

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL MODELING

Научная статья
УДК 004.942
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-1-112-124>
EDN DEEKLX

Имитационное моделирование парка автономных автомобилей при дефиците запасных частей

Сергей Павлович Орлов[✉], Анастасия Евгеньевна Яковлева

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

Аннотация. Управление парком автономных автомобилей включает ряд задач, среди которых распределение автомобилей по операциям производственно-логистического процесса и организация технического обслуживания. В условиях неопределенности воздействия внешней среды возникает проблема своевременного обеспечения запасными частями. Выполнение прогнозного технического обслуживания базируется на многофакторном анализе для сравнения сценариев эксплуатации и имитационном моделировании динамики процессов. Многофакторный анализ выполняется на этапе виртуальных испытаний с целью раннего планирования мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту. Предложено проводить верификацию результатов многофакторного анализа с помощью имитационных моделей на сетях Петри. Рассматривается комплекс автономных автомобилей, который разделяется на три группы: активные автомобили в эксплуатации, резервные автомобили и автомобили для реализации стратегии каннибализации, заключающейся в снятии запасных частей с выделенного каннибализируемого автомобиля при значительной задержке поставки партий запасных частей. Сформирована структура производственно-логистической системы и построен граф ее состояний в виде конечного автомата. Разработан алгоритм обеспечения технического обслуживания автономных автомобилей запасными частями с учетом вероятностных характеристик процессов. Построена иерархическая имитационная модель на стохастических временных раскрашенных сетях Петри. Модель содержит главный модуль и три модуля нижнего уровня для контроля времени операций, имитации процесса технического обслуживания, заказа и поставки запасных частей и формирования случайного потока запросов на техническое обслуживание и ремонт. Проведены статистические имитационные эксперименты для контроля сроков завершения работ и принятия решений по операциям резервирования и каннибализации. Проведение виртуальных испытаний на имитационной модели позволяет сформулировать требования и рекомендации при проектировании систем технического обслуживания автономных и беспилотных автомобилей.

Ключевые слова: автономные автомобили, техническое обслуживание, имитационное моделирование, виртуальные испытания, многофакторный анализ, стохастические раскрашенные сети Петри

Для цитирования: Орлов С. П., Яковлева А. Е. Имитационное моделирование парка автономных автомобилей при дефиците запасных частей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2026. № 1. С. 100–112. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-1-112-124>. EDN DEEKLX.

Original article

Simulation of a fleet of autonomous cars with a shortage of spare parts

Sergey P. Orlov[✉], Anastasia E. Yakovleva

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

Abstract. The management of a fleet of autonomous vehicles involves a number of tasks, including the distribution of vehicles to operations of the production and logistics process and maintenance organizations. In conditions of uncertainty of the impact of the external environment, the problem of timely provision of spare parts arises. Predictive maintenance is based on multi-factor analysis to compare operating scenarios and process dynamics simulation. Multi-factor analysis is performed at the virtual testing stage for early planning of maintenance and repair activities. The paper proposes to verify the results of multi-factor analysis using simulation models on Petri nets. A set of autonomous vehicles is considered, which is divided into three groups: active vehicles in operation, reserve vehicles, and vehicles for implementing the cannibalization strategy. This strategy consists of removing spare parts from a given cannibalized vehicle while significantly delaying the delivery of spare parts lots. The structure of the production and logistics system is formed and the graph of its states is built in the form of a finite state machine. An algorithm for providing autonomous vehicle maintenance with spare parts is developed taking into account the probabilistic characteristics of the processes. A hierarchical simulation model based on stochastic timed colored Petri nets was built. The model contains a main module and three lower-level modules for monitoring the operation time, simulating the maintenance process, ordering and delivering spare parts, and generating a random flow of requests for maintenance and repair. Statistical simulation experiments were conducted to control the deadlines for completing work and making decisions on reservation and cannibalization operations. Conducting virtual tests on a simulation model allows formulating requirements and recommendations for designing maintenance systems for autonomous and unmanned vehicles.

Keywords: autonomous vehicles, maintenance, simulation modeling, virtual testing, multi-factor analysis, stochastic colored Petri nets

For citation: Orlov S. P., Yakovleva A. E. Simulation of a fleet of autonomous cars with a shortage of spare parts. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2026;1:100-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-1-112-124>. EDN DEEKLX.

Введение

В настоящее время в мировой промышленности происходят кардинальные изменения в области разработки и внедрения интеллектуальных систем и роботизированных средств. В частности, большое внимание уделено созданию наземных автономных и беспилотных транспортных средств, ориентированных как на магистральные трассы, так и на распределенные производственные территории. Наличие в автономных автомобилях (АА) бортовых подсистем контроля параметров в совокупности с удаленными системами обработки информации позволяет создавать «цифровые двойники» агрегатов автомобиля.

Одним из важнейших компонентов технологии «Индустрия 4.0» стало внедрение концепции прогнозного технического обслуживания (Predictive Maintenance) [1, 2], использующего анализ данных, машинное обучение и искусственный интеллект для прогнозирования. В то же время, в отличие от планового технического обслуживания (ТО), при прогнозе ТО сложно заранее точно определить время закупки и поставки партий запчастей. Современные высокотехнологичные изделия, такие как беспилотные и автономные транспортные средства, в силу различных внешних факторов сталкиваются с про-

блемой дефицита запасных частей, особенно импортных комплектующих [3, 4]. Такая ситуация приводит к необходимости разработки цифровых моделей, в совокупности описывающих процессы функционирования АА и логистику поставки запасных частей как в реальном времени, так и при виртуальных испытаниях [5].

В рамках научно-исследовательских работ, выполненных ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» совместно с ПАО «КАМАЗ» в рамках Федеральной целевой программы по созданию системы робототехнических автомобилей, разработаны цифровые двойники основных подсистем и агрегатов АА. При этом основное внимание уделено созданию имитационных моделей, описывающих процессы износа и деградации элементов и появления отказов [6].

В настоящей статье описывается методика исследования процессов эксплуатации и технического обслуживания АА при обеспечении запасными частями с использованием стратегии каннибализации [7, 8]. Анализ производственных процессов проводится на базе имитационных моделей, использующих стохастические временные раскрашенные сети Петри [9–11].

Структура производственно-логистической системы

Рассматривается производственно-логистическая система, включающая парк AA автономных автомобилей, который содержит N единиц транспортных средств: $AA = \{A_n\}, n = \overline{1, N}$. Каждый автомобиль имеет свой индивидуальный (идентификационный) номер I . На первом этапе решаются две оптимизационные задачи:

а) ОЗ составления календарно-сетевого графика множества работ Z в соответствии с выбранным критерием, в нашем случае минимумом планируемого времени работ T_{ZPLn} ;

б) ОН оптимального назначения AA на заданное множество работ Z в соответствии с критерием минимизации стоимости эксплуатации; постановка такой задачи предложена в работе [12].

В результате решения оптимизационной целочисленной задачи назначений проводится разбиение множества AA на 3 группы:

– множество AT активных автомобилей, участвующих в эксплуатации для выполнения заданных

работ Z : $AT = \{AT_j\}, j \in I_T, I_T$ – индексное множество номеров автомобилей;

– множество AR резервных автомобилей: $AR = \{AR_i\}, i \in I_R, I_R$ – индексное множество номеров резервных автомобилей;

– множество AC каннибализируемых автомобилей $AC = \{AC_k\}, k \in I_C, I_C$ – индексное множество номеров автомобилей, выделенных для процесса каннибализации запасных частей.

Для образованных подмножеств автомобилей должны выполняться условия:

$$AA = AT \cup AR \cup AC; AT \cap AR = \emptyset;$$

$$AT \cap AC = \emptyset; AR \cap AC = \emptyset;$$

$$|I_T| + |I_R| + |I_C| = N.$$

На рис. 1 представлен пример взаимодействия основных блоков, входящих в общую структуру производственно-логистической системы, а на рис. 2 приведен граф состояний системы AA в виде конечного автомата, обозначения на графе раскрыты в табл. 1.

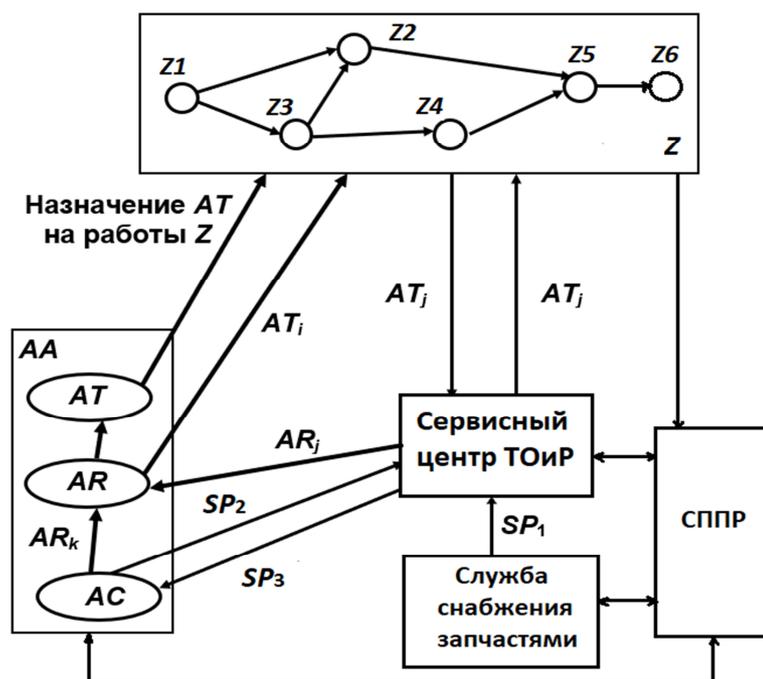


Рис. 1. Структура производственно-логистической системы: Z_1 – Z_6 – производственные работы; SP_1 – партия запчастей, заказанная для ТОиР; SP_2 – запасные части, снимаемые с AC при каннибализации; SP_3 – запасные части для восстановления каннибализируемого автомобиля; AT_i – резервный автомобиль; AT_j – автомобиль, направленный на ТОиР; AR_k – каннибализируемый автомобиль, переходящий в резерв

Fig. 1. The structure of the production and logistics system: Z_1 – Z_6 – production work; SP_1 – a batch of spare parts ordered for M&R; SP_2 – spare parts removed from AC during cannibalization; SP_3 – spare parts for restoration cannibalized car; AT_i – reserve vehicle; AT_j – vehicle sent for maintenance and repair; AR_k – cannibalized vehicle transferred to reserve

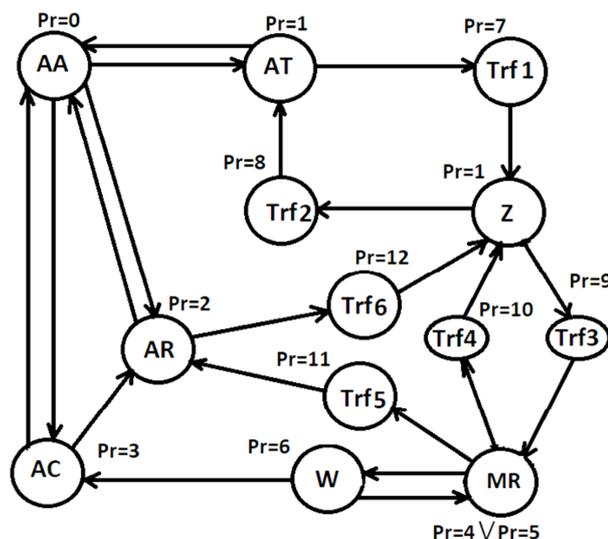


Рис. 2. Граф конечного автомата, описывающего производственно-логистическую систему

Fig. 2. The graph of a finite state machine describing a production and logistics system

Таблица 1

Table 1

Состояния и признаки в графе на рис. 2

States and signs in the graph in Fig. 2

Состояние	Признак Pr	Значение
AA	0	Начальное состояние: автомобиль в парке
AT	1	Автомобиль, назначенный на работы Z
AR	2	Резервный автомобиль
AC	3	Каннибализируемый автомобиль
MR	4, 5	Техническое обслуживание (признак 4) и ремонт (признак 5)
W	6	Ожидание доставки запасных частей для автомобиля AT
Trf1	7	Автомобиль в состоянии трансфера из парка к месту выполнения работы Z
Trf2	8	Автомобиль возвращается в парк
Trf3	9	Автомобиль в состоянии трансфера в сервисный центр для ТОиР
Trf4	10	Автомобиль возвращается на выполнение работ Z
Trf5	11	Автомобиль в состоянии трансфера в резерв
Trf6	12	Автомобиль в состоянии трансфера из резерва в эксплуатацию на работы Z

Календарно-сетевой график работ Z определяет последовательность и длительности выполняемых AA операций Z_1-Z_6 . Управление процессами обеспечивается с помощью системы поддержки принятия решений (СППР).

Во время эксплуатации проводится мониторинг и диагностика технических состояний автомобилей из набора AT. В случае обнаружения у автомобиля AT_j неисправности либо при необходимости проведения регламентного или прогнозного технического обслуживания AT_j выводится из эксплуатации и направляется в сервисный центр технического обслуживания и ремонта (СЦ ТОиР).

При наличии запасных частей для своевременного технического обслуживания автомобиль AT_j после ТО возвращается в эксплуатацию для выполнения работ Z. Если же планируемая длительность работ по ТО достаточно большая и остановка выполнения операций Z недопустима, то один из резервных автомобилей AR_i получает статус активного ($AR_i \rightarrow AT_j$) и переводится в эксплуатацию. При этом обслуживаемый автомобиль AT_j по завершении ТОиР переводится в резервное состояние ($AT_j \rightarrow AR_j$).

В статье [13] разработана методика виртуальных испытаний системы AA, основанная на оценке

множества сценариев эксплуатации с помощью многофакторного анализа. Однако использованный метод DEA не позволяет учесть влияние вероятностных факторов, связанных с процессами эксплуатации в различных условиях.

Предлагается дополнить такое исследование процедурой имитационного моделирования различных сценариев на базе стохастических временных раскрашенных сетей Петри, что обеспечивает задание случайных законов для различных параметров. Множество сценариев анализируется при проведении статистических экспериментов на имитационных моделях с заданием исходных данных как по внешним условиям эксплуатации, так и по техническим и производственным показателям АА.

Имитационное моделирование эксплуатации и ТОиР

Поставки запасных частей SP_1 в сервисный центр производятся по заявкам. Для AT_j , планируемого к ТОиР, производится расчет времени t_{cnd} поставки партии запасных частей и допустимое время T_{D1} ожидания поставки. При $t_{cnd} \leq T_{D1}$ автомобиль AT_j

находится в состоянии W до получения запасных частей (см. рис. 2). Если расчетное время больше допустимого $t_{cnd} > T_{D1}$, то сразу происходит перевод резервного автомобиля на выполнение работы Z . Далее анализируется текущее время t ожидания задерживающейся партии запасных частей, при этом автомобиль AT_j находится в сервисном центре. Проверяется условие $t > T_{D2}$, где T_{D2} – предельное время задержки ТОиР автомобиля вследствие непоставки запчастей.

Если $t > T_{D2}$, то принимается решение о снятии запасных частей SP_2 с каннибализируемого автомобиля AC для ТОиР. После прибытия ожидаемой партии запасных частей производится восстановление каннибализируемого автомобиля AC (SP_3 , см. рис. 1).

Возможен вариант полного восстановления некоторого каннибализируемого автомобиля AC_k до состояния работоспособности. Тогда, при необходимости, выполняется перевод этого автомобиля в множество AR резервных для дальнейшей эксплуатации ($AC_k \rightarrow AR_k$).

Алгоритм работы имитационной модели представлен на рис. 3.

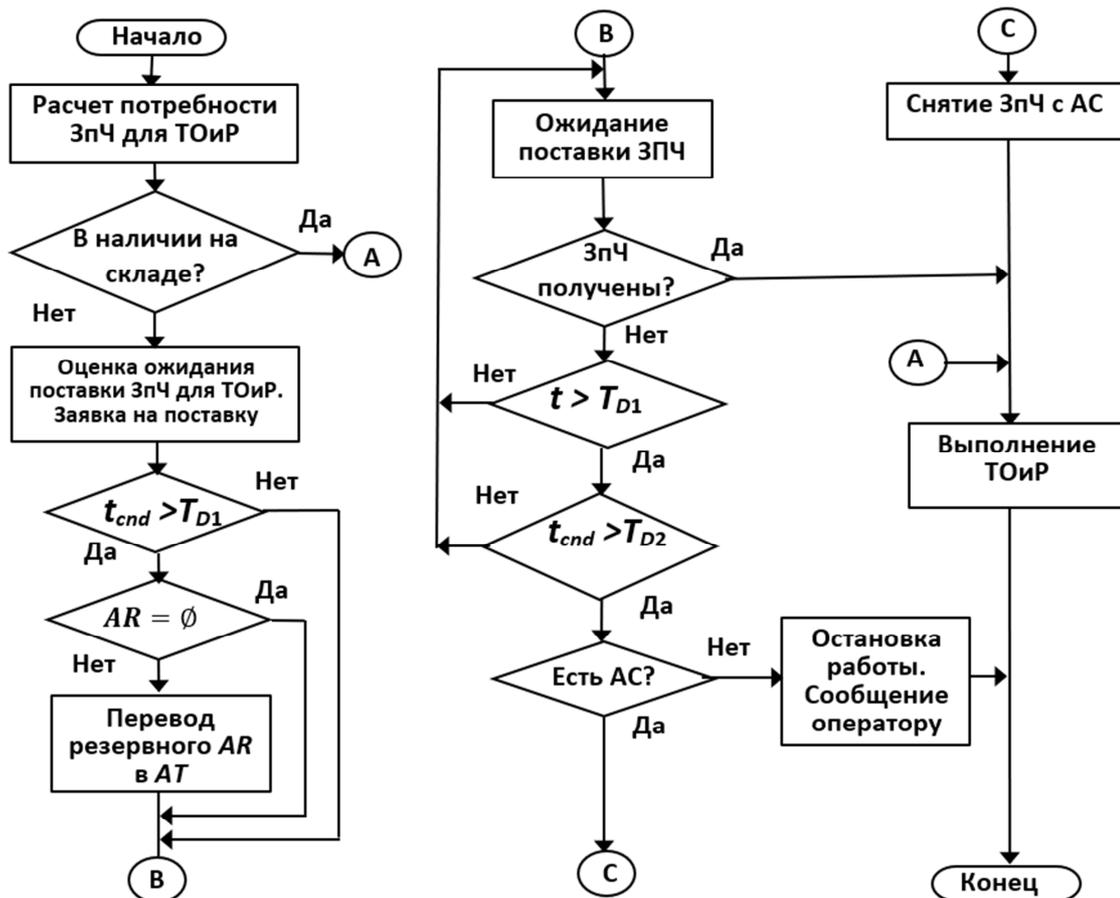


Рис. 3. Алгоритм обеспечения автономных автомобилей запасными частями для ТОиР

Fig. 3. The algorithm for providing autonomous vehicles with spare parts for M&R

Имитационная модель имеет иерархическую структуру, содержащую вложенные модули на сетях Петри, которые реализуются с помощью программы CPN Tools [14].

Прогнозирование дефицита запасных частей необходимо выполнять с учетом убытков, вызванных простоем АА в ожидании начала операций ТОиР. С целью оценки экономических показателей в разработанных имитационных моделях АА описываются с помощью вектора параметров

$$AA_j = (Id, L_{ml}, C_Z, C_E, t_{RL}, t_A, t_W), \quad (1)$$

где Id – индивидуальный номер автомобиля; L_{ml} – пробег, тыс. км; C_Z – стоимость произведенной продукции при выполнении работ Z ; C_E – стоимость эксплуатационных затрат при выполнении работ Z ; t_{RL} – остаточный ресурс, тыс. ч; t_A – время активной работы по выполнению работ Z , ч; t_W – время простоя, ч.

Удобство применения моделей на раскрашенных

сетях Петри обусловлено возможностью описания множества разнородных параметров с помощью «цветных» маркеров. Эти маркеры могут иметь постоянное значение или могут менять свои значения по заданным формулам. Например, в выражении (1) ряд параметров: стоимость продукции, время активной работы и другие – зависят от текущего модельного времени.

В разработанной имитационной модели построены составные множества цветов (Colset [14]), описывающие каждый АА и партии запасных частей в соответствии с выражением (1):

$$\text{Colset A} = \text{product ID} * \text{LML} * \text{CZ} * \text{CE} * \text{TRL} * \\ * \text{TBA} * \text{TA} * \text{TBW} * \text{TW}; \quad (2)$$

$$\text{Colset SP} = \text{product ID} * \text{S1} * \text{S2} * \text{TS},$$

где «*» – знак композиции множеств цветов, принятый в нотации сетей Петри, а сущности цветов и смысл соответствующих переменных модели показаны в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Множества цветов в модели

The Color Sets in the model

Colset	Переменная для цвета	Значение цвета
$ID = \text{string timed}$	id	Индивидуальный номер АА
$LML = \text{int time}$	ml	Пробег
$CZ = \text{int timed}$	cz	Стоимость произведенной продукции
$CE = \text{int timed}$	ce	Стоимость эксплуатационных затрат
$TRL = \text{int timed}$	tr	Остаточный ресурс
$TA = \text{int timed}$	ta	Время активной работы
$TW = \text{int timed}$	tw	Время простоя
$TBA, TBW = \text{int timed}$	ta, tw	Начальные моменты активного периода и периода простоя АА
$S1 = \text{int timed}$	s1	Артикул запасной части по номенклатуре производителя
$S2 = \text{int timed}$	s2	Стоимость единицы детали
$TS = \text{int timed}$	ts	Время подачи заявки в службу снабжения
$A = \text{product timed}$	a	Вектор параметров автомобиля_
$SP = \text{product timed}$	sp	Вектор параметров партии запчастей

На рис. 4 показан основной модуль Z верхнего уровня модели.

Модули нижнего уровня представлены «подстановочными» переходами сети Петри (изображены прямоугольниками с утолщенной рамкой).

К ним относятся:

– модуль TimeZ – управление периодами активности АА;

– модуль MR – имитация процессов технического обслуживания и ремонта АА и поставки партий запасных частей;

– модуль SimF выполняет генерацию случайных событий отказов или появления дефектов, приводящих к выводу АА из эксплуатации на ТОиР.

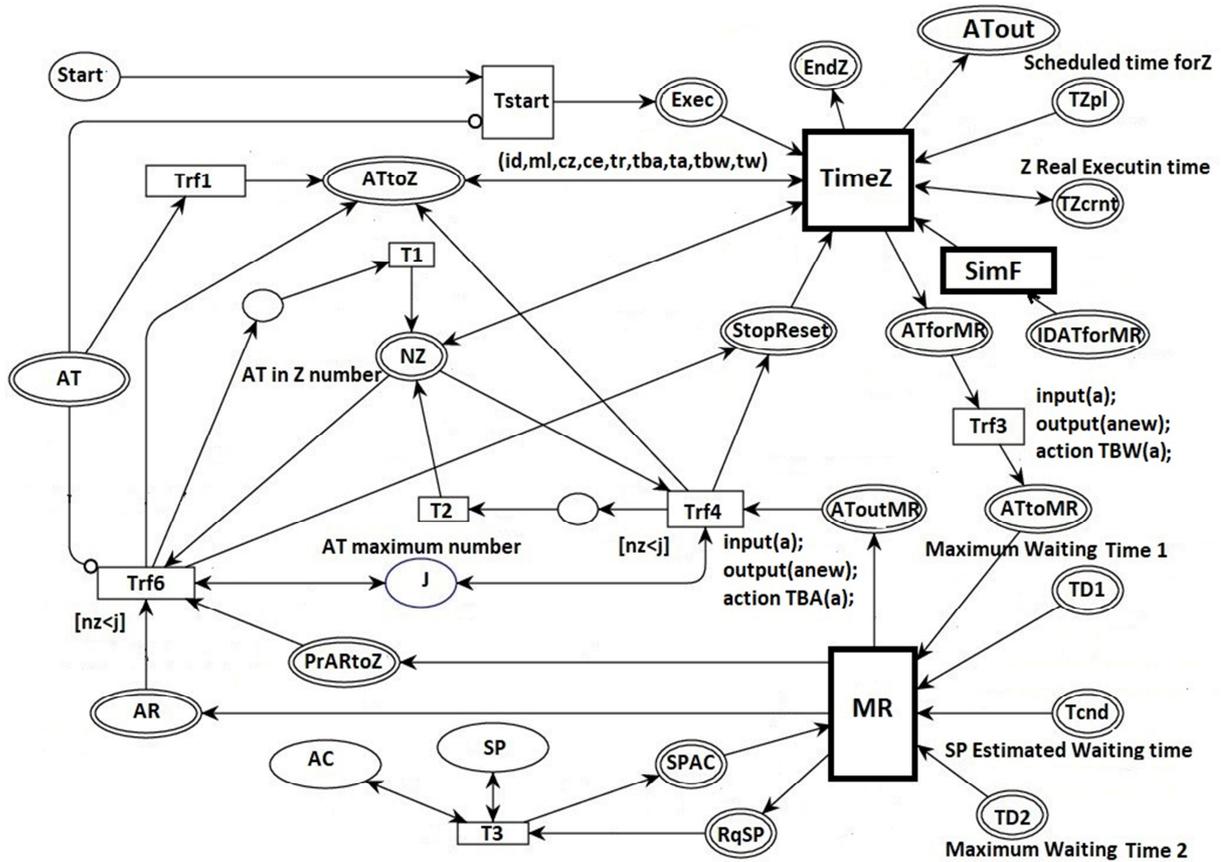


Рис. 4. Основной модуль Z иерархической модели на сети Петри

Fig. 4. The main module Z of the hierarchical model on a Petri net

В табл. 3 приведено описание значений позиций сети Петри.

Таблица 3

Table 3

Описание позиций основного модуля сети Петри
 Description of the positions of the main module of the Petri net

Позиция	Значение
AT	Активные автомобили
AR	Резервные автомобили
AC	Каннибализируемые автомобили
START	Начало работы модели
ATtoZ	Активные автомобили, назначенные на работы Z
ATout	Автомобили, завершившие работы Z
TZPln	Плановое время выполнения работ Z
TZcrnt	Текущее время выполнения работ Z
Exec	Начало работы модуля TimeZ
EndZ	Признак завершения работ Z
IDATforMR	Номера автомобилей для предстоящего обслуживания или ремонта
ATforMR	Автомобили, выведенные из эксплуатации на ТОиР
NZ	Текущее количество AA на работах Z
J	Заданное количество AA на работах Z
ATtoMR	Автомобили, прибывшие в сервисный центр на ТОиР

Окончание табл. 3

Ending of Table 3

Позиция	Значение
AToutMR	Автомобили, завершившие ТОиР
TD1	Допустимое время ожидания партии запчастей
Tcnd	Расчетное время поставки партии запчастей
TD2	Предельное время на поставку запчастей
PrARtoZ	Разрешение перевода резервного автомобиля в активный для выполнения Z
RqSP	Запрос на снятие партии запчастей с каннибализируемого автомобиля
SP	Доступные запчасти на каннибализируемом AC
SPAC	Снятая с AC партия запчастей для выполнения ТОиР

Переходы в данной модели соответствуют графу на рис. 2 и реализуют описанную выше логику операций в производственно-логистической системе. Позиция NZ используется для контроля числа AA, выполняющих работу Z. Переходы Trf4 и Trf6 срабатывают только при условии, что количество

AA меньше заданного числа J. Таким образом, эти переходы переводят в эксплуатацию либо резервные автомобили, либо AA, прошедшие ТОиР.

Основные операции ТОиР имитируются в модуле MR, который представлен на рис. 5, главные позиции и переходы модуля описаны в табл. 4.

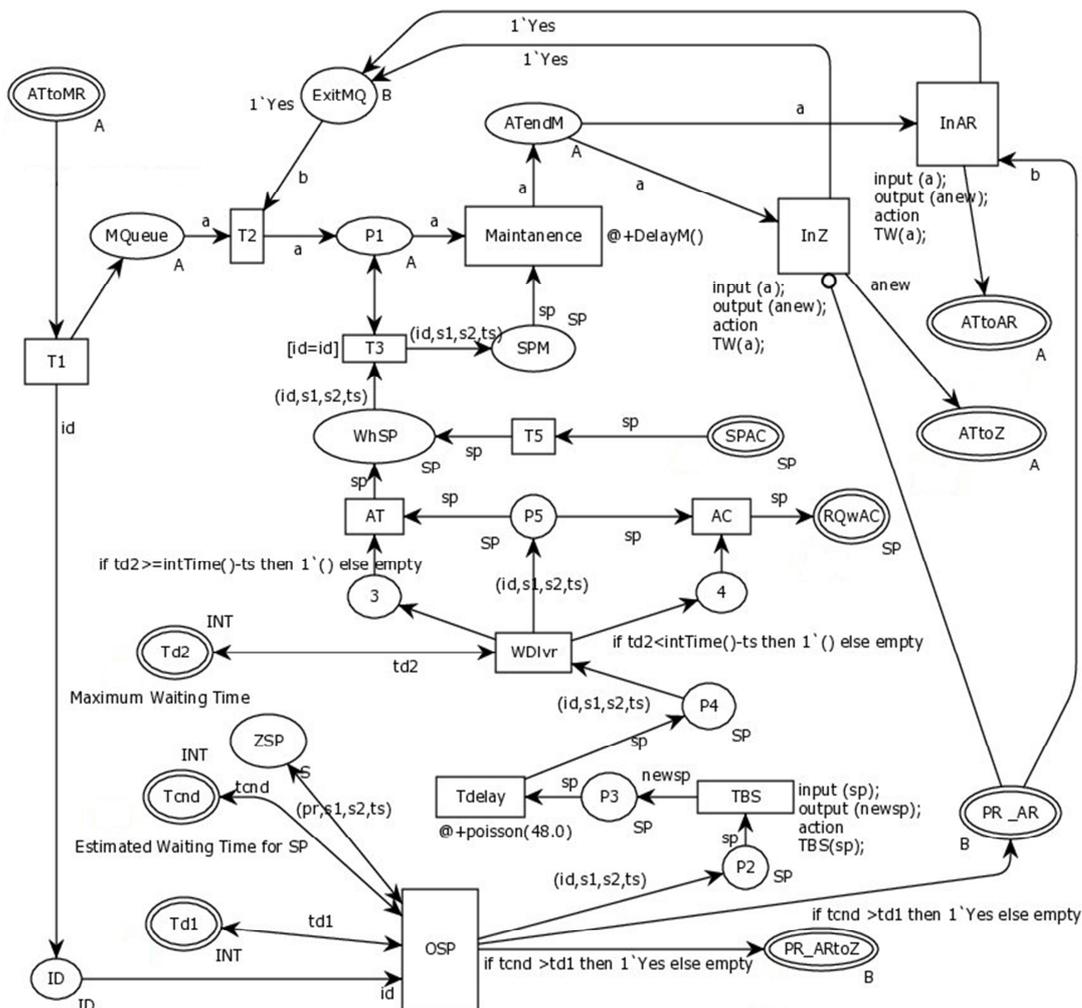


Рис. 5. Модуль MR имитации ТОиР и поставки запчастей

Fig. 5. MR module for simulating M&R and spare parts supply

Orlov S. P., Yakovleva A. E. Simulation of a fleet of autonomous cars with a shortage of spare parts

Таблица 4
Table 4

Описание основных позиций и переходов модуля MR

Description of the main positions and transitions of the MR module

Позиция	Значение
ATMR	АА, поступившие на ТОиР
tcnd	Расчетное время поставки партии запчастей
TD1	Допустимое время ожидания партии запчастей
TD2	Предельное время ожидания запчастей для начала каннибализации
SPM	Запчасти, поступившие для ТОиР
Pr AR	Признак перевода АА в резервный
RQwAC	Запрос запчастей с каннибализируемого автомобиля
SPAC	Партия запчастей с каннибализируемого автомобиля
ATtoZ, ATtoAR	Автомобили, направленные на работу или в резерв соответственно
MQueue	Очередь АА на ТОиР
Переход	Действие
T1	Постановка АА в очередь на ТОиР
OSP	Формирование параметров партии запчастей
TBS	Задание времени подачи заявки на запчасти
Tdelay	Имитация задержки поставки запчастей
WDlvr	Проверка предельного времени ожидания
AC	Переход к каннибализации запчастей
T3	Проверка соответствия номера АА и партии запчастей
Maintenance	Выполнение ТОиР
inAR, inZ	Перевод АА в резервный или на выполнение Z

В модели на сети Петри, построенной в CPN Tools [14], существуют средства, позволяющие формировать заданные функции изменения параметров АА по выражению (1). Для этого используется составной колсет (2) и в декларациях сети Петри описываются необходимые функции. В декларациях сети Петри также определены функции ТВА и ТА, присваивающие переменной t_a^i значение суммарного времени активной работы i -го АА только при выполнении работ Z:

$$t_a^i = \sum_j t_{aj}^i,$$

где t_{aj}^i – периоды времени нахождения маркера автомобиля в модуле TimeZ.

Эти функции выполняются на переходе Trf4 в модуле Z (см. рис. 4) и в модуле TimeZ. Аналогично функции TBW на переходе Trf3 (см. рис. 4) и TW в модуле MR (см. рис. 5) вычисляют суммарное время t_w^i простоя i -го АА:

$$t_w^i = \sum_k t_{wk}^i,$$

где t_{wk}^i – периоды времени нахождения маркера автомобиля в модуле MR.

Результаты экспериментов

На рис. 6 приведен фрагмент сети Петри с тер-

минальным маркером в позиции ATout после завершения работ Z.

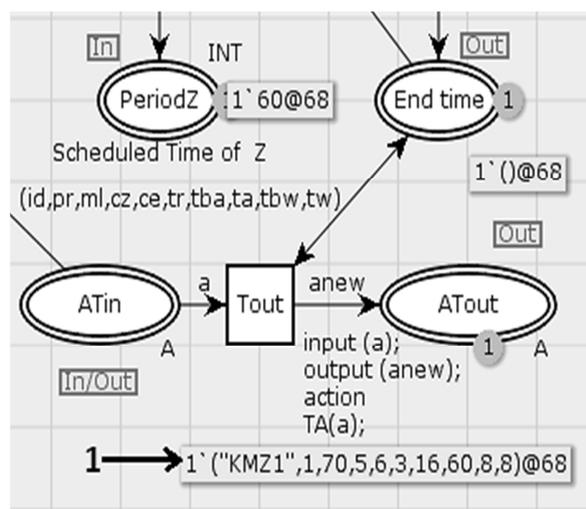


Рис. 6. Результат эксперимента на имитационной модели: 1 – терминальный маркер после завершения моделирования

Fig. 6. Experiment result using a simulation model: 1 – terminal marker after completion of the simulation

Установлено модельное время: 1 такт = 1 ч. Значение реального времени активной работы автомобиля КМЗ1 получено равным $ta = 60$ ч при плановом сроке также 60 ч (позиция PeriodZ). Автомобиль КМЗ1 был отправлен на ТОиР через 8 ч работы (предпоследнее число в маркере). Простой tw на ТОиР составил 8 ч. После этого на 16-м часе КМЗ1 продолжил выполнение работы Z до ее полного завершения. Всего на операции Z затрачено 68 ч.

На предложенной имитационной модели был проведен ряд статистических экспериментов с различными сценариями ТО и обеспечения запасными частями. Рассматривался парк из 5 АА КАМАЗ марки 65115 на роботизированном шасси. Начальное распределение парка АА: AT – 3 активных автомобиля, AR – 1 резервный автомобиль и AC – 1 каннибализуемый автомобиль.

Плановая длительность работы Z принималась

равной $T_{ZPLn} \in \{200, 400, 600, 800, 1\ 000\}$ ч, а расчетное время поставки запчастей t_{cnd} в разных экспериментах бралось из набора $\{24, 48, 72\}$ ч.

В имитационной модели устанавливались следующие вероятностные законы:

1) запросы на ТОиР в модуле TimeZ распределены по равномерному закону DelayR на заданном отрезке;

2) поступление партий запчастей описывается пуассоновским законом с заданной величиной математического ожидания;

3) время выполнения регламентных работ по ТОиР в модуле MR распределено равномерно (DelayM) в заданном диапазоне.

В табл. 5 приведены значения исходных данных для имитационного моделирования описанной выше конфигурации парка АА.

Таблица 5

Table 5

Параметры модели для эксперимента

Parameters of the experimental model

Параметр	Вид закона распределения	Наборы значений параметров			
		P1	P2	P3	P4
Задержка на ТОиР DelayM, ч	Равномерный на отрезке [a, b]	[6, 84]	[10, 24]	[6, 84]	[10, 24]
Задержка поставки запчастей, ч	Пуассоновский, Мат. ожидание	48		80	
Запросы на ТОиР DelayR, ч	Равномерный на отрезке [a, b]	[100, 200]			

Разработанная имитационная модель позволяет определить различные ключевые показатели АА, связанных с временными периодами. Далее приведены для примера 3 показателя, но это не полный перечень:

1. Коэффициент K_W превышения планового срока выполнения работ

$$K_W = \frac{T_{ZR} - T_{ZPLn}}{T_{ZPLn}} \cdot 100 \%,$$

где T_{ZR} – реальное время выполнения работ; T_{ZPLn} – плановое время завершения работ Z .

2. Коэффициент уровня обеспеченности запасными частями [8]:

$$K_O = \frac{M_{Srq}}{M_{rq}} \cdot 100 \%,$$

где M_{rq} – число заявок на поставку партий запасных частей; M_{Srq} – число успешных поставок зап-

частей, при ожидании которых не пришлось использовать каннибализацию автомобиля.

3. Для каждого АА в имитационной модели определяется коэффициент использования

$$K_{Aj} = \frac{T_{aj}}{T_{ZPLn}} \cdot 100 \%,$$

где T_{aj} – время активной работы j -го АА.

Для примера на рис. 7 показана зависимость коэффициента K_W от параметров, заданных в табл. 5.

Допустимый уровень коэффициента K_W принят равным 15 % и отмечен на рис. 7 пунктирной линией. Анализ показывает, что наименьшее отступление от планового срока обеспечивает набор параметров $P2$ (см. табл. 5), начиная с работ со сроком больше 430 ч. По результатам эксперимента на модели получен достаточно большой объем данных, который позволяет оценить эффективность различных сценариев эксплуатации и обслуживания комплекса АА.

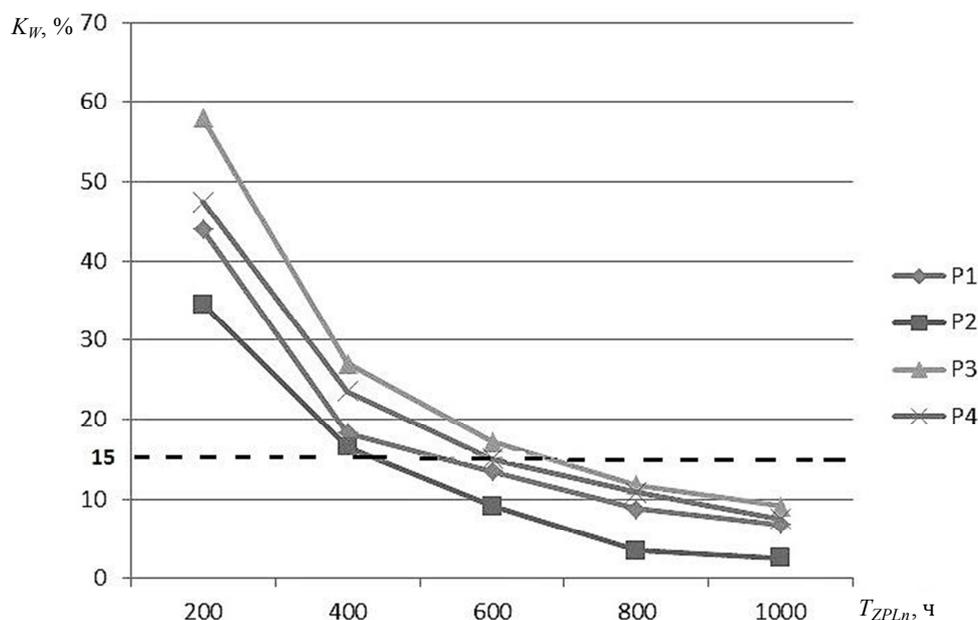


Рис. 7. График коэффициента K_W превышения планового срока выполнения работ

Fig. 7. Graph of the K_W coefficient of exceeding the planned work completion date

Обсуждение

Сочетание многофакторного анализа и имитационного моделирования составляет основу для разработки методики управления парком АА. Такая процедура может выполняться в виде виртуальных испытаний при долгосрочном планировании производственных работ. С другой стороны, при краткосрочном или оперативном планировании многофакторный анализ служит для оценки эффективности стратегических решений в сочетании с учетом реальных условий, существующих в данный момент, для прогнозного имитационного моделирования.

Возможности разработанной имитационной модели не исчерпываются приведенными в статье примерами. Дальнейшие исследования связаны с задачами моделирования других случайных факторов для анализа ситуаций с неопределенностями в процессе поставок запасных частей. Использование инструмента CPN Tools имеет определенные ограничения на количество задаваемых объектов в модели. В частности, это касается числа АА, которое не должно превышать 50.

Следует отметить, что предложенная имитационная модель может применяться и для исследова-

ния парка обычных транспортных средств. При этом не всегда имеется информация для задания вероятностных характеристик. Однако взаимодействие основных компонент производственно-логистической системы может быть изучено достаточно подробно.

Заключение

Отличительной особенностью предложенной модели является анализ процесса обеспечения запасными частями и управление парком автомобилей при применении стратегии каннибализации.

Использование разработанной имитационной модели в составе цифрового двойника АА при виртуальных испытаниях, а также последующий многофакторный анализ сценариев [13] позволяет производителю автомобильной техники проектировать систему ТОиР наиболее эффективным образом. В результате предприятия, эксплуатирующие автономные и беспилотные автотранспортные средства, получают научно обоснованные организационные, финансовые и технические рекомендации.

Список источников

1. Möller D. P. F., Vakilzadian H., Haas R. E. From Industry 4.0 towards Industry 5.0 // Proc. 2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (Manakato, MN, USA). IEEE Xplore, 2022. P. 61–68.
2. 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.

3. Кропивенцева С. А. Управление сроками поставки запасных частей и комплектующих воздушных судов в центр технического обслуживания и ремонта // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2020. Т. 23. № 05. С. 29–38.

4. Булатов С. В. Повышение эффективности управления запасными частями на автотранспортном предприятии при наличии страхового запаса // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. 2021. № 9 (106). С. 43–48.

5. 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.

6. Волхонская Е. Е. Управление распределением и техническим обслуживанием роботизированных транспортных средств на основе цифровых моделей: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2024. 20 с.

7. Волхонская Е. Е., Орлов С. П. Модель стратегии канибализации при техническом обслуживании роботизированных автомобилей // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки. 2023. № 1. С. 52–56.

8. Любомиров И. С. Эффективность стратегий канибализации в системе технического обслуживания с ограничениями по запасным частям, ремонту и ресурсам //

Науч. вестн. МГТУ ГА. 2012. № 178. С. 27–32.

9. Sheng J., Prescott D. A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalization // *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. V. 168. P. 290–305.

10. 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.

11. Орлов С. П., Сусарев С. В. Имитационные модели на сетях Петри для анализа процессов обслуживания и ремонта сложных технических систем // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. 2022. Т. 30 (4). С. 49–75.

12. Волхонская Е. Е. Задача оптимального назначения автономных транспортных средств в производственно-логистической системе // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. 2023. Т. 31. № 3. С. 20–30.

13. Орлов С. П., Яковлева А. Е., Сусарев С. В. Многофакторный анализ эффективности автономных транспортных средств на основе метода анализа среды функционирования // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 3. С. 7–16.

14. CPN Tools. Modeling with Colored Petri Nets. URL: <https://cpntools.org/2018/01/08/modeling-with-colored-petri-nets/> (дата обращения: 02.03.2025).

References

1. Möller D. P. F., Vakilzadian H., Haas R. E. From Industry 4.0 towards Industry 5.0. Proc. 2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (Manakato, MN, USA). *IEEE Xplore*, 2022. Pp. 61-68.

2. Shcherbakov M. V., Saj Van K. Arhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh mnogoob'ektnykh sistem v koncepcii Industrii 4.0 [The architecture of the predictive maintenance system for complex multi-object systems in the context of Industry 4.0]. *Programmnye produkty i sistemy*, 2020, no. 2, pp. 186-194.

3. Kropivenceva S. A. Upravlenie srokami postavki zapasnykh chastej i komplektuyushchih vozdushnykh sudov v centr tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta [Managing the delivery time of aircraft spare parts and components to the maintenance and repair center]. *Nauchnyj vestnik MGTU GA*, 2020, vol. 23, no. 05, pp. 29-38.

4. Bulatov S. V. Povyshenie effektivnosti upravleniya zapasnymi chastyami na avtotransportnom predpriyatii pri nalichii strahovogo zapasa [Improving the efficiency of spare parts management at a motor vehicle company in the presence of a stock]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 9 (106), pp. 43-48.

5. Orlov S. P., Bizyukova E. E., Yakovleva A. E. Virtual'nye ispytaniya agregatov dlya virtual'nogo vvoda v proizvodstvo robotizirovannogo avtomobilya [Virtual testing of units for virtual commissioning of a robotic vehicle]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 46-57.

6. Volhonskaya E. E. *Upravlenie raspredeleniem i tekhnicheskim obsluzhivaniem robotizirovannykh transportnykh sredstv na osnove cifrovyykh modelej. Dissertatsiya ... kand. tekhn. nauk* [Management of distribution and maintenance of robotic vehicles based on digital models. Dissertation ... Candidate of Technical Sciences]. Samara, 2024. 20 p.

7. Volhonskaya E. E., Orlov S. P. Model' strategii kanni-

balizacii pri tekhnicheskome obsluzhivanii robotizirovannykh avtomobiley [A cannibalization strategy model for the maintenance of robotic vehicles]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2023, no. 1, pp. 52-56.

8. Lyubomirov I. S. Effektivnost' strategij kanni-balizacii v sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya s ogranicheniyami po zapasnym chastyam, remontu i resursam [Effectiveness of cannibalization strategies in a maintenance system with limited spare parts, repairs, and resources]. *Nauchnyj vestnik MGTU GA*, 2012, no. 178, pp. 27-32.

9. Sheng J., Prescott D. A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalization. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, vol. 168, pp. 290-305.

10. 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.

11. Orlov S. P., Susarev S. V. Imitatsionnye modeli na setyah Petri dlya analiza processov obsluzhivaniya i remonta slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Simulation models based on Petri nets for analyzing the processes of maintenance and repair of complex technical systems]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2022, vol. 30 (4), pp. 49-75.

12. Volhonskaya E. E. Zadacha optimal'nogo naznacheniya avtonomnykh transportnykh sredstv v proizvodstvenno-logisticheskoy sisteme [The task of optimal assignment of autonomous vehicles in the production and logistics system]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2023, vol. 31, no. 3, pp. 20-30.

13. Orlov S. P., Yakovleva A. E., Susarev S. V. Mnogofaktornyj analiz effektivnosti avtonomnykh transportnykh sredstv na osnove metoda analiza sredy funkcionirovaniya [Multifactorial analysis of the effectiveness of autonomous

vehicles based on the method of analyzing the operating environment]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2024, no. 3, pp. 7-16.

14. *CPN Tools. Modeling with Colored Petri Nets*. Available at: <https://cpntools.org/2018/01/08/modeling-with-colored-petri-nets/> (accessed: 02.03.2025).

Статья поступила в редакцию 15.07.2025; одобрена после рецензирования 19.08.2025; принята к публикации 16.01.2026
The article was submitted 15.07.2025; approved after reviewing 19.08.2025; accepted for publication 16.01.2026

Информация об авторах / Information about the authors

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

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

Анастасия Евгеньевна Яковлева – ассистент кафедры автоматизации и управления технологическими процессами; Самарский государственный технический университет; nastya-yakovleva-97@mail.ru

Anastasia E. Yakovleva – Lecturer of the Department of Automation and Control of Technological Processes; Samara State Technical University; nastya-yakovleva-97@mail.ru

