

Sergey V. Susarev, Sergey P. Orlov, Elizaveta E. Bizyukova,
Roman A. Uchaikin

Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А.

APPLICATION OF PETRI NET MODELS IN THE ORGANIZATION OF AUTONOMOUS AGRICULTURAL VEHICLE MAINTENANCE

Samara State Technical University, Molodogvardeyskaya str., 244, Samara, 443100, Russia
susarev_sergey@mail.ru

A complex of simulation models was developed to study the processes of repair and maintenance of the system of autonomous agricultural vehicles. The general structure of the diagnostic system for robotic agricultural vehicles was presented. The hierarchical structure of simulation models for a robotic vehicle was described. A temporary colored Petri net model was proposed. The model makes it possible to evaluate the effectiveness of predictive maintenance for a given failure rate of vehicle units and aggregates. A formal description of an autonomous vehicle was developed in the form of the primary parameter multisets. The experimental results of the simulation modelling confirmed the model adequacy. The results are applied to study the work of an autonomous vehicle group in agricultural fields under difficult operating conditions.

Keywords: cyber-physical systems, self-driving vehicles, predictive maintenance, simulation, temporary colored Petri nets.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НА СЕТЯХ ПЕТРИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОНОМНЫХ АГРОТЕХНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Самарский государственный технический университет, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
susarev_sergey@mail.ru

Разработан комплекс имитационных моделей для исследования процессов ремонта и технического обслуживания системы автономных агротехнических автомобилей. Представлена общая структура системы диагностики автономных автомобилей сельскохозяйственного назначения. Приведена иерархическая структура имитационных моделей для роботизированного автомобиля. Предложена модель на основе временной раскрашенной сети Петри. Модель позволяет оценить эффективность прогнозного технического обслуживания при заданных характеристиках потоков отказов узлов и агрегатов автомобиля. Выполнено формальное описание автономного автомобиля в виде мультимножеств основных параметров. Экспериментальные результаты имитационного моделирования подтвердили адекватность модели. Полученные результаты применяются при исследовании работы группы автономных автомобилей в полях при сложных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: кибер-физические системы, автономные автомобили, прогнозное техническое обслуживание, имитационное моделирование, временные раскрашенные сети Петри.

Дата поступления – 15 февраля 2021 года

DOI: 10.36807/1998-9849-2021-58-84-98-104

Введение

Активное развитие роботизированных транспортных средств связано с созданием автономных автомобилей. Это приводит к задачам управления техническим обслуживанием и ремонтом автономных автомобилей (АА) [1]. Беспилотные грузовые автомобили представляют сложную кибер-физическую систему, объединяющую как агрегаты и механические узлы, автономные подсистемы управления, контроля и передачи информации, так и диагностические и моделирующие системы на основе «цифровых двойников» [2, 3]. Наличие большого числа датчиков позволяет в реальном времени получать достаточный объем измерительной информации о техническом состоянии роботизированного автомобиля [4]. В настоящей статье рассмотрены результаты исследований, проводимых СамГТУ совместно с ПАО «КАМАЗ» в рамках проекта по созданию системы автономных сельскохозяйственных автомобилей [5, 6].

Оснащение автономных автомобилей средствами измерения параметров и коммуникации с удаленными системами обработки информации дает возможность перейти от профилактического ТО (Predictive Maintenance), которое является компонентом концепции «Индустрия 4.0» и использует технологию «Интернет вещей» (IoT-технология) [7, 8].

При создании системы автономных сельскохозяйственных автомобилей поставлена задача разработки комплекса имитационных моделей для оптимизации процессов технического обслуживания и ремонта индивидуального АА в зависимости от условий его эксплуатации. Эта задача решалась на базе разработанной общей системы диагностики и прогнозирования технического состояния автономного автомобиля АА на основе модели-ориентированного подхода и инструментов сетевой концепции мониторинга автомобильного парка [5].

Обзор существующих работ

Вопросы эффективной организации технического обслуживания и ремонта индустриального оборудования активно разрабатываются многими исследователями. Построению систем принятия решений и программно-информационная поддержка по проведению обслуживания и ремонта кибер-физических систем, разработке методов анализа ключевых индикаторов посвящены работы [9, 10]. В них изложен системологический подход к созданию когнитивных и мультиагентных моделей жизненного цикла оборудования, включающего ТО и ремонт. В статье [11] предлагается автоматизированная система мониторинга и диагностики управляемого роботизированного транспортного средства. Использован алгоритмический подход, основанный на применении моделей в виде нечетких диаграмм поведения. Взаимодействие беспилотных транспортных средств рассматривается в [12], где описана математическая модель распределения информационных потоков в группе летательных аппаратов.

Многие исследователи развивают дискретно-событийные динамические модели для формального описания технического обслуживания и ремонта оборудования. Среди таких инструментов выделяются сети Петри, математические и графические основания которых широко используются для имитации и теоретического анализа параллельных процессов с дискретными событиями [13-15]. Организация прогнозного ТО и ремонта базируется на выявлении свойств физических процессов износа, деградации и отказов элементов автомобиля, имеющих случайный характер. В связи с этим для моделирования часто применяются стохастические сети Петри [16]. Работы [17, 18] посвящены организации обслуживания ветровых турбин, установленных на водоемах, как правило, в морских прибрежных водах. Предложено использовать стохастические сети Петри для имитации погодных условий и трех типов обслуживания: а) периодического, б) основанного на состоянии объекта, в) корректирующего обслуживания. В [19] разработаны имитационные модели на обобщенных стохастических сетях Петри с предикатами и реализацией метода Монте-Карло. Время до отказа вышедших из строя компонентов соответствует распределению Вейбулла, при этом частота отказов со временем увеличивается. Стратегии обслуживания оптимизированы таким образом, чтобы минимизировать общие затраты на обслуживание системы при максимальной доступности. Вопросы организации технического обслуживания транспортных средств (парка самолетов, парка электромобилей для каршеринга) рассмотрены в [20, 21]. В них также предложено использовать стохастические сети Петри для оптимизации технического обслуживания при мониторинге функционирования объектов.

Таким образом, изучение мирового опыта показало перспективность использования имитационных моделей на стохастических сетях Петри. В настоящей статье этот математический аппарат применен при разработке системы диагностики агротехнических автономных автомобилей. В основу моделей были положены временные раскрашенные сети Петри [22, 23]. Такие модели легко структурируются по иерархии, как при нисходящей, так и при восходящей технологии разработки.

Диагностика автономных автомобилей «КАМАЗ» для сельского хозяйства

Обобщенная структура системы диагностики и прогнозирования технического состояния для автономных автомобилей «КАМАЗ» приведена на рис. 1. В состав системы входят блоки получения и обработки информации о функционировании роботизированного автомобиля. Вторая компонента системы содержит комплекс цифровых двойников агрегатов и имитационных моделей процессов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта [24, 25].

В процессе эксплуатации агротехнического автомобиля система решает следующие задачи:

- обработка данных из бортовых систем АА и хранение информации в облачном хранилище;
- анализ и статистическая обработка диагностических данных для определения их достоверности;
- сопоставление этих данных с соответствующими параметрами динамических моделей систем, адаптивных моделей износа и деградации элементов и узлов (с учетом моделей взаимовлияния компонентов и систем);
- анализ расхождения параметров бортовой системы с модельными параметрами и выявление предостерегающих состояний систем, агрегатов и узлов;
- статистический анализ истории отказов узлов, агрегатов и систем с учетом истории эксплуатации АА, прогнозирование остаточного ресурса узлов, агрегатов и систем автомобиля;
- феноменологический анализ взаимного влияния систем, агрегатов, с учетом остаточного ресурса оборудования;
- принятие решений по проведению технического обслуживания на основе прогноза состояния.

Цифровые двойники узлов и агрегатов используются при анализе текущих параметрических характеристик реального автомобиля, получаемых путем постоянного мониторинга. При этом система выполняет следующие функции:

1. накопление и хранение объема данных о параметрах функционирования автомобиля (режимах движения, нагрузке, динамических параметрах, информации с датчиков систем автомобиля, дополнительных датчиков системы диагностики);
2. обработка параметров функционирования автомобиля с отсечением колебаний сигналов, вызванных некритическими возмущениями окружающей среды (возмущения дорожного покрытия, погодные условия, климатические условия, техногенные возмущения и т.д.);
3. передача информации в стационарную базу данных для накопления «истории» и ведения учета функционирования автомобиля;
4. обработка статистических и параметрических данных в аналитическом модуле для определения наиболее вероятных преддефектных и аварийных состояний с целью своевременного выполнения операций прогнозного ТО или ремонта.

В настоящей работе основное внимание уделено созданию имитационных моделей, функционирующих в едином комплексе с «цифровыми двойниками» узлов и агрегатов автомобиля. На рис. 2 показана иерархическая структура имитационных моделей, связанных с технологией прогнозного ТО автономных автомобилей.

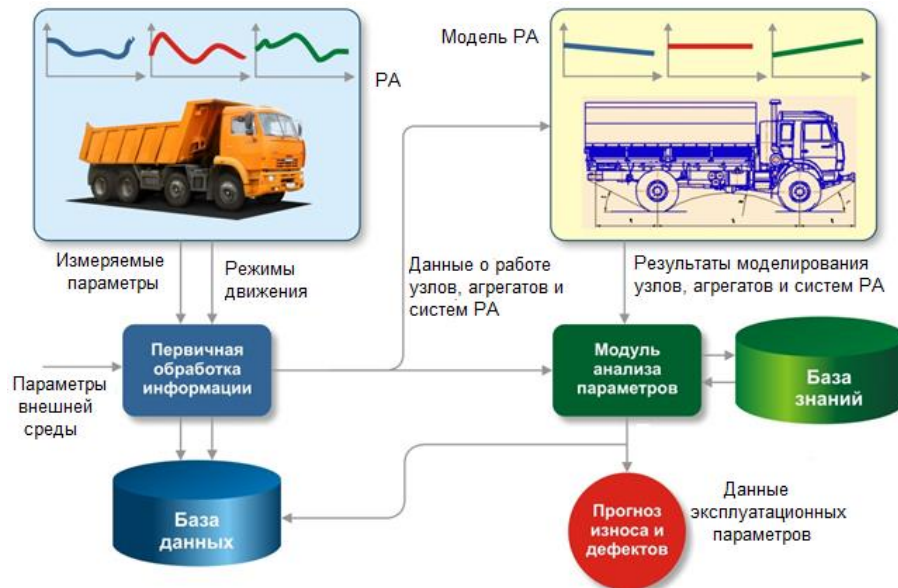


Рис. 1. Структура системы диагностики и прогнозирования технического состояния автономного автомобиля

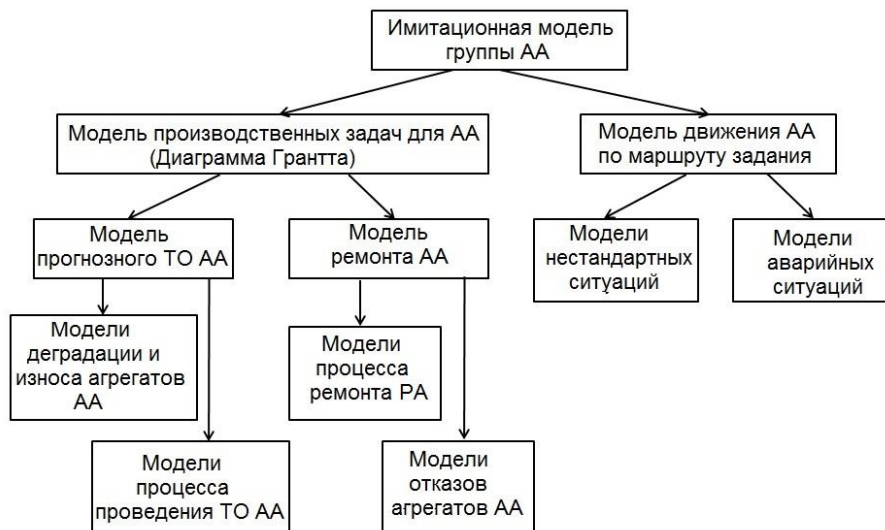


Рис. 2. Иерархия имитационных моделей АА при прогножном техническом обслуживании

Имитационное моделирование функционирования группы автономных автомобилей

Как отмечено выше, имитационные модели строятся на базе сетей Петри. Временная раскрашенная сеть Петри SM определяется как [26]:

$$SM = (C, B, P, T; A, V, F, w),$$

где C - конечное множество цветов; B - набор маркеров цветов $c \in C$; P - конечное множество позиций $\{p_1, \dots, p_m\} \in P$, каждая позиция p имеет цвет $c(p) \in C$ и набор маркеров $b(p) \subseteq B$ данного цвета; T - конечное множество переходов; V - конечное множество переменных $v(c) \in V$, соответствующих цветам $c \in C$; F - конечное множество функций, которые используются как выражения для описания действий на дугах, соединяющих позиции и переходы; $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ - матрица инцидентности позиций и переходов; $w: T \rightarrow Z^+$ - функция времени срабатывания, присваивающая положительное целое число каждому переходу в сети.

Формальное описание параметров автономного автомобиля с точки зрения ТО и ремонта представим в виде выражения:

$$AA_j = (n_j, mod_j, mdf_j, mil_j, RM_j, RL_j), \quad j=1, \dots, J, \quad (1)$$

где J - число АА; n_j - индивидуальный номер автомобиля; mod_j - модель АА; mdf_j - модификация модели; mil_j - пробег, км; $RM_j = \{t_{mjk}\}$ - множество периодов времени до технического обслуживания агрегатов АА, час; $RL_j = \{t_{Ljk}\}$ - множество значений остаточных ресурсов узлов и агрегатов, час.; $k=1, \dots, K$; K - число агрегатов.

В раскрашенных сетях Петри исследуемые объекты описываются цветными маркерами в виде мультимножеств. Для упрощения на начальном этапе рассматривается описание АА как мультимножество $AV = \{n, "Model", mdf\}$. Операция сложения временных мультимножеств обозначается как «+++». Например, нахождение в одной позиции сети Петри двух автономных автомобилей интерпретируется как сложение мультимножеств:

$$AV1+++AV2 = \{5, "KAMAZ", 2\}+++ \{10, "KAMAZ", 3\},$$

где представлены АА модели КАМАЗ второй и третьей модификации с индивидуальными номерами 5 и 10 соответственно.

На рис. 3 приведена имитационная модель на временной раскрашенной сети Петри для исследования процессов ТО и ремонта РА при выполнении неко-

торого набора Z производственных задач. Модель построена с использованием программной системы CPN Tools [27].

Модели подобной структуры будем обозначать SM_{nm} , где n - число наборов задач, m - число автономных автомобилей в группе, которые закреплены за этими задачами. Модель SM_{13} , представленная на рис. 3, описывает функционирование группы из трех автономных автомобилей, причем один АА выполняет за-

дачи z_1, \dots, z_5 , а два АА находятся в резерве (позиция Reserve). Комплекс задач включает: z_1 - движение АА по маршруту от базовой точки BP к целевой точке TP, z_2 и z_4 - маневрирование вблизи TP, z_3 - выполнение производственной операции, z_5 - возврат АА на базовую точку. Для модели принято соотношение реального и модельного времени, где $1MTU=0,5$ ч, MTU (model time unit) – такт модельного времени.

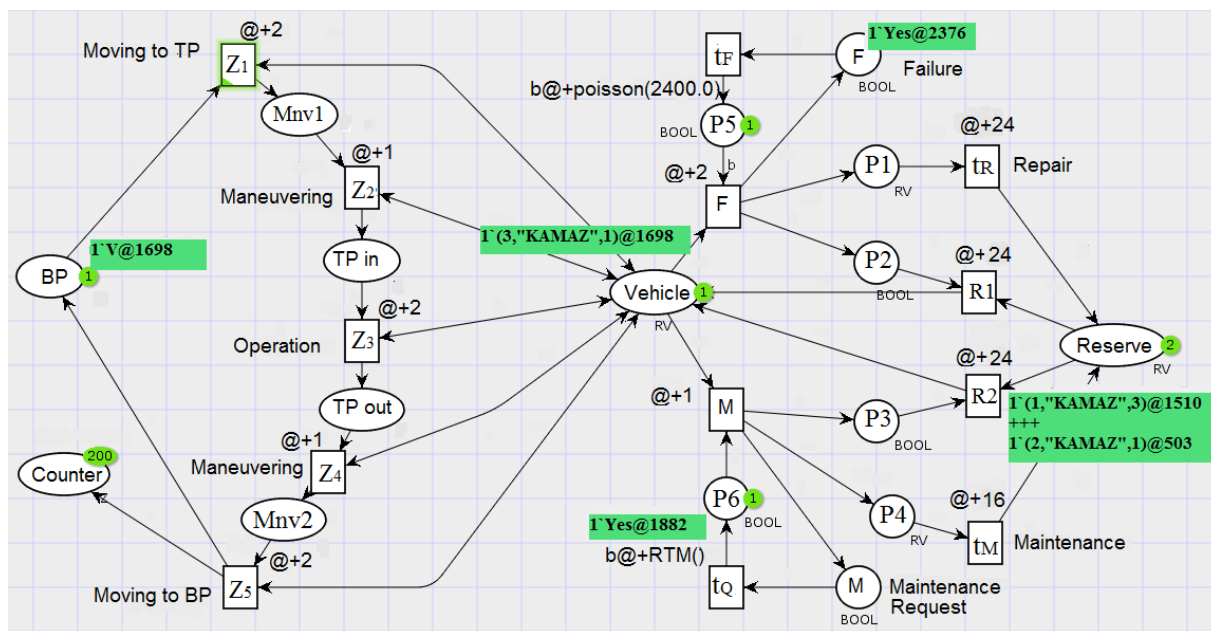


Рис. 3. Имитационная модель SM_{13} группы автономных автомобилей

Таблицы 1 и 2 содержат описание переходов и позиций для имитационной модели SM_{13} .

Таблица 1. Интерпретация переходов в имитационной модели SM_{13}

Переходы	Значение и события
z_1	АА движется к целевой точке (TP)
z_2	АА маневрирует вблизи TP после прибытия
z_3	АА выполняет технологическую операцию
z_4	АА маневрирует вблизи TP при отбытии
z_5	АА движется к базовой точке (BP)
t_F	Инициирование вывода АА из эксплуатации из-за отказа оборудования
F	АА выводится из текущей эксплуатации для ремонта
t_Q	Инициирование вывода АА из эксплуатации при поступлении запроса на техническое обслуживание
M	АА выводится из текущей эксплуатации для технического обслуживания
t_R	Ремонт АА
t_M	Техническое обслуживание АА
$R1$	Возврат АА из резерва в эксплуатацию после ремонта
$R2$	Возврат АА из резерва в эксплуатацию после технического обслуживания

Таблица 2. Интерпретация позиций в имитационной модели SM_{13}

Позиции	Значение
BP	Базовая точка расположения АА и начало маршрута
Mnv1	Обозначение окончания движения по маршруту и готовность маневрирования вблизи TP
TP in	Прибытие АА в целевую точку и готовность к выполнению операций
TP out	Отбытие АА из целевой точки и готовность к маневрированию
Mnv2	Обозначение окончания маневрирования и готовность к движению по маршруту
Counter	Счетчик циклов выполнения задач
Vehicle	Содержит номер автономного автомобиля в данный момент. Автомобиль доступен и готов к выполнению операций.
F	Обозначение появления отказа
M	Обозначение появления запроса на техническое обслуживание
Reserve	Показывает доступные резервные автомобили, готовые к выполнению операций
$P1, P2, P3, P4$	Вспомогательные позиции
$P5$	Разрешение на вывод АА на ремонт
$P6$	Разрешение на вывод АА на техническое обслуживание

Две группы переходов и позиций в сети SM_{13} задают случайные события: а) появление отказов (Failure), б) появление запросов на техническое обслуживание (Maintenance) в соответствии с прогнозными оценками состояния узлов и агрегатов АА, находящегося на маршруте. Позиция Vehicle описывает техническое состояние автономного автомобиля, разрешая выполнение задач. В случае запроса на ТО или появления отказа АА выводится из эксплуатации и выполняется его замена исправным АА из резерва.

В модели на рис. 3 отказы появляются по закону Пуассона, а запросы на ТО имитируются генератором случайных событий с равномерным распределением в заданном временном диапазоне.

Экспериментальные результаты

На рис. 3 показано состояние модели после 200 циклов выполнения комплекса задач Z . Время T_{SM} выполнения на модели равно 1698 тактов, при том, что идеальное время T_{SI} (без отказов и ТО) должно быть равно 1600 тактов. На вывод из эксплуатации и замену АА затрачено 98 тактов или 49 часов. При этом видно, что в позицию Reserve поступили два автомобиля: один на 503 такте после ТО, и второй - после ремонта на 1510 такте. Также показано, в какие моменты времени в будущем автономный автомобиль будет выведен из эксплуатации: а) запрос на ТО придет на 1882 такте; б) ремонт потребуется на 2376 такте.

В таблице 3 представлены результаты имитационного эксперимента на модели SM_{13} для вариантов с различным числом резервных АА. Моделирование проводилось методом статистических испытаний. Качество функционирования группы АА оценивается следующими показателями:

- коэффициент сдвига завершения цикла производственных задач $K_Z = T_{SM} / T_{SI}$
- задержка Δ выполнения задач;
- количество резервных АА, необходимых для минимизации задержек выполнения задач, связанных с ремонтом или техническим обслуживанием.

Таблица 3. Результаты имитационного моделирования при интенсивности отказов $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-3}$ и среднем времени до ТО, равном 360 ч

Число циклов	Время цикла, час	T_{SI} , час	T_{SM} , час	K_Z	Превышение срока задания Δ , час	Резерв АА, ед.
200	4	800	849	1,06	49	2
200	4	800	874	1,09	74	1
200	4	800	897	1,12	97	0
400	8	1600	1645	1.03	22.5	2
400	8	1600	1675	1.05	37.5	1
400	8	1600	1707	1.07	53.5	0

В эксперименте задавались два варианта циклов агротехнических операций производственных операций (800 ч и 1600 ч). Получены значения сдвига сроков выполнения заданий при различном количестве резервных автомобилей. Задержка растет с уменьшением резерва, однако, на следующем этапе эксперимента будет учитываться стоимость образования резерва автомобилей и величина потерь от приостановки производственных операций.

Развитие иерархической структуры имитационных моделей технического обслуживания и ремонта АА

Дальнейшее развитие предложенной имитационной модели будет проводиться в следующих направлениях.

1. Детализация модели АА представлением цветных позиций сети Петри в виде совокупности мультимножеств узлов и агрегатов, построенных на основе выражения (1). Коэффициент сдвига завершения задач в этом случае есть функция $K_Z = f(G, \Lambda, R_M, R_L, N_R)$, где G - диаграмма Ганта расписания задач Z , $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_K)$ - интенсивности отказов в узлах и агрегатах, R_M - множество периодов времени до технического обслуживания агрегатов, R_L - множество значений остаточных ресурсов агрегатов, N_R - число резервных АА. Все выше перечисленные параметры задаются в соответствующих подсетях общей раскрашенной сети Петри.

2. Задание различных распределений случайных событий обеспечит моделирование износа, деградации и дефектов в узлах автомобиля. В системе CPN Tools имеется возможность задания таких законов распределения случайных величин, как Вейбулла, равномерное, Пуассоновское, Эрланга, Стюдента, Бернулли и др.

3. Детализация процесса выполнения производственных задач для учета сложности маршрутов АА, дорожных условий и особенностей операций в целевой точке маршрута. Это позволяет рассматривать стрессовые воздействия (температура, вибрация узлов, ударные нагрузки).

4. Моделирование организации ТО и ремонта в полевых условиях без удаления роботизированных автомобилей с места выполнения производственных операций.

Достоинство предложенной модели в том, что отдельные позиции и переходы могут быть, в свою очередь, представлены сложной сетью Петри. Например, позиция Vehicle может быть общей для нескольких подсетей Петри, каждая из которых описывает работу автомобилей по выполнению отдельных заданий. Например, на рис. 4 приведена модель SM_{34} для анализа работы группы АА из четырех автомобилей (позиция Vehicle), которые обслуживают три производственных задания. Здесь каждый блок заданий Z_1, Z_2, Z_3 представляется подсетями, аналогичными модели SM_{13} . Позиции F и M реализуют соответственно имитацию отказов и запросов на техническое обслуживание.

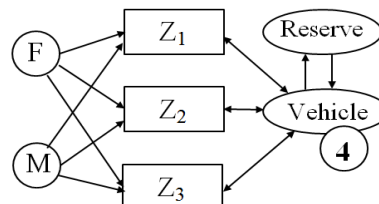


Рис. 4. Имитационная модель SM_{34} группы автономных автомобилей

Заключение

Полученные результаты показывают целесообразность использования временных раскрашенных сетей Петри в качестве имитационных моделей процессов технического обслуживания и ремонта. Посто-

янный мониторинг автономных автомобилей и коррекция на его основе имитационных моделей положены в основу системы прогнозного технического обслуживания АА. Своевременное определение моментов проведения технического обслуживания позволяет сократить потери времени на вывод и замену транспортных средств. С помощью разработанных моделей можно определить оптимальный состав резервных автомобилей, согласованный с расписанием выполняемых задач и порядком проведения технического обслуживания, что снижает эксплуатационные затраты.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ по проектам № 20-08-00797 и № 20-30-90014.

Литература

1. Bell B. Farm Machinery. 6th edn. Old Pond Publishing. 2015.
2. Platzer A. Logical Foundations of Cyber-Physical Systems. Springer International Publishing. 2018.
3. Охотников А.Л., Цветков В.Я. Управление автоматическими транспортными объектами в стохастической ситуации//Автоматика, связь, информатика. 2021. № 2. С. 37-41.
4. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to Embedded Systems. A Cyber-Physical Systems Approach. 2nd edn. The MIT Press, 2017.
5. Губанов Н.Г., Михеев Ю.В., Одинцов В.П., Ахтямов Р.Н., Морев А.С. Архитектура системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного транспортного средства// Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции. Самара: ООО "Офорт". 2019. С. 171-174.
6. Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O. Ya., Morev A.S. Information system of agricultural robotic KAMAZ cars// Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399 (033020). P.1-5. DOI:10.1088/17426596/1399/3/033020
7. Werbińska-Wojciechowska S. Technical System Maintenance. Delay-Time-Based Modelling. Springer International Publishing. 2019.
8. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture/ Chachada, A. et al// In: Proc. of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Turin, Italy). IEEE Xplore, 2018. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502489
9. Кизим А.В., Кравец А.Г. Программно-информационная поддержка процесса технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования// Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. Т. 2. С. 130 - 139.
10. Kizim, A.V., Kravets, A.G. On Systemological approach to intelligent decision-making support in industrial cyber-physical systems// In: Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control. Springer Nature Switzerland. 2020. Vol. 260. P. 167-183. DOI: 10.1007/978-3-030-32648-7_14
11. Bazhanov A., Vashchenko R., Rubanov V., Bazhanova O. Development of an automated system for monitoring and diagnostics a guided robotic vehicle// In: Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control. Springer International Publishing, Cham. 2020. Vol. 259. P. 93-107. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4_8
12. Кулик А.А., Большаков А.А. Разработка математической модели информационного взаимодействия беспилотных летательных аппаратов// Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. Саратов: Изд-во Саратовского государственного технического университета им Ю.А. Гагарина. 2018. Т.5. С. 61-66.
13. Wang J. Time Petri Nets. //In: Timed Petri Nets. The Kluwer International Series on Discrete Event Dynamic Systems. Springer, Boston, MA. 1998. Vol. 9.
14. del Foyo P. M. G., Silva J. R. Improving the Verification of Real-Time Systems Using Time Petri Nets// Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2017. Vol. 28(6). P. 774-784. DOI:10.1007/s40313-017-0343-x
15. Pla A., Gay P., Melendez J., Lopez B. Petri net-based process monitoring. A Workflow management system for process modeling and monitoring// Journal of Intelligent Manufacturing. 2014. Vol. 25. P. 539-554. DOI: 10.1007/s10845-012-0704-z
16. Lu Z., Liu J., Dong L., Liang X. Maintenance process simulation based maintainability evaluation by using stochastic colored Petri net// Applied Sciences. 2019. Vol. 9(16) 3262. DOI: 10.3390/app9163262
17. Leigh J.M., Dunnett S.J. Use of Petri Nets to model the maintenance of wind turbines// Quality and Reliability Engineering. 2014. Vol.32(1).P.1-30. DOI: 10.1002/qre.1737
18. Yan R., Dunnett S.J. Improving the strategy of maintaining offshore wind turbines through Petri net modelling// Applied Sciences. 2021. Vol. 11(2). P. 1-20. DOI: 10.3390/app11020574
19. 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: 5. P. 461-478. DOI: 10.1177/0037549718782655
20. Sheng J., Prescott D. A coloured Petri net framework for modelling aircraft fleet maintenance// Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 189. P. 67-88. DOI: 10.1016/j.ress.2019.04.004
21. Hamroun A., Labadi K., Lazri M. Modelling and performance analysis of electric car-sharing systems using Petri nets// In: Proc. of E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 170 (03001). DOI: 10.1051/e3sconf/202017003001
22. Jensen K. Coloured Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1997.
23. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin: Springer Berlin. 2014.
24. 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). DOI:10.1088/1742-6596/1399/4/044032
25. Orlov, S., Susarev, S., Pugachev, A. Intelligent diagnostic system of robotic KAMAZ vehicle's units// In: Proc. of XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). IEEE Xplore. 2019. P. 307-310. DOI: 10.1109/CTS48763.2019.8973367
26. Popova-Zeugmann L. Time and Petri Nets. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013.
27. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets. URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (дата обращения 20.12.2020).

Reference

1. Bell B. Farm Machinery. 6th edn. Old Pond Publishing. 2015.

2. *Platzer A.* Logical Foundations of Cyber-Physical Systems. Springer International Publishing. 2018.
3. *Okhotnikov A. L., Tsvetkov V. Ia.* Upravlenie avtomaticheskimi transportnymi obiektsami v stokhasticheskoi situatsii//Avtomatika, svyaz, informatika.2021.№2.S.37-41.
4. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to Embedded Systems. A Cyber-Physical Systems Approach. 2nd edn. The MIT Press. 2017.
5. *Gubanov N. G., Mikheev Iu. V., Odintsov V. P., Akhtiamov R. N., Morev A. S.* Arkhitektura sistemy diagnostiki i prognozirovaniia tekhnicheskogo sostoiianiia robotizirovannogo transportnogo sredstva// Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh: Trudy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii. Samara: OOO "Ofort". 2019. S. 171-174.
6. *Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O. Ya., Morev A.S.* Information system of agricultural robotic KAMAZ cars// Journal of Physics: Conference Series.2019.Vol.1399 (033020).P.15.DOI:10.1088/17426596/1399/3/033020
7. *Werbińska-Wojciechowska S.* Technical System Maintenance. Delay-Time-Based Modelling. Springer International Publishing. 2019.
8. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture/ Chachada, A. et al// In: Proc. of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Turin, Italy). IEEE Xplore, 2018. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502489
9. *Kizim A. V., Kravets A. G.* Programmno-informatsionnaia podderzhka protsessa tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta promyshlennogo oborudovaniia// Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh: sb. trudov mezhdunar. nauch. konf. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta. 2019. T. 2. S. 130 – 139.
10. *Kizim A.V., Kravets A.G.* On Systemological approach to intelligent decision-making support in industrial cyber-physical systems// In: Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control. Springer Nature Switzerland. 2020. Vol. 260. P. 167-183. DOI: 10.1007/978-3-030-32648-7_14
11. *Bazhanov A., Vashchenko R., Rubanov V., Bazhanova O.* Development of an automated system for monitoring and diagnostics a guided robotic vehicle// In: Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control. Springer International Publishing, Cham. 2020. Vol. 259. P. 93-107. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4_8
12. *Kulik A. A., Bolshakov A. A.* Razrabotka matematicheskoi modeli informatsionnogo vzaimodeistviia bespilotnykh letatelnykh apparatov// Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh: sb. trudov mezhdunar. nauch. konf. Saratov: Izd-vo Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. Iu. A. Gagarina. 2018. T.5. S. 61-66.
13. *Wang J.* Time Petri Nets. //In: Timed Petri Nets. The Kluwer International Series on Discrete Event Dynamic Systems. Springer, Boston, MA. 1998. Vol. 9.
14. *del Foyo P. M. G., Silva J. R.* Improving the Verification of Real-Time Systems Using Time Petri Nets// Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2017. Vol.28(6).P.774–784. DOI: 10.1007/s40313-017-0343-x
15. *Pla A., Gay P., Melendez J., Lopez B.* Petri net-based process monitoring. A Workflow management system for process modeling and monitoring// Journal of Intelligent Manufacturing. 2014. Vol. 25. P. 539–554. DOI: 10.1007/s10845-012-0704-z
16. *Lu Z., Liu J., Dong L., Liang X.* Maintenance process simulation based maintainability evaluation by using stochastic colored Petri net// Applied Sciences. 2019. Vol. 9(16) 3262. DOI: 10.3390/app9163262
17. *Leigh J.M., Dunnett S.J.* Use of Petri Nets to model the maintenance of wind turbines// Quality and Reliability Engineering. 2014. Vol. 32(1). P. 1-30. DOI: 10.1002/qre.1737
18. *Yan R., Dunnett S.J.* Improving the strategy of maintaining offshore wind turbines through Petri net modelling// Applied Sciences. 2021. Vol. 11(2). P. 1-20. DOI: 10.3390/app11020574
19. *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: 5. P. 461-478. DOI: 10.1177/0037549718782655
20. *Sheng J., Prescott D.* A coloured Petri net framework for modelling aircraft fleet maintenance// Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 189. P. 67-88. DOI: 10.1016/j.res.2019.04.004
21. *Hamroun A., Labadi K., Lazri M.* Modelling and performance analysis of electric car-sharing systems using Petri nets// In: Proc. of E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 170 (03001). DOI: 10.1051/e3sconf/202017003001
22. *Jensen K.* Coloured Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1997.
23. *Jensen K., Kristensen L.M.* Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin: Springer Berlin. 2014.
24. *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). DOI:10.1088/1742-6596/1399/4/044032
25. *Orlov, S., Susarev, S., Pugachev, A.* Intelligent diagnostic system of robotic KAMAZ vehicle's units// In: Proc. of XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). IEEE Xplore. 2019. P. 307-310. DOI: 10.1109/CTS48763.2019.8973367
26. *Popova-Zeugmann L.* Time and Petri Nets. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013.
27. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets. URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started> (accessed 20.12.2020).

Сведения об авторах

Сусарев Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, каф. «Автоматизация и управление технологическими процессами»; *Sergey V. Susarev, Ph.D. (Eng.), associated professor of the Department of Automation and Control of Technological Processes, susarev_sergey@mail.ru*

Орлов Сергей Павлович – д-т.н., профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника»; *Sergey P. Orlov Dr Sci (Eng.), Professor of the Department of Computer Technology, orlovsp1946@gmail.com*

Бизюкова Елизавета Евгеньевна, аспирант, каф. «Вычислительная техника»; *Elizaveta E. Bizyukova, post-graduate student of the Department of Computer Technology, lizaveta5.6@mail.ru*

Учайкин Роман Александрович, аспирант, каф. «Вычислительная техника»; *Roman A. Uchaikin, post-graduate student of the Department of Computer Technology, uchaikinra@yandex.ru*