

УДК 004.942

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ НА СЕТЯХ ПЕТРИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.П. Орлов, С.В. Сусарев*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: orlovsp1946@gmail.com

Аннотация. Обзор посвящен анализу подходов и методов применения имитационных моделей при организации технического обслуживания и ремонта сложных технических объектов и систем. Развитие концепции «Индустрия 4.0» и Интернета вещей предполагает переход от периодического и профилактического технического обслуживания к прогнозному обслуживанию на основе исследования процессов при эксплуатации объектов. В статье показано, что системные модели на сетях Петри удобны для описания и анализа технологических процессов и обслуживания оборудования. Виртуальные испытания и виртуальный ввод в эксплуатацию являются одним из этапов проектирования и производства технических объектов повышенной сложности. В связи с этим актуально создание имитационных моделей в составе цифровых двойников агрегатов и узлов для исследования технических состояний. Проведенный анализ показал эффективность использования временных стохастических раскрашенных сетей Петри как цифровых двойников для виртуальных испытаний. На основе иерархических сетей Петри можно строить сложные модели, описывающие взаимосвязанные процессы между подсистемами и агрегатами изделий. Разработана общая модель в виде иерархической сети, предназначенная для исследования процессов старения, износа и деградации агрегатов и элементов технического объекта, а также формирования стратегии прогнозного обслуживания. Модель включает диаграмму Ганта выполнения производственных задач, множество активных и резервных агрегатов, модули технического обслуживания и ремонта. Рассмотрены примеры имитационных моделей на сетях Петри для различных технических систем. Приведены решения для гибких производственных систем, железнодорожных мостов, морских ветряных турбин, парка самолетов, группы роботизированных автомобилей, комплекса компьютерной техники предприятия. Рассмотрены модели различных стратегий технического обслуживания и показана общность моделей, основанных на иерархических сетях Петри. Проведен анализ существующих программных средств для реализации временных стохастических раскрашенных сетей Петри. В заключение сделан вывод о перспективности применения имитационных моделей на сетях Петри для организации технического обслуживания и ремонта сложных технических объектов и систем.

Ключевые слова: системный анализ, киберфизические системы, прогнозное техническое обслуживание, стратегия обслуживания «каннибализация», виртуальные

* Орлов Сергей Павлович, профессор кафедры «Вычислительная техника», доктор технических наук.

Сусарев Сергей Васильевич, и.о. зав. кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами», кандидат технических наук.

Введение

Современные сложные киберфизические системы оснащены подсистемами мониторинга параметров и средствами коммуникации с удаленными системами обработки информации и управления [1]. Это обеспечивает переход от периодического технического обслуживания (ТО) к прогнозному, или предсказательному ТО (Predictive Maintenance), которое является компонентом концепции «Индустрия 4.0» и использует технологию «Интернет вещей» (IoT-технология) [2–4].

Современный подход к управлению жизненным циклом технического объекта включает в себя базовую компоненту – виртуальный ввод в эксплуатацию изделия (Virtual Commissioning) [5, 6]. Виртуальный ввод в эксплуатацию охватывает широкий спектр задач: от создания концепции и конструкции изделия до проектирования производственных линий и цехов.

Одним из компонентов виртуального ввода являются виртуальные испытания на основе «цифровых двойников» и широкого использования имитационного моделирования. Создание моделей износа и деградации элементов конструкции в сочетании с обработкой больших объемов данных о техническом состоянии анализируемых агрегатов обеспечивает раннее обнаружение и прогнозирование отказов оборудования. Применение имитационных моделей процесса работы агрегатов на этапе виртуального ввода в эксплуатацию дает возможность сформировать эффективную стратегию технического обслуживания, определить оптимальный баланс между затратами на проведение технологических операций и величиной потенциальных потерь от отказа оборудования.

В настоящей статье рассматриваются современные подходы к моделированию технического обслуживания и ремонта различных сложных технических объектов, объединенные использованием аппарата сетей Петри различных модификаций.

1. Имитационное моделирование прогнозного технического обслуживания агрегатов технических систем

Для описания и исследования процессов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта наиболее подходят дискретно-событийные системы. Такие модели имитируют поведение системы, рассматривая события, происходящие в определенные моменты времени, в соответствии с заданными детерминированными или случайными законами. Хотя многие процессы, определяющие техническое состояние объектов, являются непрерывными и носят вероятностный характер, в дискретно-событийных системах моделирования рассматриваются дискретные потоки событий отказов или появления дефектов.

Анализ известных работ в области организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР) показал, что в последний период времени все больше исследователей обращаются к моделям на сетях Петри [7–9]. Используются различные модификации сетей Петри, при этом наиболее эффективными являются временные раскрашенные сети Петри TCPN (Timed Colored Petri Nets) [10].

Формальное определение раскрашенной сети Петри (Colored Petri Net, CPN) [10]:

$$CPN = (P, T, A, C, V, S, G, E, I, \mu), \quad (1)$$

где P – конечное множество позиций; T – конечное множество переходов; $A \subseteq P \times T \cup T \times P$ – множество направленных дуг; C – конечное непустое множество цветов; V – конечное множество типов переменных цветов, таких, что $\text{Type } [v] \in C$ для всех $v \in V$, $S: P \rightarrow C$ – это функция набора цветов для каждой позиции, $G: T \rightarrow \text{EXPR}T$ – функция условий, которая назначает условия для срабатывания каждому переходу, так, что $\text{Type } [G(t)] = \text{Bool}$, $E: A \rightarrow \text{EXPR}A$ – функция, которая присваивает каждой дуге некоторое выражение $\text{EXPR}A$, $I: P \rightarrow \text{EXPR}P$ – это функция инициализации, которая назначает выражение инициализации $\text{EXPR}P$ каждой позиции p , такое, что $\text{Type } [I(p)] = C(p)$, $\mu: P \rightarrow N$ – маркировка сети, задающая количество фишек (маркеров) в позициях.

Временная цветная сеть Петри TCPN является расширением сети, описанной выражением (1):

$$\text{TCPN} = (\text{CPN}, \Theta 1, \Theta 2, \Theta 3), \quad (2)$$

где CPN – основная раскрашенная сеть Петри; $\Theta 1$, $\Theta 2$, и $\Theta 3$ – временные задержки, приписанные местам, дугам и переходам сети соответственно.

Технологические процессы являются стохастическими из-за воздействия многих внешних случайных факторов. Среди применений сетей Петри следует выделить построение стохастических сетей Петри (Stochastic Colored Petri Net, SCPN) для изучения процессов деградации, старения и износа различных узлов, механизмов и машин. Изучение этих явлений и процессов необходимо для организации технического обслуживания и ремонта. Во многих работах были проведены исследования по созданию сетей Петри для моделирования случайных событий с заданными распределениями плотности вероятности. В результате были разработаны различные модификации стохастических раскрашенных сетей Петри.

Ключевым достоинством стохастических сетей Петри является возможность имитировать различные случайные события. Это обеспечивается с помощью механизма назначения выражений позициям, переходам и дугам в сети. В соответствии с определением (1) выражения типа EXPR на выходных дугах переходов представляют собой конструкторы для создания новых фишек по заданному закону.

Рассмотрим ряд применений стохастических раскрашенных сетей Петри для исследования надежности систем, прогноза состояний, организации технического обслуживания.

В статье [11] Santos F. и др. разработали обобщенные сети SCPN с предикатами для моделирования методом Монте-Карло. Время до отказа компонентов считается распределенным по закону Вейбулла. Marsan M. [12] предложил моделировать случайные процессы на переходах сети Петри с помощью задержек с отрицательными экспоненциальными функциями плотности вероятности.

Стохастические цветные сети Петри используются для широкого класса объектов, особенно при оценке ремонтпригодности и надежности. Lu Z. и др. в работах [13–15] исследовали применение кортежей SCPN и вычисление требуемых ресурсов в соответствии с уравнениями состояния модели. Расходные и повторно используемые ресурсы представлены в виде мультимножеств в позициях стохастической сети Петри. Моделирование технического обслуживания позволяет оценить потребности в ресурсах на каждом этапе эксплуатации агрегатов.

Известны примеры эффективного использования SCPN при изучении обслуживания системы совместного использования электромобилей [16], исследова-

нии деградации и разрушения керамических покрытий [17] и моделировании киберфизических систем [18]. Разрабатываются имитационные модели на SCPN, в которых интегрируются модели надежности и модели физических явлений с тем, чтобы отслеживать эволюцию состояния защиты плотин от природных явлений и улучшать процессы принятия решений по техническому обслуживанию гидросооружений [19].

Иерархические сети (Hierarchical Petri Net, HPN) являются обобщением сетей Петри и служат для моделирования киберфизических систем с ярко выраженной иерархической организацией [20, 21]. Иерархическая сеть в отличие от обыкновенных сетей Петри содержит переходы двух типов: простые и составные (подстановочные). В составные переходы могут быть вложены другие, возможно, также иерархические, сети. Срабатывание такого перехода характеризует выполнение полного жизненного цикла вложенной сети.

2. Комплекс моделей процесса технического обслуживания агрегатов

В общем случае комплекс имитационных моделей для виртуальных испытаний и организации технического обслуживания и ремонта представляет собой цифровые двойники агрегатов A_1, \dots, A_N , выполняющих наборы производственных задач Z_1, \dots, Z_N соответственно (рис. 1). Кроме того, комплекс содержит имитационный модуль операций ТОиР, а также имитационные модели процессов износа, деградации и отказов агрегатов.

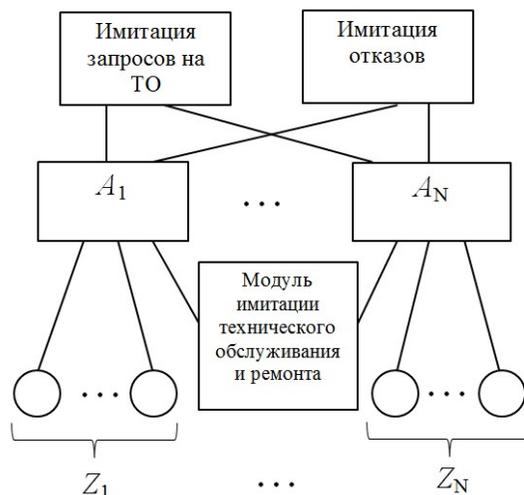


Рис. 1. Комплекс имитационных моделей для организации ТОиР

Процессы эксплуатации агрегатов и их технического обслуживания и ремонта можно представить в виде графовой модели, пример которой приведен на рис. 2.

Множество всех агрегатов технического объекта обозначим как $A_U = (A_1, \dots, A_N)$. При этом $A = \{A_j\}$ – подмножество активных агрегатов, работающих в данный момент; $A^T = \{A_j^T\}$ – подмножество агрегатов, находящихся в состоянии ТО или ремонта; $A^R = \{A_j^R\}$ – подмножество резервных агрегатов, которые могут быть использованы в эксплуатации: $A_U = A \cup A^T \cup A^R$. Произ-

водственные задачи $Z = \{z_1, \dots, z_K\}$ выполняются в соответствии с диаграммой Ганта процесса эксплуатации. Для выполнения ТОиР используются повторно используемые ресурсы R_1 и расходные ресурсы R_2 .

Во многих случаях для оперативного обслуживания или ремонта могут использоваться мобильные станции технического обслуживания МСТО. Они обеспечивают обслуживание агрегатов на месте их расположения. Это характерно для автомобильного и железнодорожного транспорта, нефте- и газоперекачивающего оборудования, ветряных установок производства электроэнергии и др.

Приведенная графовая модель может служить основой для построения имитационных моделей на сетях Петри.

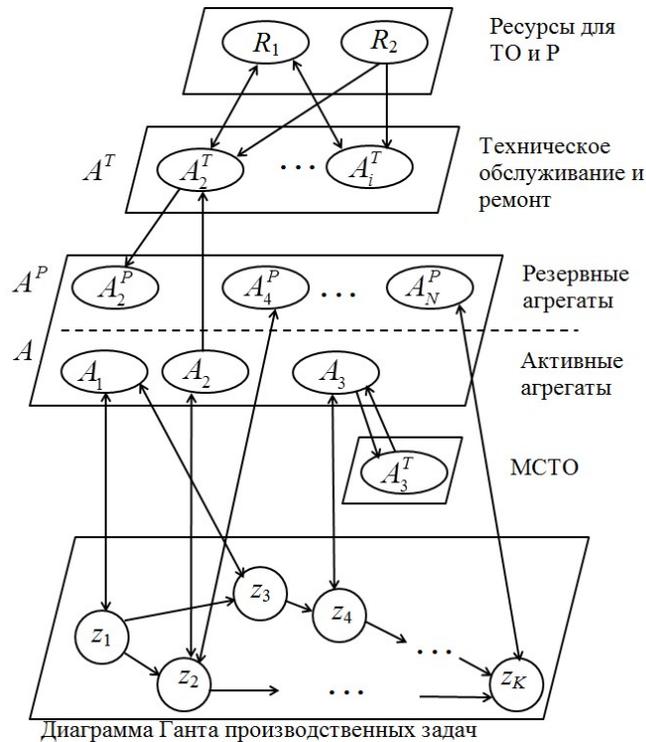


Рис. 2. Взаимосвязь компонентов системы эксплуатации агрегатов или изделий

Наиболее перспективен подход, базирующийся на использовании иерархической сети Петри для описания взаимодействующих гетерогенных систем и объектов. В этом случае возможны две стратегии создания иерархической сети: восходящая разработка и нисходящая разработка. В первом случае разрабатываются отдельные, достаточно простые модели, которые используются затем как составные переходы, образуя более сложную сеть Петри. Во втором случае создание общей модели начинается с формирования высоких уровней иерархии. Затем каждый составной переход заменяется низкоуровневой моделью.

Для многих приложений вид иерархической сети Петри для моделирования ТОиР имеет общую структуру, которая показана на рис. 3. На верхнем уровне находятся модели агрегатов или объектов в виде «цифровых двойников», которые описывают внутреннюю динамику функционирования. На этом же уровне

реализуется модуль, связывающий график производственного или технологического процесса с назначением конкретных агрегатов определенным задачам в заданные периоды времени. На этом этапе могут использоваться методы дискретной оптимизации для решения задачи о назначениях. Пример использования оптимизационно-имитационного подхода для решения аналогичной проблемы приведен в работе [22]. В результате получаем распределение активных агрегатов по задачам и формирование множества резервных агрегатов.

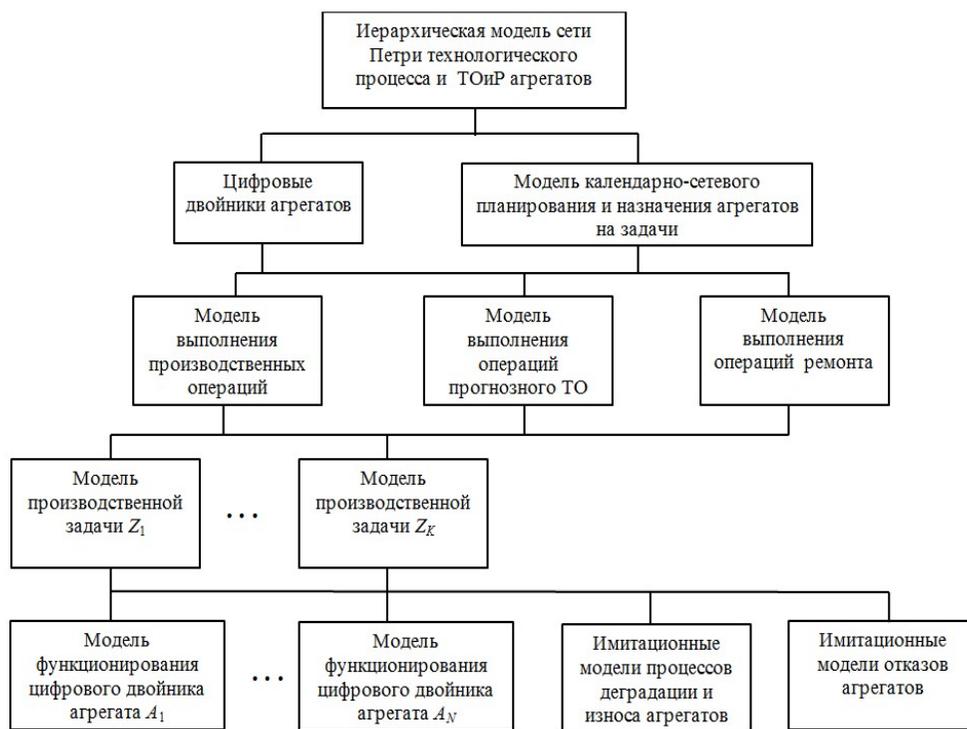


Рис. 3. Структура иерархической модели на сетях Петри

На следующих уровнях формируются имитационные модели Петри по каждой производственной операции, а также для операций технического обслуживания и ремонта. Нижний уровень иерархии содержит детальные модели цифровых двойников с помощью представления цветных позиций сети Петри в виде совокупности мультимножеств узлов и агрегатов.

Основная функция этих моделей – анализ выполнения процессов и определение временных показателей:

- время работы агрегата после последнего обслуживания или ремонта;
- остаточный ресурс;
- оставшееся время до технического обслуживания по расписанию;
- начальный момент времени нового периода эксплуатации;
- суммарное время наработки агрегата,

которые используются для управления остаточным сроком службы агрегата и определения регламента технического обслуживания.

Задание различных распределений случайных событий обеспечивает моделирование износа, деградации и дефектов в узлах и агрегатах.

3. Применение моделей на стохастических временных раскрашенных сетях Петри для анализа технического обслуживания и ремонта

В большинстве рассмотренных источников имитационные модели на раскрашенных сетях Петри реализуются с помощью программного средства CPN Tools [23]. Указанный инструмент имеет развитый графический интерфейс, достаточно понятный язык программирования модели, широкие функциональные возможности, в том числе для имитации различных случайных законов распределения вероятностей событий.

3.1. Гибкие производственные системы

Сетевая модель Петри обеспечивает интуитивно понятное графическое представление сложной динамической системы.

Среди множества практических приложений сетей Петри выделяются работы, связанные с моделированием гибких производственных систем. В ранних работах была продемонстрирована эффективность различных сетей Петри для моделирования производственных систем с целью прогнозирования дефектов и отказов элементов и узлов [24–26]. Затем были созданы новые средства для исследования гибких производственных систем, которые позволили моделировать процессы деградации и износа оборудования [27, 28].

Guo Z. и др. разработали метод самоадаптивной совместной работы для обеспечения высокого уровня сотрудничества между производственными процессами и логистикой в гибкой производственной системе [29]. Используются временные цветные сети Петри для производственно-логистических систем с поддержкой Интернета вещей. Метод сочетает в себе график последовательностей цветных фишек во временной цветной сети Петри с текущим статусом ключевого производственного и логистического оборудования. На рис. 4 показана временная раскрашенная сеть Петри для самоадаптирующейся системы производственных и логистических операций, использующих беспилотные автомобили (БП) [29].

Переходы в сети являются составными и могут описываться вложенными в них сетями Петри. Переходы T_1 и T_3 описывают готовность работ, а переходы T_2 и T_4 – готовность материалов. Задание технологического процесса и логистической операции проводится переходом T_5 . Переходы T_7 и T_9 имитируют выбор БП для перевозки материалов и продукции и формирование маршрута. Моделирование хранения продукции выполняется на переходах T_8 и T_{10} . Завершающие цикл операции движения и разгрузки БП имитируются переходами T_{11} – T_{14} .

Позиции в сети содержат цветные фишки, определяющие условия срабатывания переходов. Позиция P_1 соответствует производственной задаче, а позиция P_2 – исполнителю работ. Позиции P_3 , P_5 и P_7 определяют вид и количество материала. Позиции P_4 описывает готовность исполнителя работ, а P_6 – отсутствие исполнителя. Состояние БП задается фишками в позициях P_8 и P_9 . Набор позиций P_{10} – P_{16} служит для задания условий по выполнению производственной задачи и логистических операций. Позиции P_{17} – P_{22} определяют условия по транспортировке груза к выбранной точке назначения. Завершение операций и начало следующего цикла представляются позицией P_{23} . Дугам a_1 – a_8 назначаются выра-

жения типа условного оператора для задания логики работы моделируемой системы.

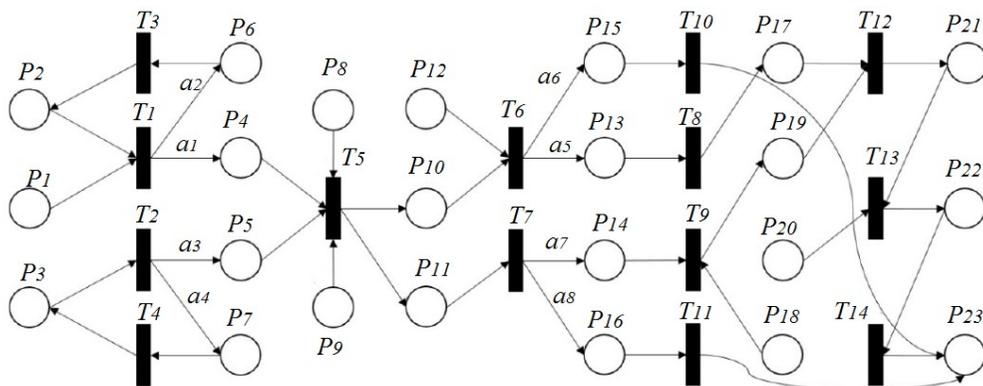


Рис. 4. Сеть Петри для реализации метода самоадаптивной совместной работы

Предложенная модель на временной раскрашенной сети Петри используется для минимизации времени ожидания всех работ, производственного цикла и уменьшение потребления электроэнергии оборудованием и беспилотными автомобилями. Учитываются три ключевых показателя эффективности: время ожидания, срок изготовления изделия и потребление электроэнергии.

С помощью модели, представленной на рис. 4, можно также анализировать параметры надежности и ремонтпригодности оборудования и беспилотных автомобилей. С этой целью разрабатываются сетевые модели нижнего уровня, которые затем подставляются в соответствующие составные переходы основной сети Петри.

3.2. Модели для железнодорожной инфраструктуры

Требования к надежности железнодорожных мостов обусловили внимание исследователей к созданию моделей конструкций мостов и их отдельных компонентов для определения растущих темпов износа из-за увеличения объема трафика и интенсивности нагрузки.

В работах Andrews J., Le B. и др. предложен ряд моделей на базе стохастических временных сетей Петри [30–33]. Модель моста имеет иерархический характер и формируется из подмоделей каждого из компонентов моста. При этом учитывается как износ отдельных компонентов, так и зависимость между процессами износа взаимодействующих компонентов. Время между состояниями в результате ухудшения параметров и проведением технического обслуживания регулируется соответствующими распределениями Вейбулла. Модель сети Петри учитывает процессы деградации, инспекции и ремонта отдельных элементов моста при исследовании альтернативных стратегий обслуживания.

Были введены три новых типа переходов: а) «Переход сброса» уменьшает маркировку заданных позиций до желаемого количества фишек; б) «Условный переход» обеспечивает выбор времени задержки из разных распределений в зависимости от количества фишек в определенной позиции; в) «Оппортунистический переход» можно активировать с помощью фишек различных типов в отличие от классического перехода.

Пример сети Петри для описания состояний железнодорожного моста и процесса ТОиР приведен на рис. 5. Эта подмодель служит для контроля трех видов повреждений:

- выкрашивание поверхности элементов – Surface spalling;
- глубокий скол арматуры – Deep spalling;
- коррозия стальной арматуры – Steel corrosion.

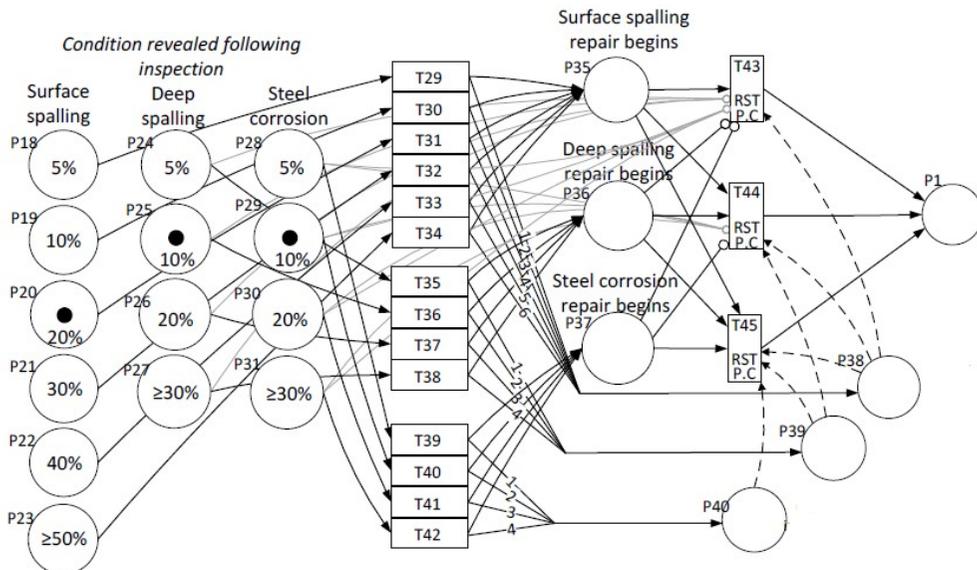


Рис. 5. Сеть Петри для модели технического обслуживания и ремонта железнодорожного моста [30]

Три группы позиций P18–P23, P24–P27 и P28–P31 соответствуют определенным состояниям настила моста. На рис. 5 показана ситуация, когда при осмотре моста обнаруживается 20 % поверхностного выкрашивания (позиция P20), 10 % глубоких сколов (позиция P25) и 10 % коррозии арматурной стали (позиция P29). Переходы T29–T42 управляют временем планирования. Позиции P35–P37 обозначают состояния, в которых фактически начинается ремонт. Переходы T43–T45 генерируют случайные значения времени ремонта, распределенные по двух-параметрическому закону Вейбулла:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right], t \geq 0,$$

где β – параметр формы распределения; η – параметр масштаба распределения случайной величины.

Отметим, что переходы T43–T45 являются специальными условными переходами с реализацией функций сброса и установки условий. В частности, переход T43 регулирует время восстановления после поверхностного выкрашивания. T44 регулирует суммарное время восстановления после поверхностного выкрашивания и глубоких сколов. T45 регулирует общее время ремонта, когда работа включает устранение всех трех видов повреждений. Позиции P38–P40 являются условными позициями, связанными с переходами T43–T45 с помощью пунктир-

ных стрелок, поэтому времена срабатывания этих переходов генерируются на основе количества фишек, присутствующих в этих условных позициях.

Имитационный эксперимент на такой модели позволяет определить периоды технического обслуживания и время ремонта для различных сочетаний степени повреждений моста и разных параметров вероятностных процессов износа элементов.

В работе [32] Le B., Andrews J. и Fecarotti C. предлагают сеть Петри, моделирующую процесс оппортунистического обслуживания (Opportunistic maintenance). Оппортунистическое обслуживание касается многокомпонентных систем. Оно заключается в использовании запланированного останова машины или системы для замены не только изношенной детали или дефектного компонента, но также нескольких частей или близлежащих компонентов, которые еще не находятся в критическом состоянии. Замена детали в критическом состоянии дает возможность превентивно заменить другие детали. Причиной такой перегруппировки мероприятий по техническому обслуживанию обычно является стремление к экономии: часто бывает дешевле произвести полную замену нескольких элементов, чем несколько разовых замен в разное время.

На рис. 6 показана сеть Петри для управления различными уровнями ремонта с возможностью оппортунистического обслуживания.

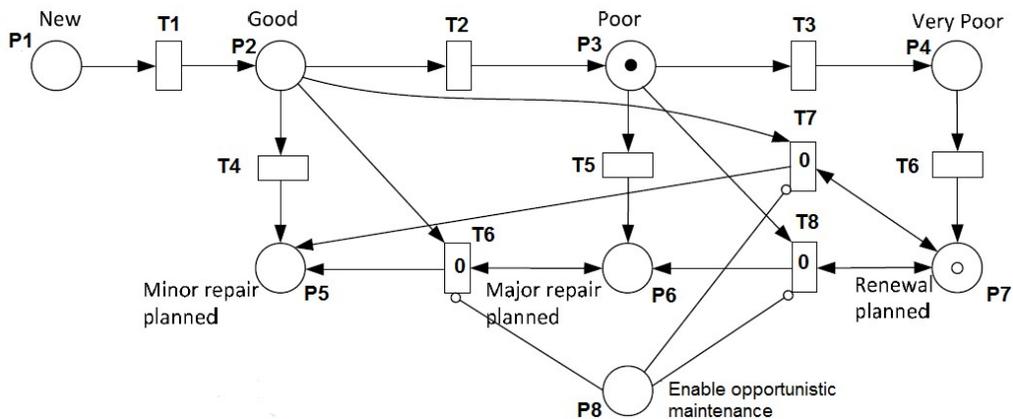


Рис. 6. Сеть Петри для имитации оппортунистического обслуживания [32]: Minor repair – мелкий ремонт; Major repair – капитальный ремонт; Renewal – замена; Enable opportunistic maintenance – готовность к оппортунистическому обслуживанию

Переходы T6, T7 и T8 являются условными переходами, в которых срабатывание зависит от цвета фишек во входных позициях. Белая и черная фишки имитируют два различных элемента моста. В сети Петри моделируется ситуация, когда возникает возможность мелкого ремонта одного элемента при капитальном ремонте или замене другого элемента. Такая сеть может быть преобразована и для обслуживания нескольких элементов.

Моделирование проводилось с использованием метода Монте-Карло с заданными распределениями Вейбулла. Были исследованы четыре стратегии технического обслуживания:

1. Ремонт проводится, как только компонент моста идентифицирован как неисправный.

2. Мелкий ремонт не проводится, рассматриваются только капитальный ремонт и замена.
3. Капитальный ремонт не проводится, рассматриваются только мелкий ремонт и замена.
4. Мелкий и капитальный ремонт не проводятся, рассматривается только замена.

На рис. 7 приведен один из результатов имитационного моделирования на сети Петри, позволяющий оценить различные стратегии обслуживания. Рассматриваются четыре состояния моста: «Новое», «Хорошее», «Плохое», «Очень плохое».

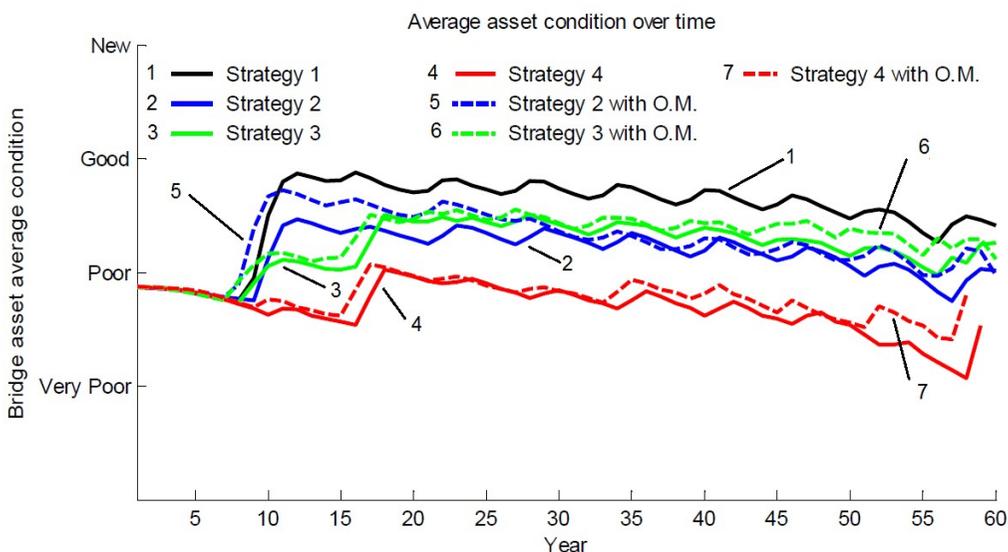


Рис. 7. Влияние различных стратегий ремонта (с оппортунистическим обслуживанием (О.М.) или без него) на состояние элементов моста в среднем [32]

Все графики состояний начинаются в той же точке, что и начальное среднее состояние элементов, близкое к состоянию «Плохое»; при этом предполагается, что каждый компонент подвергается одной и той же стратегии. Так как стратегия 3 предусматривает замену, а также мелкий ремонт, среднее состояние элементов поддерживается на более высоком уровне по сравнению со стратегией 4 и находится между прогнозируемыми средними условиями для стратегий 1 и 2. График также показывает влияние оппортунистического обслуживания. В целом оппортунистическое обслуживание увеличивает вероятность того, что компоненты будут находиться в исправном состоянии. В связи с этим можно ожидать, что политика технического обслуживания с оппортунистическим обслуживанием будет поддерживать состояния элементов с более высокими средними показателями.

Рассмотренный подход к организации технического обслуживания и ремонта мостов был расширен и применен к обслуживанию морских ветровых турбин [34–36]. В статье [36] разработана новая модель технического обслуживания морских ветряных турбин на основе сети Петри для моделирования операций по эксплуатации и техническому обслуживанию на морских ветряных электростан-

циях. С помощью разработанной модели изучаются три новые стратегии технического обслуживания ветряных турбин:

- проведение периодического обслуживания компонентов ветряной турбины в соответствии с их конкретными характеристиками надежности;
- проведение полной проверки всей системы ветряной турбины после капитального ремонта;
- оснащение ветряной турбины системой мониторинга состояния, которая обладает мощными возможностями обнаружения неисправностей.

По результатам исследований на моделях Петри сформированы требования к периодичности контроля и ТОиР турбин.

В работах других ученых сети Петри были успешно использованы:

а) для моделирования и оценки времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики [37];

б) для определения оптимальной стратегии технического обслуживания железнодорожного подвижного состава [38] с помощью аппарата сокращенных сетей Петри (Abridged Petri Nets), которые были введены А. Воловым [39, 40].

3.3. Модели технического обслуживания парка самолетов

Обслуживание парка самолетов представляет собой сложный процесс, включающий политику обслуживания, организацию обслуживания, различные операции и управление ресурсами обслуживания. В работах [41, 42] Sheng J. и Prescott D. развивают иерархическую модель на раскрашенных сетях Петри для организации технического обслуживания самолетов с использованием политики «каннибализма» [43]. Объектами исследования являются самолеты (platforms), которые делятся на две группы: годные к выполнению миссии или задачи (MC – mission-capable) и не готовые к выполнению миссии (NMC – non-mission-capable).

Каннибализация — это деятельность по техническому обслуживанию, которая включает в себя снятие обслуживаемых частей с одного самолета для замены неисправных частей на других самолетах, когда необходимые запасные части недоступны. В результате можно восстановить самолеты, не предназначенные для выполнения задач (NMC), до состояния, пригодного для выполнения задач (MC), за короткое время, когда ресурсов запасных частей парка недостаточно.

Общая структура предложенной авторами модели технического обслуживания парка воздушных судов на базе иерархической раскрашенной сети Петри HCPN представлена на рис. 8.

Модель HCPN состоит из четырех модулей:

- модуль «Парк» моделирует работу парка самолетов, ориентированных на достижение заданных целей;
- модуль «Самолет» имитирует изменения технического состояния самолета;
- модуль «Компонент» имитирует отказы компонентов самолета;
- модуль «Техническое обслуживание» моделирует трехуровневые процессы технического обслуживания парка воздушных судов.

Прямоугольные блоки на рис. 8 являются подстановочными переходами HCPN, которые детализируются и раскрываются путем вложения других сетей Петри.

В статьях [41, 42] предложено и подробно описано большое число частных моделей CPN для всех процессов, обеспечивающих обслуживание самолетов с политиками каннибализации и без каннибализации.

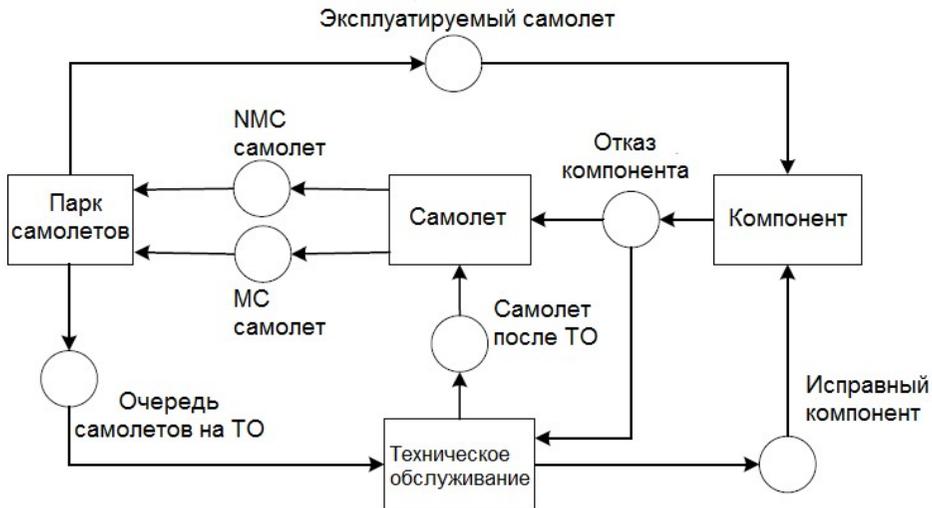


Рис. 8. Структура сети Петри HCPN технического обслуживания парка самолетов [42]

В частности, модуль технического обслуживания, раскрытый на рис. 9, моделирует процесс трехуровневого обслуживания парка с учетом различных политик каннибализации. Он состоит из трех субмодулей: *O*-уровень, *I*-уровень и *D*-уровень обслуживания.

Трехуровневое техническое обслуживание включает организационный (уровень *O*), промежуточный (*I*-уровень) и уровень депо (*D*-уровень), которым в модели соответствуют подстановочные переходы T1, T2 и T3. Когда самолет выходит из строя из-за отказа компонентов, он обычно обслуживается в организации уровня *O*, где его неисправные компоненты удаляются и заменяются запасными частями. Снятые, вышедшие из строя компоненты направляются в ремонтную организацию *I* уровня для ремонта. Вышедшие из строя компоненты, которые не могут быть отремонтированы на уровне *I*, будут отправлены в депо. После ремонта на уровне *I* или уровне *D* неисправные компоненты возвращаются в парк. Поскольку депо может находиться на значительном расстоянии от оперативной базы парка самолетов, политика каннибализации может быть более желательной, если нет организации по техническому обслуживанию *I*-уровня или такая организация не способна отремонтировать многие неисправные компоненты.

Позиции в модели на рис. 9 описывают состояния самолетов и очереди на техническое обслуживание. В свою очередь, подстановочные переходы T1, T2, T3 далее детализируются для имитации событий обслуживания на соответствующих уровнях: *O*, *I* или *D*.

Предложенная авторами модель на раскрашенных сетях Петри была применена к парку самолетов для исследования влияния количества ремонтных бригад на производительность полетов. Это обеспечило предоставление руководству рекомендаций по уровню укомплектованности персоналом технического обслуживания.

На рис. 10 приведены графики, полученные в результате имитационного моделирования. Производительность парка измеряется скоростью выполнения миссии MCR (доля времени, в течение которого самолеты способны выполнять мис-

сии в заданный интервал времени) и частотой прерывания миссии MAR (доля миссий, которые не выполнены из-за аварийных прерываний).

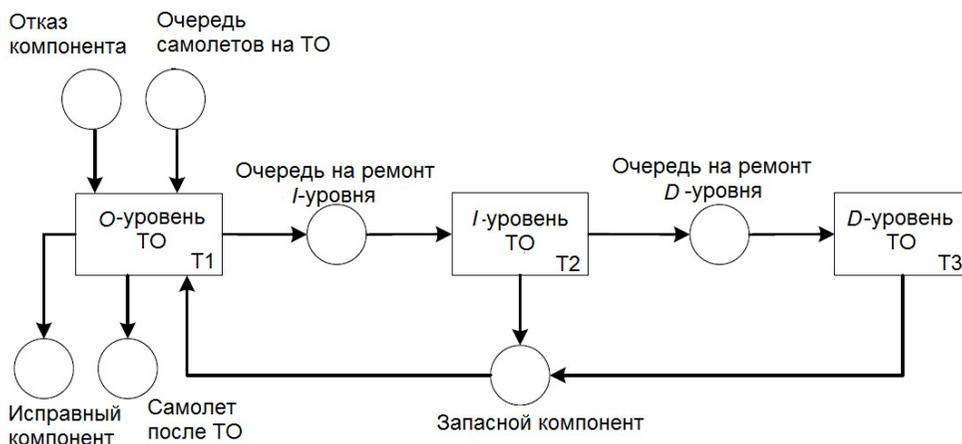


Рис. 9. Имитационная модель уровней технического обслуживания [42]

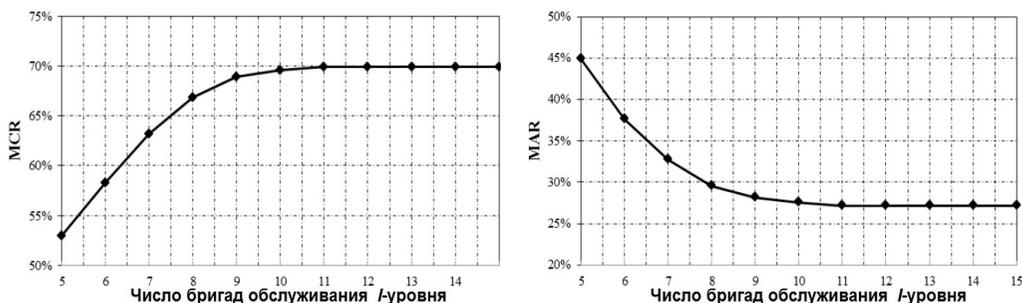


Рис. 10. Результаты имитационного моделирования обслуживания самолетов на I-уровне

Результаты моделирования показывают, что для исследуемого парка самолетов производительность увеличивается с увеличением количества ремонтных бригад, занятых в организации по техническому обслуживанию I-уровня. Это ожидаемо, так как большее число ремонтных бригад I-уровня обеспечивает ремонт в кратчайшее время большего количества вышедших из строя сменных блоков. При этом увеличивается количество готовых к эксплуатации самолетов и уменьшается число наземных отказов. Из рис. 10 видно, что при 11 бригадах, задействованных на I-уровне обслуживания, использование большего количества персонала не дает преимуществ для производительности парка самолетов.

3.4. Сети Петри для виртуальных испытаний и планирования технического обслуживания роботизированных автомобилей агротехнического назначения

Методология применения сетей Петри для исследования эксплуатации и обслуживания была использована при разработке роботизированных сельскохозяй-

ственных автомобилей (РА) в Самарском государственном техническом университете в совместной НИР с ОАО «КАМАЗ». Модели предназначены для проведения виртуальных испытаний РА с целью определения эффективных стратегий технического обслуживания и ремонта [44–47].

В раскрашенных сетях Петри исследуемые объекты описываются цветными фишками в виде мультимножеств. В табл. 1 приведен глобальный набор цветов сети Петри для роботизированного автомобиля, при этом каждый цвет соответствует одному из параметров, определяющих техническое обслуживание РА.

Таблица 1

Набор цветов модели технического обслуживания роботизированного автомобиля

Множество цветов	Элементы множества	Значение
N	$\{n_1, \dots, n_J\}$	Индивидуальный номер автомобиля, J – количество РА
$Model$	$\{m_1, \dots, m_S\}$	Модель РА, S – количество моделей
Mdf	$\{mdf_{1i}, \dots, mdf_{ri}\}, i = \overline{1, S}$	Модификация модели, r – число модификаций i -й модели
mil	$\{mil_j\}, j = \overline{1, J}$	Пробег j -го РА, км
RM	$\{t_{jk}\}, j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K_j}$	Множество периодов времени до технического обслуживания агрегатов j -го РА, K_j – число контролируемых агрегатов в j -м РА
RL	$\{tr_{jk}\}, j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K_j}$	Множество значений остаточных ресурсов узлов и агрегатов j -го РА

Простые множества цветов содержат однородные элементы одного цвета. Составные множества цветов состоят из комбинации простых множеств цветов. Мультимножества содержат элементы с определенной кратностью, то есть имеется несколько копий элемента.

Временные метки для цветных фишек обозначаются как “@η”, где η – количество тактов модельного времени.

В рассматриваемой модели мультимножество определяется по глобальному набору цветов и, например, для двух автомобилей имеет вид

$$1^{(n_1, m_1, mdf_1, rm_1, rl_1)} + 1^{(n_2, m_2, mdf_2, rm_2, rl_2)}$$

Табл. 2 и 3 содержат описание переходов и позиций для имитационной модели процесса эксплуатации, представленной на рис. 11.

На рис. 11 для упрощения описания роботизированного автомобиля используется сокращенное мультимножество цветов $RV = \{N, "Model", Mdf\}$.

На рис. 11 показано состояние модели после 200 циклов выполнения комплекса задач $Z = \{Z_1, \dots, Z_S\}$. Модельное время равно 0,5 часа за 1 такт. В результате статистического эксперимента получаем, что время выполнения задач с учетом ТОиР равно 849 часов притом, что идеальное время (без отказов и ТО) должно быть равно 800 часов. На вывод из эксплуатации и замену РА затрачено 49 часов. При этом видно, что в позицию Reserve поступили два автомобиля: один – после ТО через 251,5 часа, второй – после ремонта через 755 часов от начала работы системы. Также показано, в какие моменты времени в будущем автономный автомобиль будет выведен из эксплуатации: а) запрос на ТО придет через 941 час; б) ремонт потребует через 1188 часов.

Описание переходов в имитационной модели

Переходы	Значение и события
z_1	РА движется к целевой точке (ТР)
z_2	РА маневрирует вблизи ТР после прибытия
z_3	РА выполняет технологическую операцию
z_4	РА маневрирует вблизи ТР при отбытии
z_5	РА движется к базовой точке (ВР)
t_F	Запрос на вывод РА из эксплуатации из-за отказа оборудования
F	Вывод РА из текущей эксплуатации для ремонта
t_Q	Запрос на вывод РА из эксплуатации при техническом обслуживании
M	РА выводится из текущей эксплуатации для технического обслуживания
t_R	Ремонт РА
t_M	Техническое обслуживание РА
R1	Возврат РА из резерва в эксплуатацию после ремонта
R2	Возврат РА из резерва в эксплуатацию после технического обслуживания

Срабатывание перехода t_F определяется законом Пуассона с заданной интенсивностью отказов, а перехода t_Q – равномерным законом случайных событий запросов на ТО.

В иерархической модели обслуживания РА, построенной на принципах, иллюстрированных на рис. 2 и 3, одним из основных submodule является сеть Петри, имитирующая назначение РА на задачи TASK AV и выполнение работ (рис. 12). Для детального описания автомобиля, в свою очередь, использована модель RТА, которая является подстановочным переходом в модуле назначения.

Интерпретация позиций в имитационной модели

Позиции	Содержание позиции
ВР	Базовая точка расположения РА и начало маршрута
Mnv1	Окончание движения по маршруту и готовность маневрирования вблизи ТР
ТР in	Прибытие РА в целевую точку и готовность к выполнению операций
ТР out	Отбытие РА из целевой точки и готовность к маневрированию
Mnv2	Окончание маневрирования и готовность к движению по маршруту
Counter	Счетчик циклов выполнения задач
Vehicle	Номер роботизированного автомобиля. Автомобиль готов к выполнению операций
F	Отказ
M	Запрос на техническое обслуживание
Reserve	Резервные автомобили, готовые к выполнению операций
P1, P2, P3, P4	Вспомогательные позиции
P5	Разрешение на ремонт РА
P6	Разрешение на техническое обслуживание РА

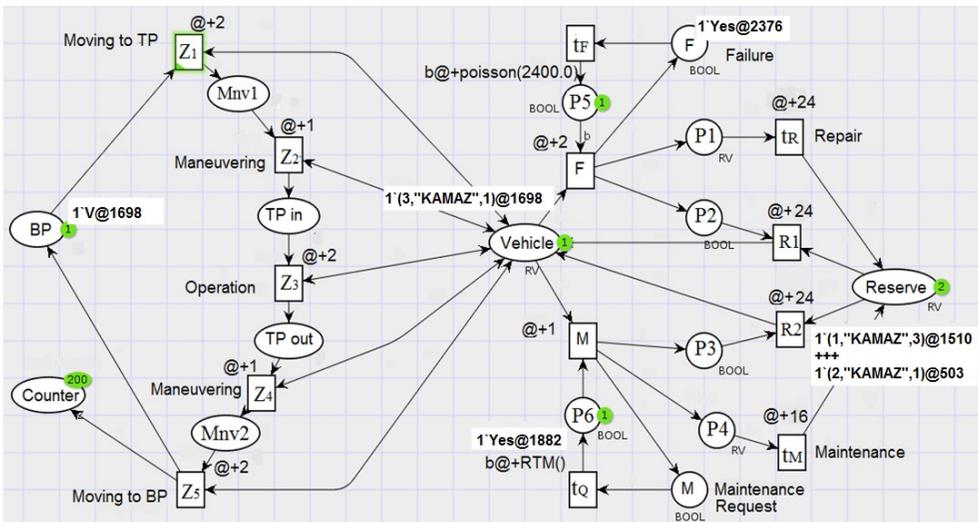


Рис. 11. Сеть Петри SCPN для группы роботизированных автомобилей «КАМАЗ» [46]

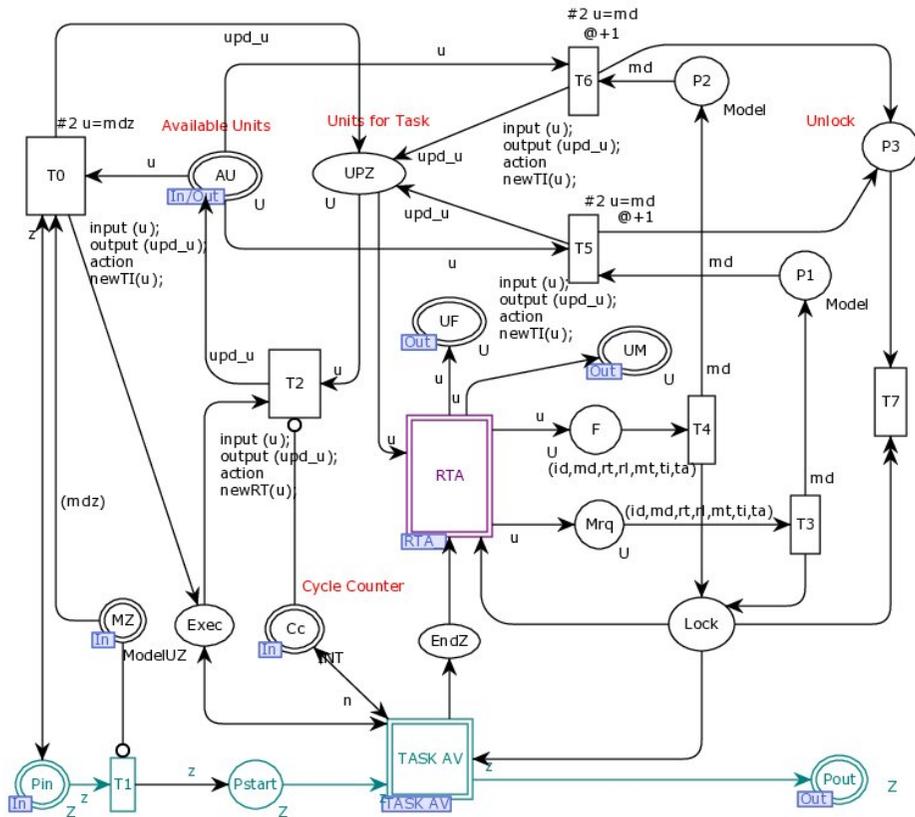


Рис. 12. Модуль назначения РА и имитации процесса эксплуатации [21]

В результате виртуальных испытаний роботизированных автомобилей на иерархической сети Петри определяется комплекс следующих характеристик.

1. Эффективность ремонтпригодности: оценивается по выполнению заданного графика технологического процесса. Для этого в модели используется коэффициент задержки планового срока выполнения задачи, который определяется на сети Петри в ходе статистических испытаний методом Монте-Карло.

2. Задача подбора необходимого множества автомобилей различных моделей и модификаций: базируется на определении относительной загрузки РА при разных сценариях технологического процесса.

3. Количество резервных РА, необходимых для минимизации задержек выполнения задач, связанных с ремонтом или техническим обслуживанием.

4. Стоимость образования резерва автомобилей и величина потерь от приостановки производственных операций.

3.5. Организация эксплуатации и обслуживания компьютерной техники крупного предприятия

Системный характер стохастических раскрашенных сетей Петри обусловил эффективность их применения для моделирования обслуживания и ремонта технических объектов различной природы. Описанная выше методология построения иерархической сети Петри для ТОиР была использована при разработке системы поддержки принятия решений по управлению компьютерной техникой крупного предприятия [48, 49]. Базовый модуль на сети Петри для организации прогнозного обслуживания группы компьютеров в проектном подразделении предприятия приведен на рис. 13.

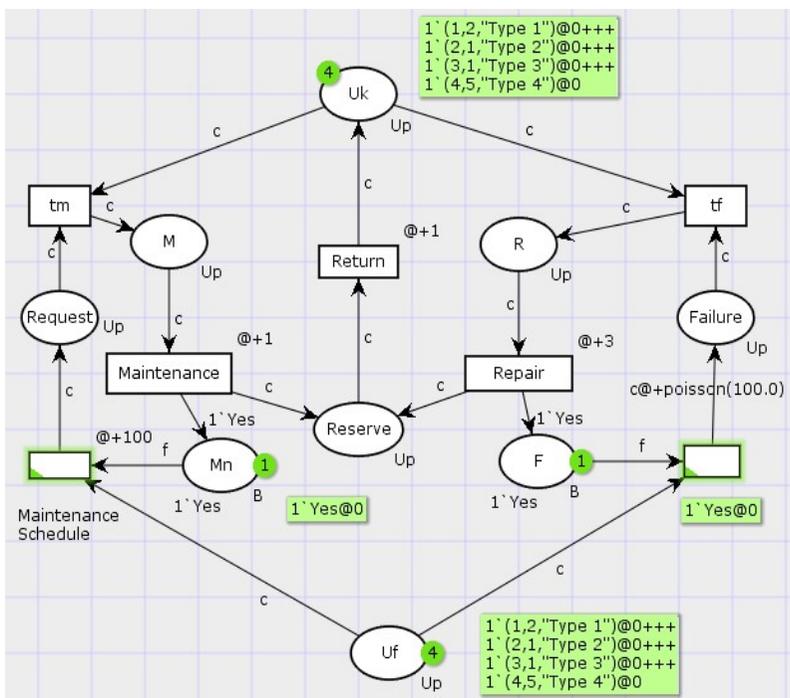


Рис. 13. Модуль ТОиР компьютерной техники с реализацией пуассоновского закона появления отказов

Позиция Uk содержит цветные фишки, соответствующие используемым компьютерам определенных типов: «Инженерный», «Графическая рабочая станция», «Офисный», «Сервер». Левая часть сети имитирует запросы на прогнозное техническое обслуживание и вывод компьютера на ТО из эксплуатации, правая часть сети описывает появление отказов и вывод компьютеров на ремонт. Позиция Reserve содержит множество компьютеров, прошедших ТО или ремонт.

Полный анализ результатов имитационного эксперимента на сети Петри позволяет определить:

- наилучшее значение периода технического обслуживания;
- максимально допустимое время ремонта компьютеров различных конфигураций;
- задачи, которые наиболее часто останавливались по причине ремонта или обслуживания компьютеров;
- коррекцию предварительного распределения компьютеров.

4. Программные средства имитационного моделирования на сетях Петри

Широкое применение сетей Петри как инструмента имитационного моделирования вызвало разработку ряда программных продуктов, поддерживающих построение и исследование сетевых моделей различных модификаций.

Наибольшими функциональными возможностями, развитым графическим редактором и методическим сопровождением обладает программная система CPN Tools V. 4.0 [23]. Основными архитекторами этого инструмента являются К. Йенсен, С. Кристенсен, Л.М. Кристенсен и М. Вестергаард [10]. Программа CPN Tools работает на платформах Windows и Linux и является свободно распространяемым программным обеспечением. В большинстве известных работ по моделированию на временных раскрашенных сетях Петри приводятся иллюстрации примеров сетей Петри, выполненных в среде CPN Tools. На русском языке выпущено хорошее учебное пособие по работе с этой программной системой [50].

В известной системе моделирования MATLAB отсутствует универсальное приложение для работы с сетями Петри. В то же время существует локальная версия инструментов для сетей Петри – Petri Net Toolbox [51]. Это программный инструмент для моделирования, анализа и проектирования систем с дискретными событиями на основе моделей сетей Петри. Временные сети могут быть детерминированными или стохастическими. Пользователи могут рисовать, сохранять и извлекать модели сети Петри, а также запускать процедуры моделирования, анализа и проектирования. Доступны анимированные демонстрации и интерактивная справка. Все процедуры, доступные в Petri Net Toolbox, реализованы в виде файлов MATLAB и построены по модульному принципу. Данный продукт является коммерческим и распространяется фирмой MathWorks, Inc, для совместной работы с системой MATLAB.

Другой подход реализован в достаточно мощном инструменте верификации динамических процессов на временных сетях Петри (TAPAAL/UPPAAL) [52]. Инструмент TAPAAL предлагает графический редактор для рисования моделей TAPN, симулятор для экспериментов с созданными сетями и среду проверки, которая автоматически отвечает на логические запросы, сформулированные в подмножестве темпоральной логики CTL.

В работе [53] указанное программное обеспечение применено к анализу системы динамических точек на метрическом графе (DP-система). Эта динамическая модель рассматривается в теории геометрических дискретных динамических систем; кроме того, DP-системы могут использоваться для приближенного представления динамики распространения сообщений в распределенных системах.

Заключение

В обзоре обобщены подходы к решению задач организации технического обслуживания сложных систем, использующие в качестве инструмента исследований временные стохастические раскрашенные сети Петри. Практика их применения показала высокую эффективность при системном анализе сложных объектов. Приведенные примеры имитационных моделей для различных задач демонстрируют возможности анализа таких параметров, как периоды технического обслуживания, остаточный ресурс, ремонтпригодность, время восстановления после ремонта и другие.

Анализируя различные подходы, модели на сетях Петри и решения, можно предложить следующую методику имитационного моделирования при организации технического обслуживания технических объектов.

1. Составляется календарно-сетевой график выполнения объектами заданного множества производственных задач.

2. На основе известных данных определяются вероятностные законы случайных процессов, событий и значений ключевых параметров объектов, связанных с эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом.

3. Решается задача оптимального назначения технических объектов на производственные задачи в соответствии с календарно-сетевым графиком и имеющимися ресурсами.

4. Строится иерархическая сеть Петри для имитации эксплуатации объекта и его обслуживания.

5. В рамках виртуальных испытаний объектов проводятся статистические эксперименты на иерархической сети с разными сценариями.

6. По результатам имитационного эксперимента принимаются решения по корректировке первоначального распределения объектов по задачам, выбираются стратегии технического обслуживания и определяются их временные характеристики.

Перспективность сетей Петри для системного анализа подтверждается постоянным развитием их возможностей. За последние годы был предложен ряд расширений классических сетей Петри. Здесь должны быть отмечены:

1. Концепция «стареющих» маркеров (фишек с памятью), предложенная В. Воловым [54]. Ключевой особенностью настоящей формулировки является введение в сети Петри нового типа маркеров, метки которых могут непрерывно меняться в течение периода, когда разрешен переход. Такие маркеры могут сосуществовать в позиции вместе с обычными цветными и неокрашенными жетонами. Полученная структура обеспечивает гибкое и прозрачное графическое моделирование с превосходной репрезентативной мощностью, что особенно подходит для моделирования надежности системы с неэкспоненциально распределенным временем срабатывания.

2. Класс вложенных сетей, развиваемый И.А. Ломазовой и др. [55, 56].

3. Сети ввода-вывода между позициями и переходами (сети ЮРТ), предло-

женные Barros J. и Gomes L. [57, 58] и ориентированные на проектирование сетевых встроенных контроллеров и моделирование глобально-асинхронных и локально-синхронных систем.

Анализ известных работ в рассматриваемой области показывает, что имеется достаточно большое число программных средств для реализации моделей на сетях Петри. Тем не менее можно рекомендовать CPN Tools [23] как наиболее удобный и многофункциональный инструмент для работы с временными стохастическими раскрашенными сетями Петри.

Публикационная активность в отечественных и международных журналах свидетельствует о научном интересе к аппарату сетей Петри, его потенциале и успешном применении при имитационном моделировании эксплуатации и обслуживания систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to embedded systems, A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edn. The MIT Press, USA, 2017.
2. Chachada A. et al. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture // Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy. IEEE Xplore, 2018.
3. Sang G.M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F. Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020), Lecce, Italy. 2020.
4. Щербakov M.B., Сай Ван К. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 186–194.
5. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
6. Stiß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Klodowski A., Bär T., Diedrich C. Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems // Proceedings of 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. Pp. 1–9.
7. Пуперсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
8. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.
9. Wang J. Time Petri Nets. In: Timed Petri Nets. The Kluwer International Series on Discrete Event Dynamic Systems. Boston, MA: Springer, 1998. Vol. 9.
10. Jensen K., Kristensen M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. 382 p.
11. Santos F.P., Teixeira A.P., Soares C.G. Modeling, simulation and optimization of maintenance cost aspects on multi-unit systems by stochastic Petri nets with predicates // Simulation. 2018. Vol. 95. Pp. 461–478.
12. Marsan M.A. Stochastic Petri nets: An elementary introduction // Advances in Petri Nets 1989. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 424. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990.
13. Lu Z. System Maintainability Modeling Method Based on Colored Stochastic Time Petri Net // Journal of Mechanical Engineering. 2011. Vol. 47. Pp. 185–192.
14. Lu Z., Liu J., Dong L., Liang X. Maintenance Process Simulation Based Maintainability Evaluation by Using Stochastic Colored Petri Net // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, 3262.
15. Yang S.K., Liu T.S. A Petri net approach to early failure detection and isolation for preventive maintenance // Quality and Reliability Engineering International. 1998. Vol. 14. Pp. 319–330.
16. Hamroun A., Labadi K., Lazri M. Modelling and Performance Analysis of Electric Car-Sharing Systems Using Petri Nets // Proceedings of E3S Web Conference. 2020. Vol. 170, 03001.
17. Ferreira C., Neves L.C., Silva A., De Brito J. Stochastic maintenance models for ceramic claddings // Structure and Infrastructure Engineering. 2019. Vol. 16. Pp. 1–19.

18. *Kucera E., Haffner O., Drahoš P., Leskovský R., Cigánek J.* PetriNet Editor + PetriNet Engine: New Software Tool // *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10, 7662.
19. *Chahrouh N., Nasr M., Tacnet J.-M., Béranguer C.* Deterioration modeling and maintenance assessment using physics-informed stochastic Petri nets: Application to torrent protection structures // *Reliability Engineering and System Safety.* 2021. Vol. 210, 107524.
20. *Lorbeer J.-U., Padberg J.* Hierarchical, Reconfigurable Petri Nets// *Workshops at Modelierung 2018, Petri Nets and Modeling 2018 (PeMod18).* Hamburg, Germany: Hamburg University of Applied Sciences. 2018. Vol. 2060. Pp. 167–186.
21. *Orlov S.P., Susarev S.V., Uchaikin R.A.* Application of Hierarchical Colored Petri Nets for Technological Facilities' Maintenance Process Evaluation // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, 5100.
22. *Учайкин Р.А., Орлов С.П.* Задача распределения средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки.* 2019. № 27(4). С. 84–98.
23. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets [Электронный ресурс]. – URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (дата обращения 20.09.2022).
24. *Barros T.C., De Figueiredo J.C., Perkusich A.* A Fault Tolerant Colored Petri Net Model for Flexible Manufacturing Systems // *J. Braz. Comput. Soc.* 1997. Vol. 4(2).
25. *Wang L.-C., Wu S.-Y.* Modeling with colored timed object-oriented Petri nets for automated manufacturing systems // *Computers & Industrial Engineering.* 1998. Vol. 34 (2). Pp. 463–480.
26. *Yan H.-S., Wang N.-S., Zhang J.-G., Cui X.-Y.* Modelling, scheduling and simulation of flexible manufacturing systems using extended stochastic high-level evaluation Petri nets // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 1998. Vol. 14(2). Pp. 121–140.
27. *Riascos L.A.M., Moscato L.A., Miyagi P.* Detection and treatment of faults in manufacturing systems based on Petri Nets // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2004. Vol. 26. Pp. 280–289.
28. *Kahraman C., Tiyyüz F.* Manufacturing System Modeling Using Petri Nets // *Computational Intelligence.* Berlin/Heidelberg, Germany: Springer Science and Business Media LLC. 2010. Vol. 252. Pp. 95–124.
29. *Guo Z., Zhang Y., Zhao X., Song X.* A Timed Colored Petri Net Simulation-Based Self-Adaptive Collaboration Method for Production-Logistics Systems // *Appl. Sci.* 2017. Vol. 7, 235.
30. *Le B., Andrews J.* Petri net modelling of bridge asset management using maintenance-related state conditions // *Structure and Infrastructure Engineering.* 2016. Vol. 12. Issue 6. Pp.730–751.
31. *Yianni P.C., Rama D., Neves L.C., Andrews J.D.* Railway bridge asset management using a Petri-Net modelling approach // *Life-Cycle of Engineering Systems. Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure.* London, UK: CRC Press, 2016. Pp. 1964–1971.
32. *Le B., Andrews J., Fecarotti C.* A Petri net model for railway bridge maintenance // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability.* 2017. Vol. 231(3). Pp. 306–323.
33. *Fecarotti C., Andrews J.* A Petri net approach to assess the effects of railway maintenance on track availability // *Infrastructure Asset Management.* 2020. Vol. 7. Issue 3. Pp. 201–220.
34. *Le B., Andrews J.* Modelling wind turbine degradation and maintenance // *Wind Energy.* 2016. Vol. 19. Pp. 571–591.
35. *Leigh J.M., Dunnett S.J.* Use of Petri Nets to Model the Maintenance of Wind Turbines // *Qual. Reliab. Eng. Int.* 2014. Vol. 32. Pp.167–180.
36. *Yan R., Dunnett S.* Improving the Strategy of Maintaining Offshore Wind Turbines through Petri Net Modelling // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, 574.
37. *Булавский П.Е., Ваусов О.К., Быстров И.Н.* Моделирование и оценка времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью сетей Петри // *Автоматика на транспорте.* 2019. Т. 5. № 4. С. 478–492.
38. *Eisenberger D., Fink O.* Assessment of maintenance strategies for railway vehicles using Petri-nets // *Transp. Res. Procedia.* 2017. Vol. 27. Pp. 205–214.
39. *Volovoi V.* Abridged Petri Nets. 2013. arXiv: 1312.2865v1 [cs.OH] 10 Dec 2013. 32 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.academia.edu/27965562/Abridged_Petri_Nets (Дата обращения 10.11.2022).
40. *Volovoi V.* Building business cases for risk and reliability technologies // *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems ESREL.* 2015. Pp. 1769–1777.
41. *Sheng J., Prescott D.* A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation // *Reliability Engineering & System Safety.* 2017. Vol. 168. Pp. 290–305.

42. *Sheng J., Prescott D.* A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 189. Pp. 67–88.
43. *Fisher W.W.* Issues and Models in Maintenance Systems Incorporating Cannibalization: A Review // *Information Systems and Operational Research*. 1990. Vol. 28(1), Pp. 154–164.
44. *Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya.* Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399 (044032).
45. *Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Яковлева А.Е.* Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки*. 2021. № 29(1). С. 46–57.
46. *Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А.* Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств // *Известия Санкт-Петербургского гос. технолог. ин-та (технического университета)*. 2021. № 58(84). С. 98–104.
47. *Волхонская Е.Е., Орлов С.П.* Цифровые двойники на сетях Петри для виртуальных испытаний робототехнических транспортных средств // *Инновационное развитие современной науки: теория, методология, практика: сб. статей VI Всеросс. научно-практ. конференции*. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2022. С. 15–21.
48. *Орлов С.П., Учайкин Р.А.* Модели на раскрашенных сетях Петри для управления техническим обслуживанием компьютерного оборудования предприятия // *Пром-Инжиниринг. Труды VII всероссийской научно-технической конференции*. Челябинск. 2021. С. 263–269.
49. *Учайкин Р.А.* Методика поддержки принятия решений при управлении комплексом средств вычислительной техники научно-производственного предприятия на основе гетерогенных системных моделей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. 20 с.
50. *Зайцев Д.А., Шмелева Т.Р.* Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools: учеб. пособие. Одесса: Одесская национальная академия связи, 2006. 60 с.
51. Petri Net Toolbox [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/petri-net-toolbox.html (Дата обращения 09.11.2022).
52. ТАРААЛ: Tool for Verification of Timed-Arc Petri Nets [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.taraal.net/news/taraal-3.9.3> (Дата обращения 09.11.2022).
53. *Дворянский Л.В., Измайлов А.А.* Автоматический анализ дискретных динамических систем на метрических графах с помощью сетей Петри с временными дугами и инструмента ТАРААЛ // *Труды Института системного программирования РАН*. 2020. № 32(6). С. 155–166.
54. *Volovoi V.* Modelling of System Reliability Petri Nets with Aging Tokens // *Reliability Engineering & System Safety*. 2004. Vol. 84 (2). Pp. 149–161.
55. *Ломазова И.А.* Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. М.: Науч. мир, 2004. – 207 с.
56. *Ермакова В.О., Ломазова И.А.* Трансляция вложенных сетей Петри для верификации разверток // *Труды Института системного программирования РАН*. 2016. Т. 28. № 4. С. 115–136.
57. *Barros J.P., Gomes L.* From non-autonomous Petri net models to executable state machines // *Proceedings of 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, Canada. 2019. Pp. 1638–1643.
58. IOPT Tools [Электронный ресурс]. – URL: <http://gres.uninova.pt/IOPT-Tools-V1.1/> (Дата обращения 10.10.2022).

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2022 г.

SIMULATION MODELS BASED ON PETRI NETS FOR THE ANALYSIS OF MAINTENANCE AND REPAIR PROCESSES OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

*S.P. Orlov, S.V. Susarev**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: orlovsp1946@gmail.com

Abstract. *The presented review analyzes the approaches and methods of using simulation models in the maintenance and repair organization of the complex technical objects and systems. The development of the concept of "Industry 4.0" and the Internet of things involves the transition from periodic and preventive maintenance to predictive maintenance based on the study of processes during the object operation. It is shown that system models based on Petri nets are convenient for describing and analyzing technological processes and equipment maintenance. The effectiveness of timed stochastic colored Petri nets for virtual tests in the design of maintenance and repair procedures in complex systems is revealed. The use of hierarchical Petri nets allows building complex models that describe interrelated processes. A general model based on a hierarchical network is proposed to study the processes of deterioration and degradation of the technical object aggregates and elements and to form a predictive maintenance strategy. The model includes a Gantt chart of production tasks, a set of active and reserve units, maintenance and repair modules. The examples of simulation models on Petri nets for various technical systems are considered. Solutions for flexible production systems, railway bridges, offshore wind turbines, an aircraft fleet, a group of robotic vehicles, and a complex of computer equipment of an enterprise are given. The models of various maintenance strategies are considered and the generality of the models based on hierarchical Petri nets is shown. The article formulates methodological principles for constructing hierarchical networks to simulate the operation and maintenance of technical systems. The article analyzes known software tools for the implementation of timed stochastic colored Petri nets. The summary concludes that the use of simulation models on Petri nets is promising for organizing maintenance and repair of complex technical objects and systems.*

Keywords: *system analysis, cyber-physical systems, predictive maintenance, cannibalization maintenance strategy, virtual testing, simulation, hierarchical nets, timed colored Petri nets*

REFERENCES

1. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to embedded systems, A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edn. The MIT Press, USA, 2017.
2. Chachada A. et al. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture // Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy. IEEE Xplore, 2018.
3. Sang G.M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F. Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020), Lecce, Italy. 2020.
4. Shcherbakov M.V., Sai Van K. Arkhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniia slozhnykh mnogoobiektnykh sistem v kontseptsii Industrii 4.0 // Programmnye produkty i sistemy. 2020. No. 2. Pp. 186–194.

* *Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

Sergey V. Susarev, (PhD (Techn.)), Associate Professor.

5. *Novak P., Kadera P., Wimmer M.* Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
6. *Stiß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Klodowski A., Bär T., Diedrich C.* Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems // Proceedings of 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. Pp. 1–9.
7. *Peterson J.L.* Teoriia setei Petri i modelirovanie sistem. M., Mir, 1984. 264 p.
8. *Kotov V.E.* Seti Petri. M., Nauka, 1984. 160 p.
9. *Wang J.* Time Petri Nets. In: Timed Petri Nets. The Kluwer International Series on Discrete Event Dynamic Systems. Boston, MA: Springer, 1998. Vol. 9.
10. *Jensen K., Kristensen M.* Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. 382 p.
11. *Santos F.P., Teixeira A.P., Soares C.G.* Modeling, simulation and optimization of maintenance cost aspects on multi-unit systems by stochastic Petri nets with predicates // Simulation. 2018. Vol. 95. Pp. 461–478.
12. *Marsan M.A.* Stochastic Petri nets: An elementary introduction // In: Advances in Petri Nets 1989. Lecture Notes in Computer Science, vol 424. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990.
13. *Lu Z.* System Maintainability Modeling Method Based on Colored Stochastic Time Petri Net // Journal of Mechanical Engineering. 2011. Vol. 47. Pp. 185–192.
14. *Lu Z., Liu J., Dong L., Liang X.* Maintenance Process Simulation Based Maintainability Evaluation by Using Stochastic Colored Petri Net // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, 3262.
15. *Yang S.K., Liu T.S.* A Petri net approach to early failure detection and isolation for preventive maintenance // Quality and Reliability Engineering International. 1998. Vol. 14. Pp. 319–330.
16. *Hamroun A., Labadi K., Lazri M.* Modelling and Performance Analysis of Electric Car-Sharing Systems Using Petri Nets // Proceedings of E3S Web Conference. 2020. Vol. 170, 03001.
17. *Ferreira C., Neves L.C., Silva A., De Brito J.* Stochastic maintenance models for ceramic claddings // Structure and Infrastructure Engineering. 2019. Vol. 16. Pp. 1–19.
18. *Kucera E., Haffner O., Drahoš P., Leskovský R., Cigánek J.* PetriNet Editor + PetriNet Engine: New Software Tool // Appl. Sci. 2020. Vol. 10, 7662.
19. *Chahrouh N., Nasr M., Tacnet J.-M., Bèrenghuer C.* Deterioration modeling and maintenance assessment using physics-informed stochastic Petri nets: Application to torrent protection structures // Reliability Engineering and System Safety. 2021. Vol. 210, 107524.
20. *Lorbeer J.-U., Padberg J.* Hierarchical, Reconfigurable Petri Nets // Workshops at Modelierung 2018, Petri Nets and Modeling 2018 (PeMod18). Hamburg, Germany: Hamburg University of Applied Sciences. 2018. Vol. 2060. Pp. 167–186.
21. *Orlov S.P., Susarev S.V., Uchaikin R.A.* Application of Hierarchical Colored Petri Nets for Technological Facilities' Maintenance Process Evaluation // Appl. Sci. 2021. Vol. 11, 5100.
22. *Uchaikin R.A., Orlov S.P.* Zadacha raspredeleniia sredstv vychislitelnoi tekhniki na mashinostroitelnom predpriatii // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2019. Vol. 27, no. 4. Pp. 84–98.
23. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets]. <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (accessed September 20, 2022).
24. *Barros T.C., De Figueiredo J.C., Perkusich A.* A Fault Tolerant Colored Petri Net Model for Flexible Manufacturing Systems // J. Braz. Comput. Soc. 1997. Vol. 4(2).
25. *Wang L.-C., Wu S.-Y.* Modeling with colored timed object-oriented Petri nets for automated manufacturing systems // Computers & Industrial Engineering. 1998. Vol. 34 (2). Pp. 463–480.
26. *Yan H.-S., Wang N.-S., Zhang J.-G., Cui X.-Y.* Modelling, scheduling and simulation of flexible manufacturing systems using extended stochastic high-level evaluation Petri nets // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 1998. Vol. 14(2). Pp. 121–140.
27. *Riascos L.A.M., Moscato L.A., Miyagi P.* Detection and treatment of faults in manufacturing systems based on Petri Nets // J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2004. Vol. 26. Pp. 280–289.
28. *Kahraman C., Tiysüz F.* Manufacturing System Modeling Using Petri Nets // Computational Intelligence. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer Science and Business Media LLC. 2010. Vol. 252. Pp. 95–124.

29. Guo Z., Zhang Y., Zhao X., Song X. A Timed Colored Petri Net Simulation-Based Self-Adaptive Collaboration Method for Production-Logistics Systems // Appl. Sci. 2017. Vol. 7, 235.
30. Le B., Andrews J. Petri net modelling of bridge asset management using maintenance-related state conditions // Structure and Infrastructure Engineering. 2016. Vol. 12. Issue 6. Pp. 730–751.
31. Yianni P.C., Rama D., Neves L.C., Andrews J.D. Railway bridge asset management using a Petri-Net modelling approach // Life-Cycle of Engineering Systems. Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure. London, UK: CRC Press, 2016. Pp. 1964–1971.
32. Le B., Andrews J., Fecarotti C. A Petri net model for railway bridge maintenance // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. 2017. Vol. 231(3). Pp. 306–323.
33. Fecarotti C., Andrews J. A Petri net approach to assess the effects of railway maintenance on track availability // Infrastructure Asset Management. 2020. Vol. 7. Issue 3. Pp. 201–220.
34. Le B., Andrews J. Modelling wind turbine degradation and maintenance // Wind Energy. 2016. Vol. 19. Pp. 571–591.
35. Leigh J.M., Dunnett S.J. Use of Petri Nets to Model the Maintenance of Wind Turbines // Qual. Reliab. Eng. Int. 2014. Vol. 32. Pp. 167–180.
36. Yan R., Dunnett S. Improving the Strategy of Maintaining Offshore Wind Turbines through Petri Net Modelling // Appl. Sci. 2021. Vol. 11, 574.
37. Bulavskii P.E., Vaisov O.K., Bystrov I.N. Modelirovanie i otsenka vremeni poiska i ustraneniia otkazov sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki s pomoshchiu setei Petri // Avtomatika na transporte. 2019. Vol. 5. No. 4. Pp. 478–492.
38. Eisenberger D., Fink O. Assessment of maintenance strategies for railway vehicles using Petri-nets // Transp. Res. Procedia. 2017. Vol. 27. Pp. 205–214.
39. Volovoi V. Abridged Petri Nets. 2013. arXiv: 1312.2865v1 [cs.OH] 10 Dec 2013. 32 p. https://www.academia.edu/27965562/Abridged_Petri_Nets (accessed November 10, 2022)
40. Volovoi V. Building business cases for risk and reliability technologies // Safety and Reliability of Complex Engineered Systems ESREL. 2015. Pp. 1769–1777.
41. Sheng J., Prescott D. A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation // Reliability Engineering & System Safety. 2017. Vol. 168. Pp. 290–305.
42. Sheng J., Prescott D. A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 189. Pp. 67–88.
43. Fisher W.W. Issues and Models in Maintenance Systems Incorporating Cannibalization: A Review // Information Systems and Operational Research. 1990. Vol. 28(1). Pp. 154–164.
44. Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya. Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399 (044032).
45. Orlov S.P., Bizyukova E.E., Yakovleva A.E. Virtualnye ispytaniia agregatov dlia virtualnogo vvoda v proizvodstvo robotizirovannogo avtomobilia // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2021. Vol. 29. No. 1. Pp. 46–57.
46. Susarev S.V., Orlov S.P., Bizyukova E.E., Uchaikin R.A. Primenenie modelei na setiakh Petri pri organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniia avtonomnykh agrotekhnicheskikh transportnykh sredstv // Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gos. tekhnolog. instituta (tekhnicheskogo universiteta). 2021. No. 58(84). Pp. 98–104.
47. Volkhonskaia E.E., Orlov S.P. Digital twins on Petri nets for virtual testing of robotic vehicles // Innovatsionnoe razvitie sovremennoi nauki teoriiia metodologiiia praktika: sb. statei VI Vseross. nauchno-prakt. konferentsii. Petrozavodsk, MCNP “New Science”, 2022. Pp. 15–21.
48. Orlov S.P., Uchaikin R.A. Modeli na raskrashennykh setiakh Petri dlia upravleniia tekhnicheskim obsluzhivaniem kompiuternogo oborudovaniia predpriiatiia // Prom-Inzhiniring. Trudy VII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. 2021. Chelyabinsk, 2021. Pp. 263–269.
49. Uchaikin R.A. Metodika podderzhki priinaiiia reshenii pri upravlenii kompleksom sredstv vychislitelnoi tekhniki nauchno-proizvodstvennogo predpriiatiia na osnove geterogennykh sistemnykh modelei. Diss. ... kand. tech. nauk. Samara, SamGTU, 2022. 158 p.
50. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Modelirovanie telekommunikatsionnykh sistem v CPN Tools: uchebnoe posobie. Odessa, Odessa National Academy of Communications, 2006. 60 p.
51. Petri Net Toolbox. https://www.mathworks.com/products/connections/product_detail/petri-net-toolbox.html (accessed November 09, 2022).
52. TAPAAL: Tool for Verification of Timed-Arc Petri Nets. <https://www.tapaal.net/news/tapaal-3.9.3> (accessed November 09, 2022).

53. *Dvorianskii L.V., Izmailov A.A.* Avtomaticheskii analiz diskretnykh dinamicheskikh sistem na metricheskikh grafakh s pomoshchiu setei Petri s vremennymi dugami i instrumenta TAPAAL // Trudy Instituta sistemnogo programirovaniia RAN. 2020. Vol. 32(6). Pp. 155–166.
54. *Volovoi V.* Modelling of System Reliability Petri Nets with Aging Tokens // Reliability Engineering & System Safety. 2004. Vol. 84(2). Pp. 149–161.
55. *Lomazova I.A.* Vlozhennye seti Petri: Modelirovanie i Analiz raspredelennykh sistem s obiektnoi strukturoi. M.: Nauchnyi Mir, 2004. 207 p.
56. *Ermakova V.O., Lomazova I.A.* Translyatsiia vlozhennykh setei Petri dlia verifikatsii razvertok // Trudy Instituta sistemnogo programirovaniia RAN. 2016. Vol. 28. No. 4. Pp. 115–136.
57. *Barros J.P., Gomes L.* From non-autonomous Petri net models to executable state machines // Proceedings of 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Vancouver, Canada. 2019. Pp. 1638–1643.
58. IOPT Tools. <http://gres.uninova.pt/IOPT-Tools-V1.1/> (accessed October 10, 2022).