox_for_MATLAB (date of access 11.06.2020).
23. **Westergaard M.** CPN Tools 4: Multi-formalism and Extensibility, *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency*, vol. 7927, pp. 400–409, Berlin, Heidelberg, Springer, doi:10.1007/978-3-642-38697-8_22.
24. **Dingle N. J., Knottenbelt W. J., Suto T.** PIPE2: A Tool for the Performance Evaluation of Generalised Stochastic Petri Nets (PDF format), *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review (Special Issue on Tools for Computer Performance Modelling and Reliability Analysis)*, March 2009, vol. 36(4), pp. 34–39.
25. **tapaal.net**: Download, available at: <http://www.tapaal.net/download/> (date of access: 27.07.2020).
26. **tapaal.net**: Features, available at: <http://www.tapaal.net/features/> (date of access: 21.07.2020).
27. **tapaal.net**: Introduction, available at: <http://www.tapaal.net/> (date of access: 18.09.2020).
28. **WineHQ** — Run Windows applications on Linux, BSD, Solaris and macOS, available at: <https://www.winehq.org/> (date of access: 03.10.2020).