

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
В РОБОТОТЕХНИКЕ И МЕХАТРОНИКЕ**

УДК 658.51

DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_1_148

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ АГРОТЕХНИЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ¹⁰****С.В. Сусарев¹, С.П. Орлов², Е.Е. Бизюкова³, Р.А. Учайкин⁴***Самарский государственный технический университет,
Россия, Самара, ¹ susarev_sergey@mail.ru, ² orlovsp1946@gmail.com,
³ lizaveta5.6@mail.ru, ⁴ uchaykinra@yandex.ru*

Аннотация. Рассматривается кибер-физическая система, включающая роботизированные агротехнические автомобили и комплекс имитационных моделей для проведения прогнозного технического обслуживания на основе постоянного мониторинга технического состояния. Представлена общая структура системы диагностики роботизированных автомобилей сельскохозяйственного назначения. Приведена иерархическая структура имитационных моделей для роботизированного автомобиля. Предложена модель на временной раскрашенной сети Петри, позволяющая оценить эффективность прогнозного технического обслуживания при заданном потоке отказов узлов и агрегатов автомобиля. Экспериментальные результаты подтвердили адекватность модели.

Ключевые слова: роботизированные автомобили, прогнозное техническое обслуживание, имитационное моделирование, сети Петри.

**THE MODELS FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF ROBOTIC
AGRICULTURAL VEHICLES****S.V. Susarev¹, S.P. Orlov², E.E. Bizyukova³, R.A. Uchaikin⁴***Samara state technical university,
Russia, Samara, ¹ susarev_sergey@mail.ru, ² orlovsp1946@gmail.com,
³ lizaveta5.6@mail.ru, ⁴ uchaykinra@yandex.ru*

Abstract. A cyber-physical system is considered, which includes robotic agricultural vehicles and a complex of simulation models for predictive maintenance based on continuous monitoring of the technical condition. The general structure of the diagnostic system for robotic agricultural vehicles is presented. The hierarchical structure of simulation models for a robotic vehicle is described. A model on a timed colored Petri net is proposed, making it possible to evaluate the effectiveness of predictive maintenance for a given failure rate of vehicle units and aggregates. The experimental results have confirmed the adequacy of the model.

Keywords: robotic vehicles, predictive maintenance, simulation, Petri nets.

Современное развитие робототехники в агротехнической промышленности приводит к задачам управления техническим обслуживанием и ремонтом роботизированных автомобилей (РА) [1]. Беспилотные грузовые автомобили представляют сложную кибер-физическую систему, объединяющую как агрегаты и механические узлы, так и автономные подсистемы управления, контроля и передачи информации. Наличие большого числа датчиков позволяет в реальном времени получать достаточный объем измерительной информации о техническом состоянии роботизированного автомобиля. В настоящей статье рассмотрены результаты исследований, проводимых СамГТУ совместно с ПАО «КАМАЗ» в рамках проекта по созданию системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей (СРСА) [2, 3].

Оснащение автономных автомобилей средствами измерения параметров и коммуникации с удаленными системами обработки информации позволило создавать «цифровые двойники» основных узлов и агрегатов автомобиля. Постоянный мониторинг дает возможность перейти от профилактического технического обслуживания (ТО) к

¹⁰ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 20-37-90014 и 20-08-00797).

прогнозируемому ТО (Predictive Maintenance [4]), которое является компонентом концепции Индустрия 4.0 и использует технологию «Интернет вещей» (IoT-технология).

При создании СРСА поставлена задача – разработка комплекса имитационных моделей для оценки, когда и в каком объеме следует проводить ТО индивидуального РА в зависимости от условий его эксплуатации. Это задача решалась на базе разработанной общей системы диагностики и прогнозирования технического состояния (СДиПТС) роботизированного автомобиля РА на основе модели-ориентированного подхода и инструментов сетевой концепции мониторинга автомобильного парка.

Обобщенная структура СДиПТС приведена на рис. 1.

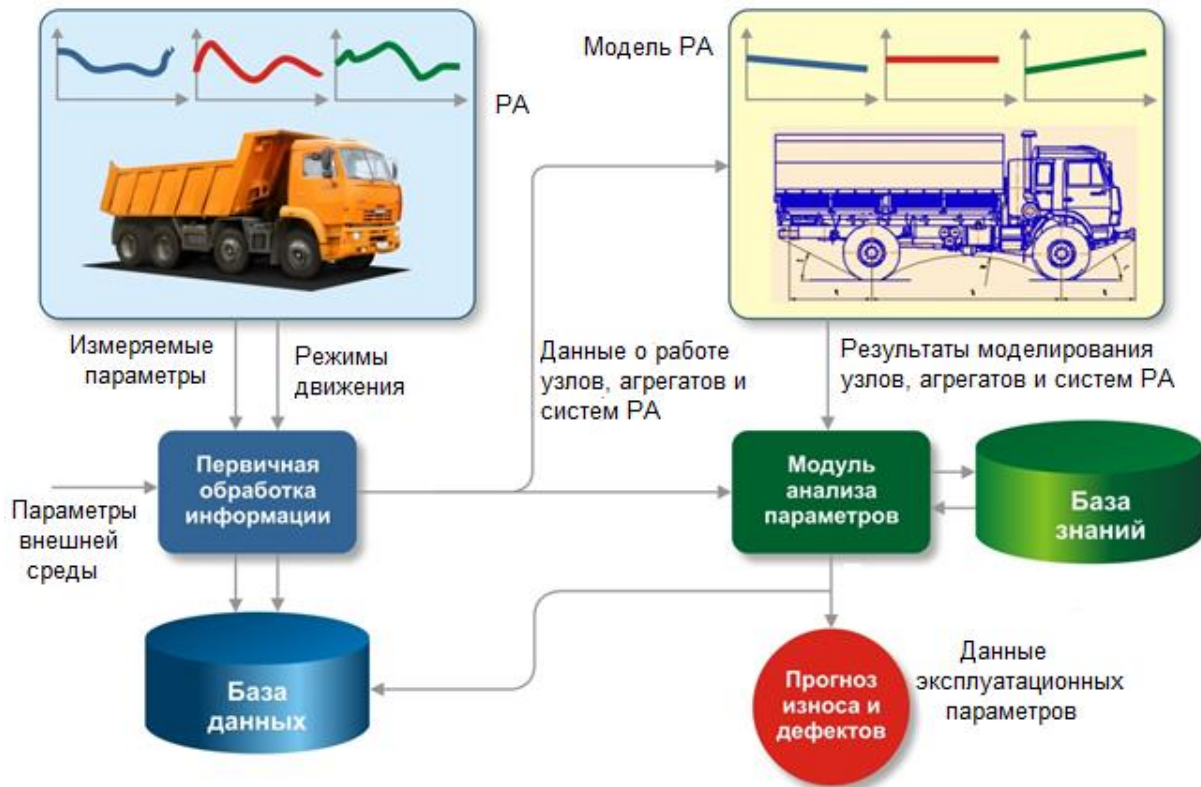


Рис. 1. Структура системы диагностики РА

В процессе эксплуатации роботизированного агротехнического автомобиля система решает следующие задачи:

- обработка данных из бортовых систем РА и хранение информации в облачном хранилище;
- анализ и статистическая обработка диагностических данных для определения их достоверности;
- идентификация показателей функционирования узлов, агрегатов и систем РА;
- сопоставление этих данных с соответствующими параметрами динамических моделей систем, адаптивных моделей износа и деградации систем (с учетом моделей взаимовлияния компонентов и систем);
- анализ расхождения параметров бортовой системы с модельными параметрами и выявление предотказных состояний систем, агрегатов и узлов;
- статистический анализ истории отказов узлов, агрегатов и систем с учетом истории эксплуатации РА, прогнозирование остаточного ресурса узлов, агрегатов и систем автомобиля;
- феноменологический анализ взаимного влияния систем, агрегатов, предотказов с учетом остаточного ресурса оборудования, агрегатов и узлов;
- формирование рекомендации по проведению прогнозного ТО РА.

Цифровые двойники узлов и агрегатов используются при анализе текущих параметрических характеристик реального автомобиля, получаемых постоянным мониторингом. При этом выполняются 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.) для формирования адекватной статистики функционирования автомобиля.

3. Передача информации в стационарную базу данных для накопления «истории» и ведения учета функционирования автомобиля (либо передача данных с помощью системы ГЛОНАСС при экстренных ситуациях – о ДТП и случайных дефектах).

4. Обработка статистических и параметрических данных в аналитическом модуле для определения наиболее вероятных преддефектных и предаварийных состояний для 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 РА, связанных с технологией прогнозного ТО.

При разработке СДиПТС принята концепция использования единого аппарата

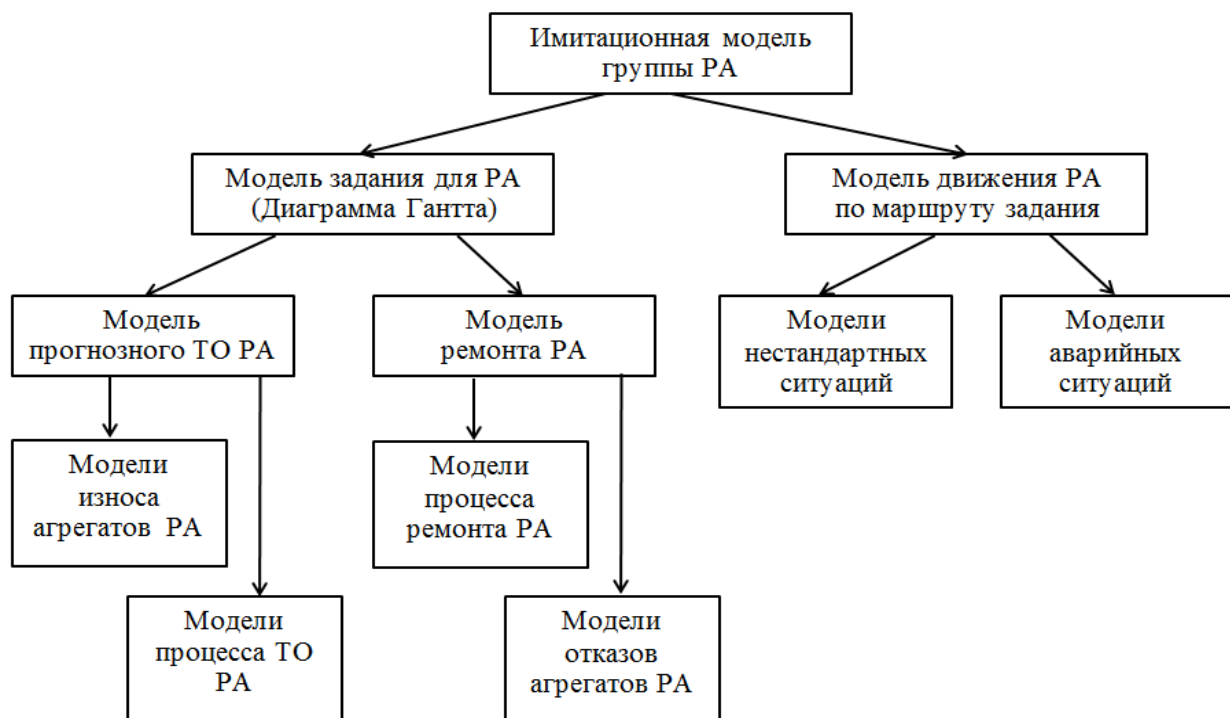


Рис. 2. Иерархическая структура имитационных моделей СРСА

для построения имитационных моделей в рамках этой структуры. Функционирование системы роботизированных автомобилей можно отнести к классу дискретно-событийных систем, в связи с этим использовали аппарата временных раскрашенных сетей Петри [5]. Такие модели легко структурируются по иерархии, как при нисходящей, так и при восходящей технологии разработки.

Временная раскрашенная сеть Петри CPN определяется как

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

где C – конечное множество цветов (colset); 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 $v \in V$, соответствующих цветам $c \in C$; F – конечное множество функций, которые используются как выражения для описания действий на дугах, соединяющих позиции и переходы; A – матрица инцидентности позиций и переходов, $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$; $w: T \rightarrow Z^+$ – функция времени срабатывания, присваивающая положительное целое число каждому переходу в сети.

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

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

где J – число РА; n_j – индивидуальный номер автомобиля; mod_j – модель РА; mdf_j – модификация модели; mil_j – пробег, км; $RM_j = \{t_{Mjk}\}$ – множество периодов времени до технического обслуживания агрегатов РА, час; $RL_j = \{t_{Ljk}\}$ – множество 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 будем на начальном этапе рассматривать описание РА как мультимножество $RA = \{n, "Model", mdf\}$. Например, роботизированный автомобиль модели КАМАЗ третьей модификации с индивидуальным номером 10 представляется как $\{10, "KAMAZ", 3\}$.

На рис. 3 приведена имитационная модель на временной раскрашенной сети Петри для исследования процессов ТО и ремонта РА при выполнении некоторого набора Z производственных задач. Модель (1) построена с использованием программной системы CPN Tools.

Модель представляет функционирование группы трех РА, причем один РА выполняет задачи z_1, z_2, \dots, z_5 , а два РА находятся в резерве (позиция Reserve). Для нее принято соотношение реального и модельного времени: 1 такт MTU = 0,5 часа, где MTU (model time unit) – единица модельного времени.

Комплекс задач включает: z_1 – движение РА по маршруту от базовой точки ВР к целевой точке ТР, z_2 и z_4 – маневрирование вблизи ТР, z_3 – выполнение производственной операции, z_5 – возврат РА на базовую точку. Две группы переходов и позиций в сети задают случайные процессы появления отказов (Failure) и запросы на техническое обслуживание (Maintenance) в соответствии с прогнозными оценками состояния узлов и агрегатов РА, находящегося на маршруте. Позиция Vehicle описывает техническое состояние роботизированного автомобиля, разрешая выполнение задач. В случае запроса на ТО или появления отказа РА выводится из эксплуатации и выполняется его замена исправным РА 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.

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 в идеальном случае (без отказов и ТО) время T_{SI} должно быть равно 1600 тактов. На вывод из эксплуатации и замену РА было затрачено 98 тактов или 49 часов. При этом видим, что в позицию Reserve поступили два автомобиля после ТО на 504 такте и ремонта на 1510 такте. Также показано, в какие моменты времени в будущем роботизированный

автомобиль в позиции Vehicle будет выведен из эксплуатации: а) запрос на ТО придет на 1882 такте; б) ремонт потребуется на 2376 такте.

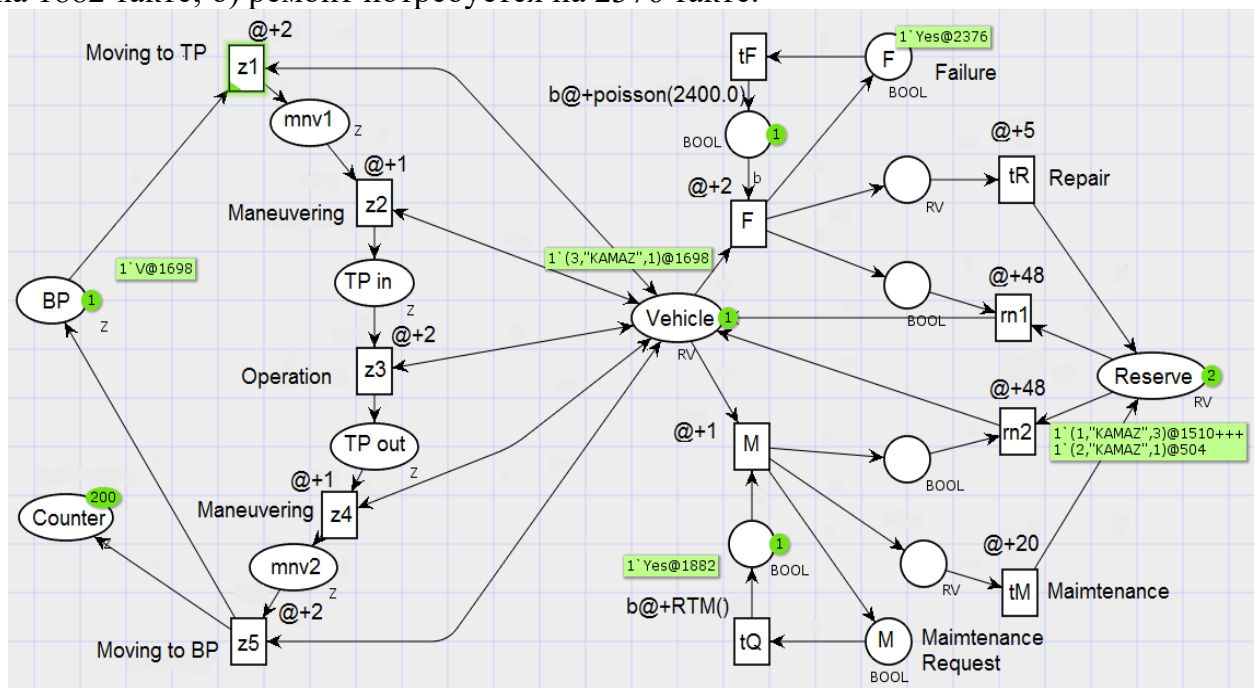


Рис. 3. Имитационная модель на временной раскрашенной сети Петри

Достоинство предложенной модели в том, что отдельные позиции и переходы могут быть, в свою очередь, представлены сложной сетью Петри. Например, позиция Reserve может быть общей для нескольких подсетей Петри, каждая из которых описывает работу отдельного роботизированного автомобиля.

В табл. 1 представлены результаты имитационного эксперимента на модели (рис. 3) для вариантов с различным числом резервных РА. Моделирование проводилось методом статистических испытаний.

Таблица 1. Результаты имитационного моделирования при интенсивности отказов $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-3}$ и среднем времени до ТО, равном 360 часов

Количество циклов	Время одного цикла T_Z , час	T_{Si} , час	T_{SM} , час	Коэффициент K_Z	Превышение срока задания Δ , час	Резерв РА, 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

Качество функционирования группы РА оценивается следующими показателями:

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

Дальнейшее развитие предложенной имитационной модели будет проводиться в следующих направлениях.

1. Детализация модели РА 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

$$K_Z = f(G, \Lambda, RM, RL, NR),$$

где G – диаграмма Ганта расписания задач Z , $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_K)$ – интенсивности отказов в узлах и агрегатах, RM – множество периодов времени до ТО для агрегатов, RL – множество значений остаточных ресурсов агрегатов, N_R – число резервных РА.

Все вышеперечисленные параметры задаются в соответствующих подсетях общей раскрашенной сети Петри.

2. Задание различных распределений случайных событий отказов и технического обслуживания для моделирования износа, деградации и дефектов в узлах автомобиля. В системе CPN Tools имеется возможность задания таких законов распределения случайных величин, как Вейбулла, равномерное, Пуассоновское, Эрланга, Стиюдента, Бернулли и др.

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

Полученные результаты показывают целесообразность использования в качестве имитационных моделей временных раскрашенных сетей Петри. Постоянный мониторинг роботизированных автомобилей и коррекция на его основе имитационных моделей положены в основу системы прогнозного технического обслуживания РА. Своевременное определение моментов проведения технического обслуживания позволяет сократить потери времени на вывод и замену транспортных средств. На основе разработанных моделей можно определить оптимальный состав резервных автомобилей, согласованный с расписанием выполняемых задач и порядком проведения технического обслуживания, что снижает эксплуатационные затраты.

Библиографический список

1. Коваленко Н.А. Организация технического обслуживания и ремонта автомобилей. М.: НИЦ ИНФРА-М. 2016. 229 с.
2. Орлов С.П., Сусарев С.В., Пугачев А.И. Интеллектуальная система диагностики агрегатов роботизированного автомобиля КАМАЗ // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции. Самара: ООО "Офорт". 2019. С. 2–95.
3. 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.
4. Chachada A. et al. Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture // 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Turin, Italy). 2018.
5. Silva J. R., del Foyo P. M. G. Timed Petri Nets // Petri Nets – Manufacturing and Computer Science. IntechOpen. 2012. Chapter 16. pp. 359–378.