

УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

CONTROL, MODELING, AUTOMATION

Научная статья
УДК 66.023:62
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2023-3-7-16>
EDN GCBYAZ

Системные модели парка автономных транспортных средств для виртуальных испытаний при организации технического обслуживания

Елизавета Евгеньевна Волхонская, Сергей Павлович Орлов[✉]

*Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия, orlovsp1946@gmail.com*[✉]

Аннотация. Рассматривается задача управления парком агротехнических автономных транспортных средств (АТС): автономных автомобилей и беспилотных зерноуборочных комбайнов. Система технического обслуживания такого парка должна обеспечивать реализацию различных стратегий эксплуатации, обслуживания и ремонта транспортных средств. С целью минимизации затрат и сокращения времени проектирования широко используются виртуальные испытания на основе цифровых двойников в виде математических и имитационных моделей. Предложен комплекс системных моделей для виртуальных испытаний АТС на этапе виртуального запуска в производство. Комплекс включает в себя две оптимизационные модели и имитационную модель агротехнической производственно-логистической системы. Сформулированы и решены задача нахождения оптимального календарно-сетевых графиков агротехнических работ и задача назначения АТС на производственные работы. Имитационная системная модель построена на стохастических временных раскрашенных сетях Петри. Приведена структура иерархической имитационной модели и описана модель технического обслуживания на основе сети Петри. Виртуальные испытания проводятся в виде статистического эксперимента на имитационной модели. Представлен пример полученных графиков коэффициента использования автономных автомобилей, которые позволяют определить периоды между профилактическим техническим обслуживанием. Выбор аппарата стохастических раскрашенных сетей Петри как основы имитационных моделей обусловлен удобством и возможностями задания вероятностных законов для исследуемых производственных процессов и процессов деградации и износа агрегатов АТС. Предложено формальное описание АТС в виде множеств с компонентами, соответствующими временным характеристикам и стоимостным параметрам. Проведение виртуальных испытаний на основе разработанных системных моделей позволяют сформулировать требования и рекомендации для организации эксплуатации и технического обслуживания АТС.

Ключевые слова: имитационная модель, системные модели, виртуальные испытания, автономные транспортные средства, техническое обслуживание, назначение, временные раскрашенные сети Петри

Для цитирования: Волхонская Е. Е., Орлов С. П. Системные модели парка автономных транспортных средств для виртуальных испытаний при организации технического обслуживания // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 3. С. 7–16. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2023-3-7-16>. EDN GCBYAZ.

Original article

Autonomous vehicle fleet system models for virtual tests in organizing maintenance

Elizaveta E. Volkhonskaya, Sergey P. Orlov✉

Samara State Technical University,
Samara, Russia, orlovsp1946@gmail.com✉

Abstract. The article considers the problem of managing a fleet of agricultural autonomous vehicles (AV) and unmanned combine harvesters. The maintenance system of such a fleet should ensure the implementation of various strategies for the operation, maintenance, and repair of vehicles. To minimize costs and reduce design time, virtual tests based on digital twins in the form of mathematical and simulation models are widely used. A set of system models used in the virtual testing of AV at the stage of virtual commissioning is proposed. The complex includes two optimization models and a simulation model of the agrotechnical production-logistics system. The problem of finding the optimal calendar network schedule for agrotechnical work and the problem of assigning AV to production work are formulated and solved. The simulation model is designed as a stochastic timed colored Petri net. The structure of the hierarchical simulation model is given and the maintenance model based on the Petri net is described. Virtual tests are carried out as a statistical experiment on a simulation model. There is given an example of the resulting graphs of the AV operating rate, which allows determining the periods between preventive maintenance. The choice of the apparatus of stochastic colored Petri nets as the basis of simulation models is due to the convenience and possibilities of setting probabilistic laws for production processes and the processes of AV units' degradation and deterioration. A formal description of AV in the form of multisets with components corresponding to time characteristics and cost parameters is proposed. Conducting virtual tests on the developed models makes it possible to formulate requirements and recommendations for organizing the operation and maintenance of AV.

Keywords: simulation model, system modes, virtual tests, autonomous vehicles, maintenance, assignment, timed colored Petri nets

For citation: Volkhonskaya E. E., Orlov S. P. Autonomous vehicle fleet system models for virtual tests in organizing maintenance. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2023;3:7-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2023-3-7-16>. EDN GCBYAZ.

Введение

Реализация концепции «Индустрия 4.0» обусловила активное развитие роботизированных комплексов, в том числе на транспорте. Беспилотные и дистанционно управляемые автономные транспортные средства (АТС) представляют собой сложную киберфизическую систему, объединяющую как агрегаты и механические узлы, автономные подсистемы управления, контроля и передачи информации, так и диагностические и моделирующие системы на основе цифровых двойников. Современный подход к проектированию сложных производственных систем базируется на проведении виртуальных испытаний с использованием цифровых двойников. Это позволяет выполнить виртуальный запуск в эксплуатацию создаваемых технических объектов до начала реальной эксплуатации и оценить качество проектных решений [1–3]. Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) являются важнейшим компонентом жизненного цикла АТС. Виртуальные испытания транспортных средств с имитацией различных режимов эксплуатации позволяют планировать мероприятия по прогнозному техническому обслуживанию (ТО) в условиях неопределенности [4, 5].

Гибкие производственные системы крупных предприятий включают внутреннюю транспортную структуру, которая, в совокупности с обрабатывающим оборудованием и складами, образует производственно-логистическую систему. Парк автономных транспортных средств формируется для осуществления погрузочно-разгрузочных работ и транспортировки грузов в пределах территории предприятия. Ряд производств характеризуется значительной площадью территории, на которой осуществляются производственные работы. К ним можно отнести добычу полезных ископаемых, крупные складские комплексы, агропромышленные предприятия. В этом случае особенно актуальной становится задача организации ТОиР транспортной техники с учетом значительного расстояния между сервисными центрами и местами выполнения производственных операций.

В статье предлагается подход к моделированию производственно-логистической системы агропромышленного предприятия, использующего парк АТС для проведения уборочных полевых работ. В качестве АТС рассматриваются автономные автомобили и беспилотные зерноуборочные комбайны агропромышленного предприятия. Цель моделирования – определить в процессе имитации различ-

ных сценариев производственных программ и стратегий ТОиР необходимую номенклатуру АТС, основные параметры оборудования сервисных центров, процедуры выполнения операций ТОиР.

Исследования проводились в рамках научно-исследовательских работ, выполненных специалистами Самарского государственного технического университета совместно с АО «КАМАЗ», по федеральной целевой программе по созданию робототехнического автомобиля сельскохозяйственного назначения [6, 7].

Производственно-логистическая система агропромышленного предприятия на базе автономных транспортных средств

В современном агропромышленном производстве активно развивается создание автономных автомобилей с дистанционным управлением и зерноуборочных беспилотных комбайнов [8–10].

На рис. 1 представлена структура производственно-логистической системы предприятия, ориентированного на производство зерновых культур.

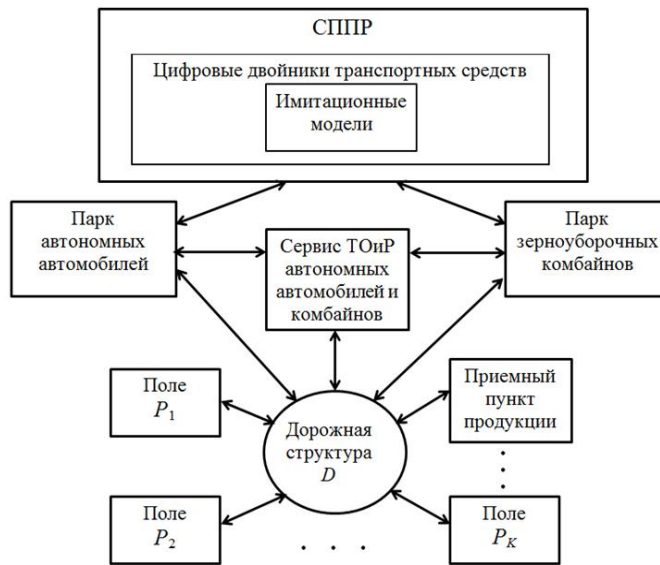


Рис. 1. Структура производственно-логистической системы агропромышленного предприятия

Fig. 1. The structure of the production and logistics system of an agro-industrial enterprise

Формальное определение компонентов системы задается следующим образом: $U = \{u_i\}, i = \overline{1, I}$ – парк зерноуборочных комбайнов; $A = \{a_n\}, n = \overline{1, N}$ – парк автономных автомобилей; $P = \{p_k\}, k = \overline{1, K}$ – множество полей, предназначенных для работ по уборке урожая; $Z = \{z_k\}, k = \overline{1, K}$ – множество работ по уборке K полей с зерновыми культурами; $G = (Z, T_z, Arc_z)$ – диаграмма календарно-сетевых графиков работ Z , где T_z – множество заданных длительностей выполнения работ, Arc_z – дуги между вершинами графа.

В структурной схеме на рис. 1 представлены следующие компоненты системы:

1. Парк автономных автомобилей A , который состоит из трех групп:

- множество активных автомобилей A^A , находящихся в эксплуатации и выполняющих работы Z ;

- множество резервных автомобилей A^R , прошедших ТО или ремонт и готовых к эксплуатации;
- множество каннибализируемых автомобилей A^C , предназначенных для снятия агрегатов и узлов для установки на активные автомобили.

При этом $A = A^A \cup A^R \cup A^C, A^R \cap A^C = \emptyset$.

2. Парк зерноуборочных комбайнов U , который организован аналогично парку автономных автомобилей и состоит из групп комбайнов U^A, U^R и U^C .

3. Дорожная структура, представляющая собой граф D топологии дорог, связывающих поля p_k , приемный пункт продукции и места базирования комбайнов, автономных автомобилей и сервисных центров.

4. Комплекс сервисных центров для ТОиР автономных автомобилей и беспилотных зерноуборочных комбайнов. В состав этого комплекса могут входить мобильные сервисы для обслуживания транспортных средств непосредственно на полях или маршрутах.

Volkonskaya E. E., Orlov S. P. Autonomous vehicle fleet system models for virtual tests in organizing maintenance

5. Система поддержки принятия решений по организации работ, распределению АТС и их ТО, которая базируется на цифровых двойниках транспортных средств и имитационных моделях производственных процессов.

В проектируемой системе ТОиР применяется стратегия каннибализации, заключающаяся в выделении множества полностью исправных транспортных средств, не использующихся в эксплуатации. При необходимости замены агрегатов и узлов какого-либо АТС и при отсутствии запасных частей на складе производятся снятие нужного агрегата с каннибализируемого автомобиля или комбайна и установка на обслуживаемое транспортное средство. Такая стратегия успешно использовалась в обслуживании авиационной техники. В работах [11, 12] описаны имитационные модели процесса ТО с каннибализацией. Использование стратегии каннибализации становится актуальным при возрастании неопределенности с организацией контрактов и поставок на запасные части импортных моделей транспортных средств или их комплектующих.

Системные модели и задачи управления парком автономных транспортных средств

Методика проведения виртуальных испытаний групп АТС базируется на оптимизационно-имитационном подходе, применяемом при управлении развитием сложного комплекса промышленных производств [13]. Согласно этому подходу на первом этапе формализуются и решаются оптимизационные задачи построения статической структуры исследуемой системы. На втором этапе создаются имитационные модели для изучения процессов, выполняющихся в системе. В случае несоответствия полученного решения требованиям, предъявляемым к системе, проводится коррекция параметров как оптимизационных, так и имитационных моделей. В результате итерационного процесса моделирования будет получено решение, на основе которого проектируется система ТО.

Оптимизационные и имитационные модели образуют комплекс системных моделей, который является цифровым двойником парка АТС, используемым в СППР.

$$x_{kin} = \begin{cases} 1, & \text{если для выполнения } k\text{-й работы назначены} \\ & i\text{-й комбайн и } n\text{-й автономный автомобиль;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

Целевая функция:

$$C = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N c_{kin} x_{kin} \right\}, \quad (4)$$

В соответствии с функциями рассматриваемой агротехнической производственно-логистической системы (см. рис. 1) будем использовать следующий набор системных моделей.

1. Оптимизационная задача составления расписания работ Z на полях P . Результатом решения является календарно-сетевой график G .

Ключевые показатели эффективности (КПИ):

– целевая функция минимизации суммарного времени простоев зерноуборочных комбайнов:

$$\Delta T_W = \min \left\{ \sum_i \sum_k \Delta T_{ik}^W \right\}, \quad (1)$$

где i и k – индексы комбайнов и полевых работ соответственно; ΔT_{ik}^W – время простоя при выполнении i -м комбайном работы z_k на поле p_k ;

– минимизация максимального времени T_Z выполнения всех работ Z сводится к поиску критического пути на графе G :

$$\min \{ T_Z = y_K - y_1 \}; \quad (2)$$

$$y_r - y_k \geq t_{kr}, \quad \forall v_{kr} \in Arc_Z, \quad (3)$$

где y_K – время окончания последней работы; y_1 – время начала первой работы; y_r, y_k – переменные, которые трактуются как ранние сроки завершения работ z_r и z_k , отсчитываемые от некоторого момента времени, общего для всех узлов сетевого графика G ; t_{kr} – время выполнения работы z_r , следующей после работы z_k ; v_{kr} – дуги между работами z_k и z_r .

Каждое ограничение (3) двойственной задачи связано с определенной работой, ограничения устанавливают отношения предшествования между различными операциями. Решение задач (1)–(3) проводится с учетом плановых заданий и имеющихся ресурсов.

2. Задача оптимального назначения комбайнов U и автономных автомобилей A для выполнения работ на полях P в соответствии с графиком G .

Рассматривается минимизация стоимости работ в производственно-логистической системе. Булеву переменную оптимизационной задачи определим как

где c_{kin} – стоимости выполнения операций комбайнами и АТС.

Ограничения задачи имеют вид:

– назначение комбайнов, не меньше заданного числа β_k , на работу на заданное поле p_k :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N x_{kin} \geq \beta_k, \forall n; k = \overline{1, K}; \quad (5)$$

– время простоев транспортных средств должно быть меньше допустимого значения:

$$|t_{ik}^R - t_{nk}^A| \leq t_W, \forall i, n; k = \overline{1, K}, \quad (6)$$

где t_{ik}^R – время работы комбайна до выгрузки зерна из бункера; t_{nk}^A – время транспортировки зерна на приемный пункт и возвращение ТС на поле k ; t_W – заданное предельное время простоя;

– условие соответствия загрузочных объемов комбайнов и автономных автомобилей:

$$V_i^U \leq V_n^A, \exists (i, n) (x_{kin} = 1), k = \overline{1, K}, \quad (7)$$

где V_i^U – объем бункера зерноуборочного комбайна; V_n^A – объем кузова автономного автомобиля;

– технические характеристики комбайнов и автомобилей должны находиться в допустимых границах:

$$q_{Um}^{\min} \leq q_m^U \leq q_{Um}^{\max}, m = \overline{1, M}; \quad (8)$$

$$q_{Al}^{\min} \leq q_l^A \leq q_{Al}^{\max}, l = \overline{1, L}, \quad (9)$$

где q_m^U – m -й параметр комбайна; M – число контролируемых параметров в комбайне; q_l^A – l -й параметр автомобиля; L – число контролируемых параметров автомобиля;

– ограничения на доступные ресурсы:

$$\sum_{i=1}^I x_{kin} \leq B_U, \forall k, n; \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{kin} \leq B_A, \forall k, i, \quad (11)$$

где $B_U = |U| - |U^R| - |U^C|$ – количество комбайнов и $B_A = |A| - |A^R| - |A^C|$ – количество автономных автомобилей, доступных к вводу в эксплуатацию, которые зависят от задаваемых чисел резервных и каннибализируемых транспортных средств.

Условие (7) обеспечивает полную загрузку автомобилей. Если при этом в бункере комбайна остается зерно, то это не прерывает его работу до следующего прибытия автономного автомобиля. При несоблюдении условий (7) автомобили будут недогружены, что приведет к снижению средней эффективности логистических операций.

В результате решения оптимизационных задач (1)–(11) получаем булеву матрицу назначений $\Theta(U, A, G)$ автономных автомобилей и беспилотных комбайнов на работы, которые задаются календарно-сетевым графиком G . Полученное решение определяет структуру работ и статическое распределение ресурсов, но не описывает динамику процессов в режиме эксплуатации в условиях значительной неопределенности внешней среды и вероятностного характера технических состояний транспортных средств.

Иерархическая имитационная модель производственных работ и технического обслуживания

Следующий этап виртуальных испытаний заключается в использовании имитационных моделей. Задача имитации состоит в исследовании динамики производственного процесса уборки урожая, транспортировки и ТОиР беспилотных зерноуборочных комбайнов и автономных автомобилей. В работе была использована иерархическая модель в виде стохастической временной раскрашенной сети Петри, построенная по методике, описанной в [14, 15] (рис. 2).

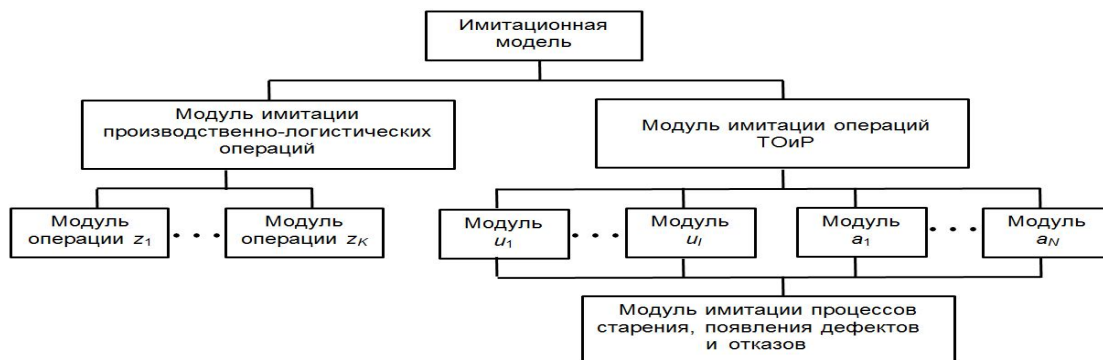


Рис. 2. Иерархическая имитационная модель процесса уборки урожая с использованием парка комбайнов и автономных автомобилей

Fig. 2. Hierarchical simulation model of the harvesting process using a fleet of combines and autonomous vehicles

Уровни иерархии модели соответствуют детализации анализируемого технологического процесса. На верхнем уровне модели имитируется процесс уборки зерна и передвижение автономных автомобилей по маршрутам. На нижних уровнях в модели представлены модули:

- описывающие производственные задачи z_1, \dots, z_k и функционирование АТС u_1, \dots, u_l и a_1, \dots, a_N ;
- имитирующие процессы появления отказов в отдельных транспортных средствах и процессы прогнозного ТО.

Виртуальные испытания на такой модели позволяют определить оптимальную стратегию ТО АТС.

$$ATS_j = (ID_j, MD_j, Mil_j, T_j^{RL}, T_j^{RM}, T_j^{AC}, C_j^E, C_j^M, C_j^W), j = \overline{1, J}, \quad (12)$$

где ID_j – индивидуальный номер АТС; MD_j – модель АТС; Mil_j – пробег, км; T_j^{RL} – остаточный ресурс, ч; T_j^{RM} – время до профилактического ТО АТС, ч; T_j^{AC} – суммарное время наработки, ч; C_j^E – стоимость эксплуатации единицы АТС, руб.;

В большинстве известных работ имитационные модели на раскрашенных сетях Петри реализуются с помощью программного средства CPN Tools [16]. Это средство было использовано нами при создании предлагаемой иерархической модели, которая построена на базе стохастических временных раскрашенных сетей Петри. Примеры разработки моделей ТО на стохастических сетях Петри можно найти в работах [17, 18].

Описание параметров АТС в раскрашенной сети Петри формулируется в виде мультимножества цветов:

C_j^M – стоимость ТО, руб.; C_j^W – потери от простоя одного АТС, руб.; J – число АТС.

На рис. 3 показан один из модулей иерархической имитационной модели, описывающий процесс ТОиР парка АТС.

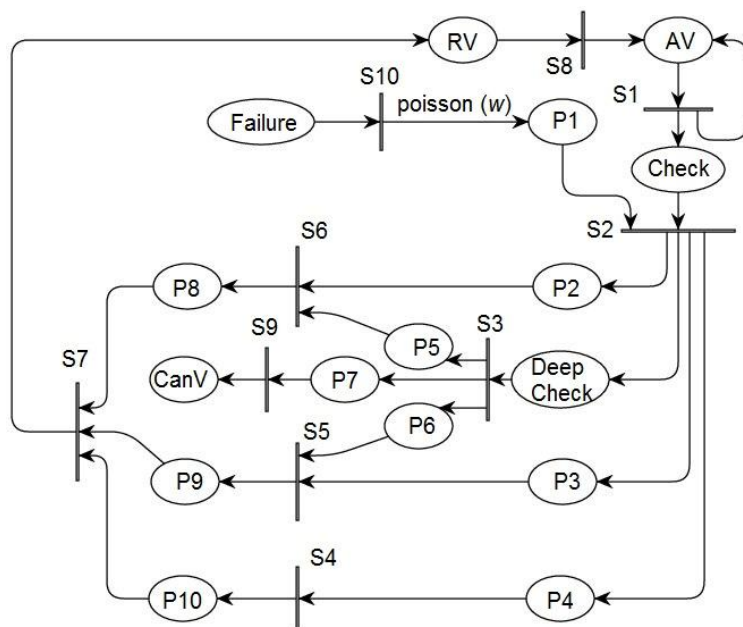


Рис. 3. Модуль имитации ТОиР: позиция AV содержит мультимножества активных автомобилей; позиция RV содержит резервные автомобили; S1–S10 – переходы; P1–P8 – позиции условий срабатывания переходов; позиция Failure имитирует появление отказа; poisson – выражение на дуге при задании пуассоновского закона отказов; позиция Check – условие стандартной проверки автомобиля; позиция Deep Check – условие детальной проверки; позиция CanV содержит каннибализируемые автомобили [11]

Fig. 3. Simulation module of maintenance and repair: place AV contains multisets of active vehicles; place RV contains reserve vehicles; S1–S10 – transitions; P1–P8 – places of transition firing conditions; place Failure simulates the occurrence of a failure; poisson – is the arc expression when setting the Poisson failure law; place Check is a condition of a standard vehicle check; place Deep Check – a condition for a detailed check; place CanV contains cannibalized vehicles [11]

Цвета в позициях соответствуют мультимножествам вида (12) и задают состояние транспортного средства: автономного автомобиля или беспилотного комбайна.

Выполнение производственных операций имитируется переходами S1–S10, их содержание приведено в таблице.

Интерпретация переходов в имитационной модели
Interpreting transitions in the simulation model

Переход	События и операции
S1	Ежедневное обслуживание
S2	Стандартная диагностика (Check)
S3	Детальная диагностика (Deep Check)
S4	Профилактическое обслуживание
S5	Текущий ремонт
S6	Капитальный ремонт
S7	Проверка работоспособности после ТО или ремонта и перевод АТС в резерв RV
S8	Перевод АТС в активное состояние AV
S9	Переход к стратегии каннибализации (снятие запчастей с исправного технического средства)
S10	Генерация случайных событий вида «Отказ»

В представленной модели на сети Петри переходы S1–S6, S9 являются подстановочными и реализуются, в свою очередь, замкнутыми имитационными модулями. Срабатывания перехода S10 происходят случайно, имитируя пуассоновский поток отказов агрегатов транспортного средства с интенсивностью w .

Процедура виртуальных испытаний с использованием системных моделей

Общая схема виртуальных испытаний АТС и системы ТО приведена на рис. 4.

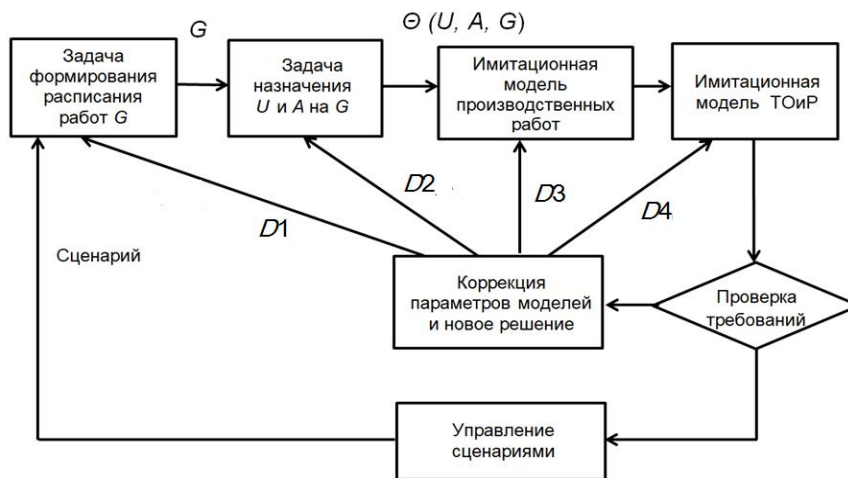


Рис. 4. Системные модели при виртуальных испытаниях: D1–D4 – корректирующие воздействия

Fig. 4. System models in virtual testing: D1–D4 – corrective action

Корректирующие воздействия D1–D4 – это векторы, элементы которых используются для изменения настроек соответствующих моделей:

- D1 определяет новые временные параметры для задачи оптимизации календарно-сетевых графиков;
- D2 задает новые условия для оптимизационной задачи назначения АТС (изменение числа резервных и каннибализируемых транспортных средств, изменение допустимых технических параметров комбайнов и автомобилей);

- D3 меняет сроки работ, среднюю производительность и среднюю скорость транспортных средств;
- D4 задает параметры вероятностных законов процессов износа агрегатов и событий отказов транспортных средств.

В блоке коррекции решения принимаются при участии группы аналитиков – специалистов по агротехнологиям и транспортным системам.

Результаты виртуальных испытаний на имитационных моделях

Исследования на комплексе системных моделей проводились для трех сценариев:

- сценарий 1 – нормальные условия эксплуатации беспилотных зерноуборочных комбайнов и автономных автомобилей;
- сценарий 2 – условия эксплуатации повышенной сложности (осадки, часть дорожного покрытия имеет повреждения);
- сценарий 3 – сложные условия эксплуатации (плохие погодные условия, большая часть дорог имеет повреждения).

Парк АТС формируется из беспилотных зерноуборочных комбайнов модели TORUM 785 с объемом бункера 12 000 л и роботизированных автомобилей на базе шасси КАМАЗ 65119 с объемом кузова от 10 000 до 18 000 л.

Анализ надежности АТС выполнялся путем имитации появления отказов в агрегатах в процессе эксперимента с использованием метода Монте-Карло. Программа CPN Tools позволяет задавать вероятностные законы с различными распределе-

ниями: нормальное, экспоненциальное, Вейбулла, гамма-распределение и др. В частности, исследовался коэффициент E использования транспортного средства A_j , который определяется как

$$E_n = \left(\sum_k t_{jk} / \sum_k t_k \right) \cdot 100 \%, \quad k \in I_j,$$

где t_{jk} – время работы автомобиля A_j при выполнении задачи z_k ; t_k – время выполнения задачи z_k ; I_j – индексное множество задач, для выполнения которых был назначен автомобиль A_j .

На рис. 5 показаны зависимости коэффициента использования E для двух автономных автомобилей A_1 и A_2 , которые получены в результате имитационного эксперимента на сети Петри, при этом моделировался парк из 30 автономных автомобилей КАМАЗ и 15 беспилотных зерноуборочных комбайнов TORUM; допустимое значение коэффициента использования в этом случае было принято равным 75 %, на рис. 5 ему соответствует пунктирная линия.

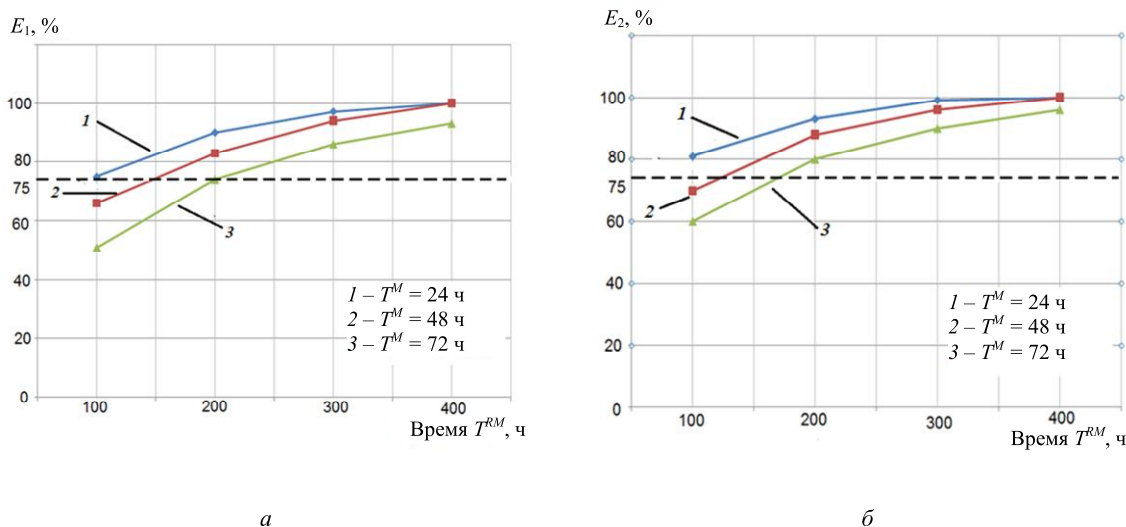


Рис. 5. Графики коэффициентов использования автономных автомобилей:
 а – E_1 для автомобиля A_1 ; б – E_2 для автомобиля A_2 ; T^M – время на проведение технического обслуживания

Fig. 5. Charts of autonomous car usage rates:
 а – E_1 for car A_1 ; б – E_2 for car A_2 ; T^M – time for maintenance

Обсуждение

Цель виртуальных испытаний – проведение проверки проектных и организационных решений по ТО парка транспортных средств до производства АТС и начала их реальной эксплуатации. Выполнение статистического эксперимента на предлагаемых моделях позволяет оценить стоимость затрат и производительность транспортной систе-

мы, а также параметры надежности отдельных транспортных средств: наработку на отказ, остаточный ресурс, ремонтпригодность, вероятность появления различных отказов и т. д. Например, устанавливая минимальный уровень коэффициента использования, можно определить допустимое время T^M на выполнение ТО автономного автомобиля и границы оставшегося времени T^{RM} до про-

ведения профилактического ТО. Используя стоимостные компоненты мультимножества (12), исследователь может оценить затраты на эксплуатацию и ТОиР при различных сценариях работы беспилотных комбайнов и автономных автомобилей.

Заключение

Предлагаемый подход к организации виртуальных испытаний на основе разработанных системных моделей является новым и позволяет провести всесторонний анализ различных аспектов работы

производственно-логистической системы агротехнического назначения. Комплекс системных моделей обладает гибкой структурой, что обеспечивает их адекватность при имитации различных условий эксплуатации автономных транспортных средств. Дальнейшие направления исследований связаны с разработкой интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении автономными транспортными средствами в условиях реальной эксплуатации.

Список источников

1. Süß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Kłodowski 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. P. 1–9.
2. 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. P. 1–4.
3. Орлов С. П., Бизюкова Е. Е., Яковлева А. Е. Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля // *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки*. 2021. Т. 29 (1). С. 46–57.
4. Щербаков М. В., 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. 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. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/237394312.pdf> (дата обращения: 23.01.2023).
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. V. 1399 (3). P. 033020 (1-5).
7. 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: тр. XXI Междунар. конф. Самара: ООО «Офорт», 2019. С. 171–174.*
8. RoboTrends. Роботизированные трактора. Каталог. URL: <http://robotrends.ru/robopeedia/robotizirovannye-traktora> (дата обращения: 20.01.2023).

9. Agrotrend. 9 проектов комбайнов-беспилотников. URL: <https://agrotrend.ru/news/11816-9-proektov-kombaynov-bespilotnikov/> (дата обращения: 20.01.2023).
10. ТракХолдинг. Самосвал КАМАЗ 65119-7915-5F АРГО (ЕВРО 5). URL: <https://www.truck-holding.ru/catalog/samosval-kamaz-65119-7915-5f.html> (дата обращения: 21.01.2023).
11. Sheng J., Prescott D. A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. V. 189. P. 67–88.
12. Sheng J., Prescott D. A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation // *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. V. 168. P. 290–305.
13. Акинфиев В. К., Цвиркун А. Д. Оптимизационно-имитационные методы в задачах управления развитием крупномасштабных систем // XII Всерос. совещ. по проблемам управления ВСПУ-2014 (Москва, 16–19 июля 2014 г.): сб. тр. М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 5690–5696.
14. Orlov S. P., Susarev S. V., Uchaikin R. A. Application of Hierarchical Coloured Petri Nets for Technological Facilities' Maintenance Process Evaluation // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. P. 1–28.
15. Сусарев С. В., Орлов С. П., Бизюкова Е. Е., Учайкин Р. А. Моделирование процессов прогнозного технического обслуживания роботизированных агротехнических автомобилей // *Математические методы в технологиях и технике*. 2021. № 1. С. 148–153.
16. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets. URL: <http://cpntools.org/> 2018/01/16/getting-started (дата обращения: 25.02.2023).
17. Lu Z. System Maintainability Modeling Method Based on Colored Stochastic Time Petri Net // *Journal of Mechanical Engineering*. 2011. V. 47. P. 185–192.
18. Lu Z., Liu J., Dong L., Liang X. Maintenance Process Simulation Based Maintainability Evaluation by Using Stochastic Colored Petri Net // *Appl. Sci*. 2019. V. 9. P. 3262.

References

1. Süß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Kłodowski 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.
2. 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. P. 1–4.

3. Orlov S. P., Biziukova E. E., Iakovleva A. E. Virtual'nye ispytaniia agregatov dlia virtual'nogo vvoda v proizvodstvo robotizirovannogo avtomobilia [Virtual testing of units for virtual production of robotic car]. *Vestnik Samar'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2021, vol. 29 (1), pp. 46-57.

4. Shcherbakov M. V., Sai Van K. Arkhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniia slozhnykh mnogoob'ektnykh sistem v kontseptsii Industrii 4.0 [Architecture of system of predictive maintenance of complex multi-object systems in concept of Industry 4.0]. *Programmnye produkty i sistemy*, 2020, no. 2, pp. 186-194.

5. 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.* Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/237394312.pdf> (accessed: 23.01.2023).

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 (3), pp. 033020 (1-5).

7. 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 [Architecture of system for diagnosing and predicting technical condition of robotic vehicle]. *Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh: trudy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii. Samara, OOO «Ofort», 2019. Pp. 171-174.*

8. *RoboTrends. Robotizirovannye traktora. Katalog* [RoboTrends. Robotic tractors. Catalogue]. Available at: <http://robotrends.ru/robopeedia/robotizirovannye-traktora> (accessed: 20.01.2023).

9. *Agrotrend. 9 proektov kombainov-bespiilotnikov* [Nine projects of unmanned harvesters]. Available at: <https://agrotrend.ru/news/11816-9-proektov-kombaynov-bespiilotnikov/> (accessed: 20.01.2023).

10. *TrakKholding. Samosval KAMAZ 65119-7915-5F ARGO (EVRO 5)* [TruckHolding. Dump truck KAMAZ 65119-7915-5F ARGO (EURO 5)]. Available at: <https://www.truck-holding.ru/catalog/samosval-kamaz-65119-7915-5f.html> (accessed: 21.01.2023).

11. 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.

12. 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.

13. Akinfiiev V. K., Tsvirkun A. D. Optimizatsionno-imitatsionnye metody v zadachakh upravleniia razvitiem krupnomasshtabnykh sistem [Optimization-simulation methods in problems of managing development of large-scale systems]. *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniia VSPU-2014 (Moskva, 16–19 iuliia 2014 g.): sbornik trudov. Moscow, Izd-vo In-ta problem upravleniia im. V. A. Trapeznikova RAN, 2014. Pp. 5690-5696.*

14. Orlov S. P., Susarev S. V., Uchaikin R. A. Application of Hierarchical Colored Petri Nets for Technological Facilities' Maintenance Process Evaluation. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, pp. 1-28.

15. Susarev S. V., Orlov S. P., Biziukova E. E., Uchaikin R. A. Modelirovanie protsessov prognoznoego tekhnicheskogo obsluzhivaniia robotizirovannykh agrotekhnicheskikh avtomobilei [Modeling predictive maintenance processes for robotic agricultural vehicles]. *Matematicheskie metody v tekhnologiiakh i tekhnike*, 2021, no. 1, pp. 148-153.

16. *CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets.* Available at: <http://cpntools.org/> 2018/01/16/getting-started (accessed: 25.02.2023).

17. Lu Z. System Maintainability Modeling Method Based on Colored Stochastic Time Petri Net. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, vol. 47, pp. 185-192.

18. 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, p. 3262.

Статья поступила в редакцию 15.03.2023; одобрена после рецензирования 20.06.2023; принята к публикации 11.07.2023
The article was submitted 15.03.2023; approved after reviewing 20.06.2023; accepted for publication 11.07.2023

Информация об авторах / Information about the authors

Елизавета Евгеньевна Волхонская – аспирант кафедры вычислительной техники; Самарский государственный технический университет; lizaveta5.6@mail.ru

Сергей Павлович Орлов – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры вычислительной техники; Самарский государственный технический университет; orlovsp1946@gmail.com

Elizaveta E. Volkhonskaya – Postgraduate Student of the Department of Computer Technology; Samara State Technical University; lizaveta5.6@mail.ru

Sergey P. Orlov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Computer Technology; Samara State Technical University; orlovsp1946@gmail.com

