

# МОДЕЛЬ СТРАТЕГИИ КАННИБАЛИЗАЦИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

## CANNIBALIZATION STRATEGY MODEL FOR ROBOTIC VEHICLE MAINTENANCE

*E. Volkhonskaia  
S. Orlov*

*Summary.* The article is devoted to the problem of organizing maintenance of a robotic car group with remote control. The complexity of robotic vehicles, high cost and requirements for their reliability necessitate the selection of effective maintenance strategies. Problems with the availability of spare parts and their timely delivery make it advisable to use cannibalized vehicles to reduce downtime. The simulation model based on a colored Petri net is proposed to analyze the processes of operation, maintenance and repair of autonomous vehicles. Experiments have been carried out to evaluate different service scenarios. The obtained results are used in planning the robotic vehicle maintenance.

*Keywords:* robotic vehicle, simulation, maintenance, colored Petri nets.

*Волхонская Елизавета Евгеньевна*  
Аспирант, Самарский государственный  
технический университет  
lizaveta5.6@mail.ru

*Орлов Сергей Павлович*  
Д.т.н., профессор, Самарский государственный  
технический университет  
orlovsp1946@gmail.com

*Аннотация.* Статья посвящена проблеме организации технического обслуживания группы роботизированных автомобилей с дистанционным управлением. Сложность роботизированных транспортных средств, высокая стоимость и требования к их надежности обуславливают необходимость выбора эффективных стратегий технического обслуживания. Проблемы с наличием запасных частей и их своевременной доставкой приводят к целесообразности использования каннибализуемых транспортных средств для сокращения простоев. Предложена имитационная модель на раскрашенной сети Петри для анализа процессов эксплуатации, обслуживания и ремонта автономных автомобилей. Проведены эксперименты по оценке различных сценариев обслуживания. Полученные результаты применяются при планировании сервисного обслуживания роботизированных автомобилей.

*Ключевые слова:* роботизированные автомобили, моделирование, техническое обслуживание, раскрашенные сети Петри.

## Введение

**Р**оботизированные автомобили (РА) с дистанционным управлением активно внедряются в логистические операции на промышленных предприятиях и в агротехнических фирмах при работе на территориях большой площади. Это обусловило разработку методов и моделей организации технического обслуживания и ремонта РА с учетом удаленности от центров сервисного обслуживания. Наличие в РА развитой бортовой системы мониторинга и передачи данных о состоянии в процессе эксплуатации позволяет перейти от периодического технического обслуживания к прогнозному обслуживанию [1].

Исследования по созданию цифровых двойников и имитационных моделей на сетях Петри для виртуальных испытаний с целью наилучшей организации технического обслуживания и ремонта автономных транспортных средств описаны в работах [2, 3].

Одной из основных задач является выбор эффективных стратегий технического обслуживания. Специфика удаленного использования РА с дистанционным управлением приводит к развитию стратегии технического обслуживания, которая носит название «каннибализация» [4]. Каннибализация заключается в таком техническом обслуживании, при котором производится заимствование агрегатов и компонентов с одного роботизированного автомобиля для замены неисправных элементов на других РА в тех случаях, когда необходимые запасные части недоступны. В результате, можно за короткое время восстановить до работоспособного состояния РА, вышедшие из строя, не перемещая их в удаленный центр технического обслуживания.

Идеи такого обслуживания впервые были реализованы в авиационной отрасли. В частности, в работах [5, 6] подробно изучены модели стратегии каннибализации для флота воздушных судов.

Таблица 1. Положения сети Петри

Положение	Значение положения
AV	Множество РА в состоянии «Активный», участвующих в производственном процессе
MV	Автомобили в состоянии «Обслуживаемый», выведенные из эксплуатации на время технического обслуживания
Prq	Запрос на получение запасной части от каннибализируемого РА
Ps	Готовность запасной части для установки на обслуживаемый РА
P1	Готовность РА для перевода в модуль CV
P2	Готовность РА для перевода из состояния каннибализируемого автомобиля в состояние «Активный»

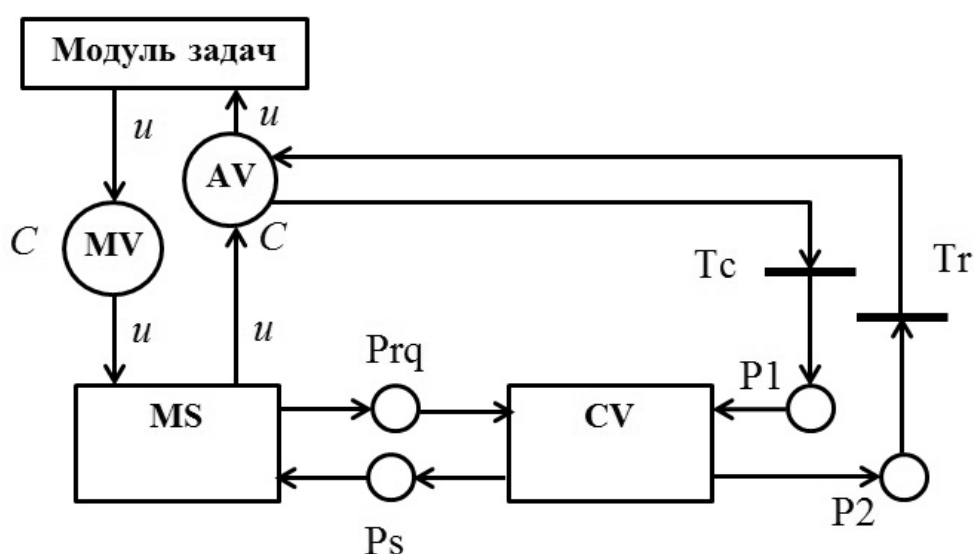


Рис. 1. Структура модулей иерархической модели технического обслуживания

### Модель стратегии каннибализации при техническом обслуживании

Предлагаемая модель обслуживания разработана для системы роботизированных агротехнических автомобилей в рамках проекта с ПАО «КАМАЗ» [7]. Модель построена на базе сетей Петри

[8]. Классическая сеть Петри задается в виде:

$$C = (P, T, A, \mu), \quad (1)$$

где  $P$  — множество позиций, обозначаемых на графе кружками,  $T$  — множество переходов, обозначаемых прямоугольниками,  $A$  — множество дуг, соединяющих позиции с переходами,  $\mu(P)$  — маркировка сети, соответствующая распределению маркеров по позициям.

Для различных прикладных задач были разработаны расширения сети Петри (1), которые обеспечили

новые функциональные возможности при моделировании. В настоящее время наиболее востребованы стохастические временные раскрашенные сети Петри STCPN [8], позволяющие описывать временные задержки и имитировать различные вероятностные законы событий в сети.

В настоящей статье представлена модель технического обслуживания на основе STCPN с иерархической структурой. В этом случае, в сети Петри верхнего уровня присутствуют переходы, которые называются подстановочными. Эти переходы затем заменяются вложенными сетями Петри нижнего уровня. Такой подход удобен при проектировании модели «сверху вниз».

Общая структура модели технического обслуживания РА приведена на рис. 1.

Подстановочные переходы «Модуль задач», MS и CV образуют верхний уровень иерархической сети.

Таблица 2. Набор цветов раскрашенной сети Петри модели технического обслуживания

Множество цветов	Переменные цветов	Значение
N	n	Индивидуальный номер роботизированного автомобиля
Mark	mk	Марка РА, {КАМАЗ, МАЗ, Вольво}
Model	md	Модификация из модельного ряда РА
Mil	ml	Пробег роботизированного автомобиля, км
RL	rl	Значение остаточного ресурса РА, час

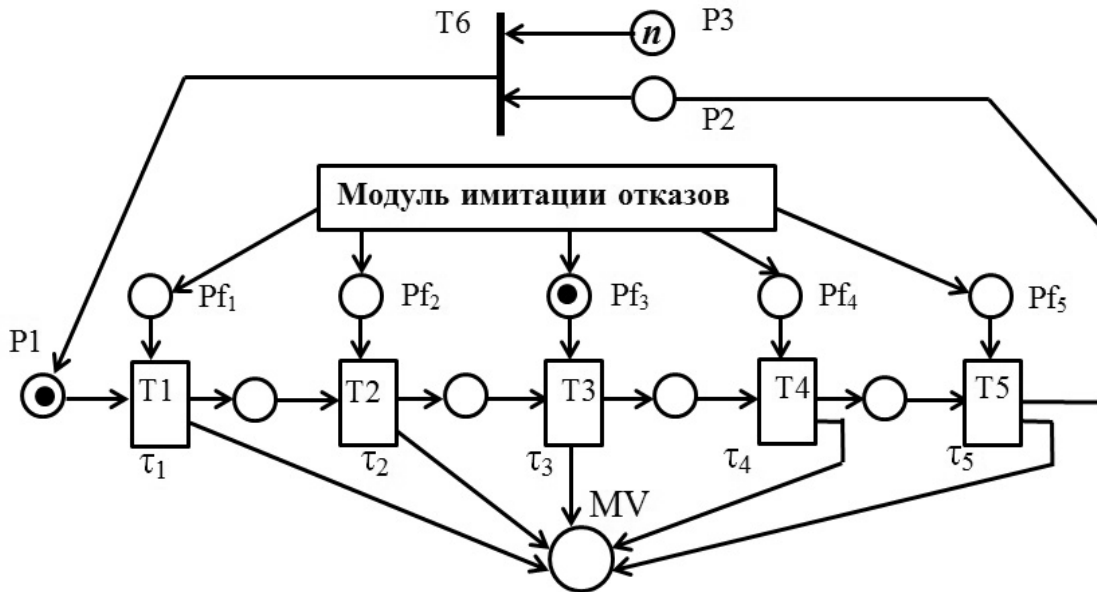


Рис. 2. Модель «Модуль задач»

«Модуль задач» имитирует движение РА по маршруту при выполнении производственных задач. Модуль MS — мобильный сервис технического обслуживания. Он моделирует процесс технического обслуживания роботизированных автомобилей, выполняемый либо непосредственно на маршруте, либо вблизи маршрута. Модуль CV содержит каннибализируемые РА и описывает действия по снятию запасных частей для передачи в мобильный сервис MS.

В таблице 1 приведено описание позиций иерархической модели.

Разработанная стратегия обслуживания предусматривает как периодическое восстановление каннибализируемого автомобиля и перевод его в состояние «Активный» (переход Tr), так и перевод активного автомобиля для последующей каннибализации (переход Tc).

Использование раскрашенной сети Петри позволяет описывать объекты, в нашем случае РА, с помощью

мультимножеств [8], представляющих кортеж основных параметров каждого автомобиля. В этом случае, каждому РА соответствует свой цвет маркеров в позициях сети Петри. В табл. 2 приведено описание набора цветов C для рассматриваемой модели.

В результате каждый РА представлен в модели составным цветом

$$C = \langle N, Mark, Model, Mil, RL \rangle,$$

а дугам позиций AV и MV назначается переменная:

$$u = \{n, mk, md, ml, rl\}.$$

На рис. 2 раскрыта структура сети Петри «Модуль задач».

Переход T1 имитирует движение РА по заданному маршруту к точке выполнения операций в переходе T3, а переход T5 — возвращение по маршруту к месту

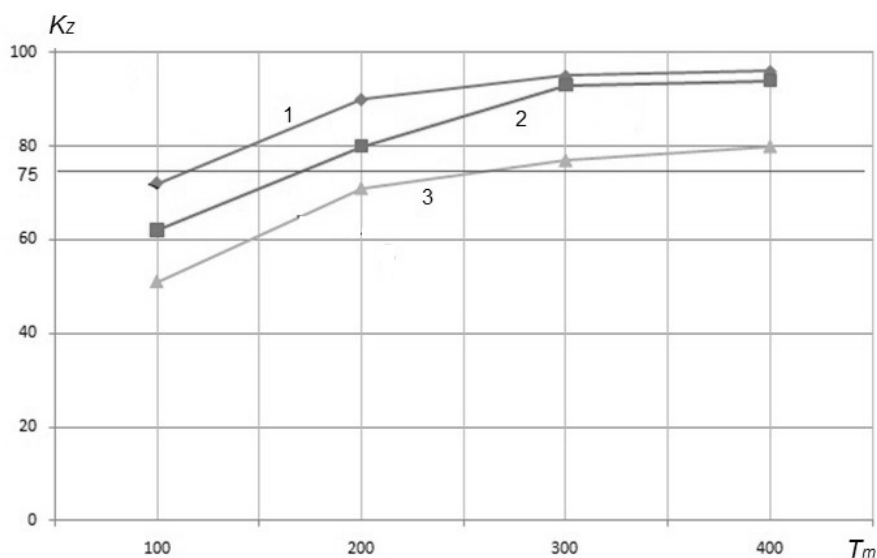


Рис. 3. График коэффициента загрузки РА:  
 1 —  $T_{can} = 4$  часа; 2 —  $T_{can} = 8$  часов; 3 —  $T_{can} = 12$  часов

парковки. Переходы T2 и T4 представляют маневрирование транспортного средства для выполнения операций в заданной точке. Производственный логистический цикл повторяется  $n$  раз (позиция P3 и переход T6). Во временной сети Петри каждому переходу приписана длительность его выполнения (на рис. 2 — значения  $\tau_j - \tau_s$ ). Позиции Pf<sub>1</sub> — Pf<sub>5</sub> содержат маркеры, появление которых означает возникновение отказа в РА на каком-либо этапе работы.

Модель «Модуль имитации отказов» строится на базе стохастической сети Петри и использует средства программной системы CPN Tools [9] для задания вероятностных законов распределения отказов в РА. Для этого в программе можно задавать различные законы: нормальный, Вейбулла, Пуассона и др.

При отказе маркер из соответствующей позиции Pf передается в позицию MV, что означает вывод РА из эксплуатации на техническое обслуживание. На рис. 3 маркер в позиции Pf<sub>3</sub> показывает, что произошел отказ в РА при выполнении операции в переходе T3.

### Результаты экспериментов

Имитационные статистические эксперименты проводились с использованием закона Вейбулла в модели для генерации событий отказов РА. На модели выполнялись оценки следующих параметров:

- ♦ необходимое число каннибилизируемых РА при заданном количестве активных РА;
- ♦ время восстановления активных РА в модуле MS;

- ♦ время использования РА в качестве каннибилизируемого автомобиля;
- ♦ сравнение времени технического обслуживания с каннибализацией и без каннибализации;
- ♦ коэффициент загрузки  $K_z$  роботизированных автомобилей.

Коэффициент загрузки определяется по формуле:

$$K_{zj} = T_j / T_{cj}, j = \{1, \dots, J\},$$

где  $T_j$  — время нахождения  $j$ -РА в состоянии «Активный»,  $T_{cj}$  — общее время работы  $j$ -РА,  $J$  — количество РА.

Для примера на рис. 3 показан график зависимости коэффициента загрузки от временных параметров стратегии каннибализации, построенный по результатам имитационного эксперимента. При этом задавались следующие параметры: суммарное количество РА равно 10, число каннибилизируемых РА равно 3, время  $T_{can}$  технического обслуживания с каннибализацией от 4 до 12 часов, время  $T_m$  между периодическим обслуживанием от 100 до 400 часов.

Принимая допустимый уровень загрузки, равный 75%, можно сформировать требования к режиму обслуживания роботизированных автомобилей.

### Заключение

Задача управления техническим обслуживанием и ремонтом группы роботизированных автомобилей

решается с использованием виртуальных испытаний. С этой целью построена иерархическая раскрашенная сеть Петри, направленная на исследование эффективности стратегии каннибализма при техническом обслуживании. Использование отдельных автомобилей в качестве каннибализируемых объектов становится все более актуальным в условиях дефицита запасных

частей и значительного увеличения сроков их поставки. В модулях разработанной имитационной модели учтены особенности эксплуатации и обслуживания РА. Предложенный подход обеспечивает анализ влияния случайных факторов: деградации элементов, появления неисправностей, изменения условий эксплуатации транспортных средств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Яковлева А.Е. Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля// Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». — 2021. — Том 29(1). — С. 46–57.
3. Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А. Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств// Известия Санкт-Петербургского гос. технолог. ин-та (технического университета). — 2021. — № 58(84). — С. 98–104.
4. Fisher W.W. Issues and Models in Maintenance Systems Incorporating Cannibalization: A Review// Information Systems and Operational Research. 1990. Vol. 28(1). P. 154–164.
5. Sheng J., Prescott D. A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation// Reliability Engineering & System Safety. 2017. Vol. 168. P. 290–305.
6. Sheng J., Prescott D. A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalisation// Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 189. P. 67–88.
7. Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гашенко Ю.В. Принципы построения систем управления роботизированными транспортными средствами с автономным и дистанционным режимом управления// В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Самара. — 2019. — С. 107–110.
8. Jensen K., Kristensen M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009. 382 p.
9. CPN Tools. Modeling with Coloured Petri Nets. [Электронный ресурс]. 20.09.2022. Режим доступа: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started>.

© Волхонская Елизавета Евгеньевна (lizaveta5.6@mail.ru), Орлов Сергей Павлович (orlovsp1946@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»