

УДК 658.51

## МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**С.В. Сусарев**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** При создании и эксплуатации системы беспилотных автомобилей для агротехнических предприятий большое значение имеет организация технического обслуживания и ремонта. В статье предлагается методика оценки эффективности функционирования роботизированных транспортных средств с точки зрения эксплуатации и технического обслуживания. Предложено использовать метод анализа среды функционирования, базирующийся на моделях дробно-рационального программирования. Определены параметры роботизированных транспортных средств, по которым проводится сравнительная оценка. Основными показателями эффективности системы технического обслуживания и ремонта являются: коэффициент простоя при техническом обслуживании, коэффициент сходов автомобиля с линии, надежность узлов автомобиля, остаточный ресурс, пробег в месяц, удельная стоимость эксплуатации и технического обслуживания. Базовыми моделями выбраны модели Купера – Чарнеса – Роудса и Банкера – Чарнеса – Купера с использованием построения границы суперэффективности. Выполнен анализ решений для различных подмножеств параметров роботизированных автомобилей. Построены диаграммы множества производственных возможностей и определены целевые изменения параметров автомобилей и системы технического обслуживания для достижения границы эффективности. Проведена оценка развития системы технического обслуживания с использованием индекса Малмквиста, выявлены причины неудовлетворительной эксплуатации роботизированных автомобилей. Сделаны выводы по улучшению организации системы технического обслуживания.*

***Ключевые слова:** системный анализ, эффективность, техническое обслуживание транспортных средств, беспилотные автомобили, анализ среды функционирования, индекс Малмквиста.*

### **Введение**

Современное развитие робототехники в области транспортных средств приводит к задачам управления не только маршрутизацией и движением на местности, но и техническим обслуживанием и ремонтом роботизированных автомобилей. Беспилотные грузовые автомобили представляют собой сложную киберфизическую 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.

---

*Сусарев Сергей Васильевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».*

Кибер-физический подход [1, 2] к проектированию робототехнических транспортных средств заключается в создании комплекса моделей, которые описывают состояние узлов, динамику движения, прогнозируют появление отказов и предаварийных состояний.

Это позволяет организовать систему технического обслуживания роботизированных автомобилей с использованием новых информационных средств, технологий Интернета вещей (Internet of Things – IoT) и методов прогнозирования. При этом возникает задача комплексной оценки эффективности существующей организации технического обслуживания и выработки направлений совершенствования диагностики, обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей.

В статье рассматривается роботизированная система сельскохозяйственных автомобилей (РССА) на базе моделей КАМАЗ [3, 4]. Поставлена задача разработки метода и программной реализации определения основных технических и эксплуатационных параметров, влияющих на качество технического обслуживания, нахождения границы эффективности в пространстве этих параметров и формирования рекомендаций по улучшению процесса обслуживания и ремонта транспортных средств.

### **Обзор существующих решений**

В настоящее время зарубежные разработки в сфере роботизированных беспилотных комплексов предполагают создание транспортных средств, областью эксплуатации которых в подавляющем большинстве случаев являются логистические процессы на асфальтовых покрытиях и передвижение по дорогам общего назначения, оборудованных элементами придорожной инфраструктуры. При этом проблемы передвижения по поверхностям с изменяющимися стохастическими характеристиками не рассматривается. В то же время работа сельскохозяйственных автомобилей в тяжелых полевых условиях выдвигает на передний план создание эффективной системы технического обслуживания и ремонта.

Основные известные работы ведутся в области определения оптимального срока эксплуатации автомобиля, обеспечивающего контроль соответствия качества роботизированного автомобиля современным критериям и требованиям по надежности, конструктивной и экологической безопасности [5, 6]. Основным методом проведения контрольных работ является диагностика, которая служит для определения технического состояния автомобиля и агрегатов без разборки. Диагностика является частью технологического процесса технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей, обеспечивая получение исходной информации о техническом состоянии автомобиля [7]. В статье [8] описана система диагностики роботизированного автомобиля, использующая интеллектуальные технологии для определения технических состояний.

В работах [8, 9] разрабатывались научные методы, позволяющие формировать алгоритмы оптимизации в системе технического обслуживания и ремонта автомобилей с учетом требований среды эксплуатации по нескольким критериям эффективности. Сформулирована модель многокритериальной структуры показателей эффективности автомобиля.

Однако решение такой задачи требует оценки, насколько эффективно функционирует система технического обслуживания в различные периоды времени. Следует определить, какие процедуры технического обслуживания и ремонта в РССА отвечают принятым критериям качества, степень информативности вы-

бренных параметров контроля надежности и работоспособности. Сложность оценки связана с необходимостью сравнивать различные модели транспортных средств, работающих в разных условиях эксплуатации. В этом случае целесообразно использовать метод анализа среды функционирования (АСФ, или Data Envelopment Analysis) [10, 11], который успешно применялся в задачах оценки эффективности в различных приложениях [12–15].

### Модели технического обслуживания и ремонта для роботизированной системы автомобилей

Роботизированная система сельскохозяйственных автомобилей (РССА) на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимами управления предназначена для работы на сельскохозяйственных площадях. На рис. 1 показана общая структура РССА.

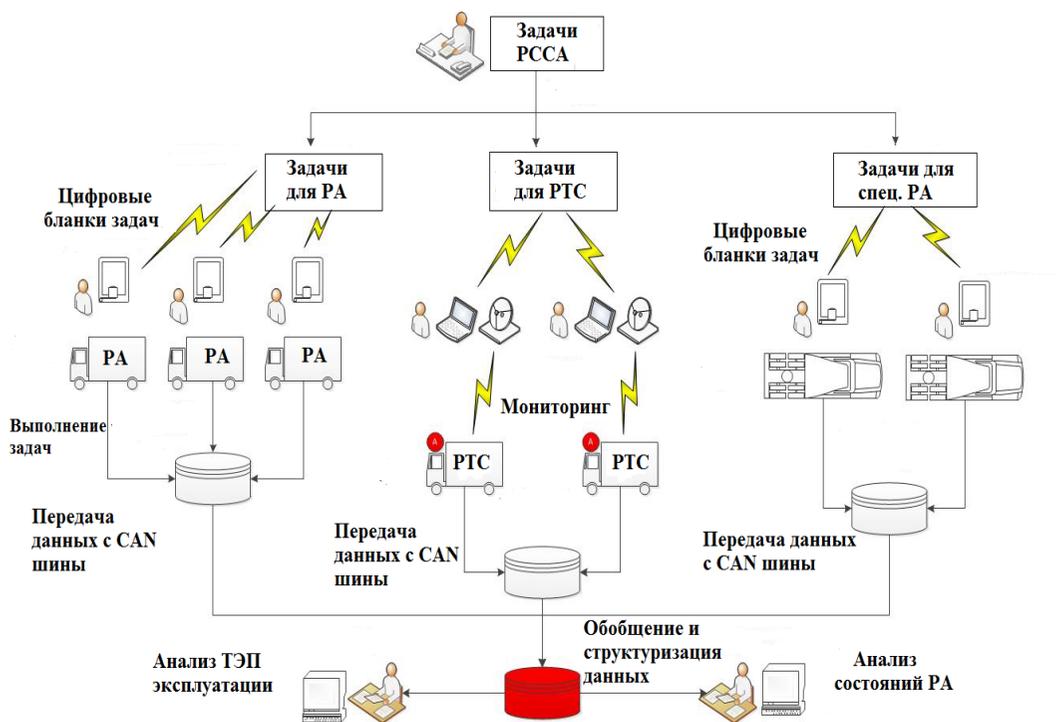


Рис. 1. Структурная схема иерархической организации РССА

Иерархическую структуру РССА образуют:

1. Три группы автомобилей различного назначения:
  - а) роботизированные автомобили РА для работы в полях;
  - б) роботизированные транспортные средства РТС для перемещения грузов на производственных площадках сельскохозяйственных предприятий;
  - в) специализированные автомобили на шасси КАМАЗ.
2. Два уровня дистанционного управления с помощью операторов.
3. Система сбора в реальном времени данных о техническом состоянии автомобилей с использованием CAN шины.
4. Аналитическая подсистема для оценки технико-экономических параметров эксплуатации и обслуживания роботизированных транспортных средств.

Наличие развитой информационной системы в РССА, использование «цифровых двойников» позволяют организовать процессы технического обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей на новом уровне. На рис. 2 приведена структурная схема взаимодействия компонентов РССА: систем диагностики, эксплуатантов, сервисных служб и производителей транспортных средств.



Рис. 2. Схема взаимодействия в рамках РССА при организации технического обслуживания роботизированных автомобилей

В основу технологического процесса технического обслуживания РА положены следующие методы.

1. Метод DFMEA (Design – Failure Mode & Effects Analysis) – «Анализ эффектов режима отказа проекта». Эта методология помогает выявить потенциальные сбои в конструкции продукта на стадии разработки.

2. Метод PFMEA (Process – Failure Mode & Effects Analysis) – «Анализ последствий режима отказа процесса», который помогает идентифицировать возможные режимы отказа процесса при управлении операциями и проектирование на этапе разработки роботизированного автомобиля для РССА, а также классифицировать отказы на основе вероятности и серьезности сбоя. Основная цель DFMEA состоит в обнаружении потенциальных сбоев в конструкции роботизированного автомобиля, тогда как основная цель PFMEA – выявить потенциальные сбои в процессах его эксплуатации.

3. APQP (Advanced Product Quality Planning) – метод перспективного планирования качества продукции, который позволяет оптимизировать рабочий процесс в РССА, повысить качество роботизированных автомобилей и значительно снизить издержки и затраты производства, связанные с изготовлением и дальнейшим устранением бракованной продукции.

Проблема обеспечения оптимального функционирования сложной системы РССА неразрывно связана с постоянным контролем надежности и ее комплексной оценкой. Авторы данной статьи разработали моделиориентированный подход к удаленной диагностике, использующий кибер-физические модели [16, 17].

Этот подход позволяет осуществлять сбор информации о причинах дефектов и отказов, параметрах предотказного состояния, последствиях отказов, параметрах надежности элементов, систем и агрегатов и осуществлять анализ собранной информации.

Остаточный ресурс узла, системы или агрегата автомобиля формируется на основе остаточных ресурсов составляющих его агрегатов и элементов. Диагностическая система в режиме онлайн получает всю необходимую измерительную информацию о техническом состоянии РА. Модель РА представляет собой «цифровой двойник». С помощью такой модели проводится анализ и прогнозирование работы агрегатов роботизированного автомобиля. Система принятия решений использует базу знаний для выработки управляющих воздействий на автомобиль.

Описанные системы и технические средства используются для получения исходных данных о роботизированных автомобилях при решении задачи комплексной оценки эффективности технического обслуживания и ремонта.

### **Оценка эффективности технического обслуживания РССА с использованием моделей АСФ**

Использование методики анализа среды функционирования базируется на решении оптимизационной задачи дробно-рационального программирования. Особенность подхода состоит в том, что не рассматриваются какие-либо частные критерии и не определяются функции, связывающие входные и выходные переменные объектов. Для каждого анализируемого объекта DMU формируется некоторое множество параметров, описывающих функционирование этого объекта. Оцениваемые объекты могут быть разнородными, но должны функционировать в среде с одинаковыми целями. В этом случае их сравнение производится по интегральному критерию, но при этом решается последовательно  $n$  задач дробно-рационального программирования для каждого оцениваемого объекта с целью определения неизвестных весов целевой функции [10].

В данной статье рассматривается, с точки зрения организации технического обслуживания и ремонта, функционирование множества роботизированных автомобилей, входящих в состав РССА.

Анализ эффективности проводится с использованием моделей ССР (Купер – Чарнес – Роудс) и ВСС (Банкер – Чарнес – Купер) с построением границы суперэффективности [18, 19]. Такие модели позволяют на базе реальных эффективных объектов сформировать искусственные объекты с эффективностью, большей единицы. Искусственные объекты с суперэффективностью служат как цели для повышения эффективности реальных объектов.

Суперэффективность DMU вычисляется путем его оценки по отношению ко всем DMU, за исключением самого себя. Это означает, что DMU может иметь показатель эффективности выше 100 %.

Математическая постановка задачи формулируется следующим образом. Пусть имеется множество оцениваемых роботизированных автомобилей  $DMU_j$ ,  $j=1, \dots, n$ , а также векторы их входных  $x_j = (x_1^j, \dots, x_m^j)$  и выходных  $y_j = (y_1^j, \dots, y_k^j)$  параметров,  $m$  – число входов и  $k$  – число выходов для DMU.

Для нахождения критерия  $\theta$  суперэффективности выполняется решение задачи дробно-линейного программирования:

$$\theta = \max \left( \frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{r0} + u_0}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \right) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{rj} + u_0}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$1 \leq \frac{\sum_{r=1}^k u_r Y_{r0} + u_0}{\sum_{i=1}^m v_i X_{i0}} \leq 1 + \rho, \quad (3)$$

$$L_{i0}^x \leq X_{i0} \leq V_{i0}^x, \quad i = \overline{1, m},$$

$$L_{r0}^y \leq Y_{r0} \leq V_{r0}^y, \quad r = \overline{1, k},$$

$$u_r, v_i \geq 0, \quad \forall i, \forall r, \quad u_0 - \text{свободно},$$

где (2) – ограничения для реальных эффективных объектов;

(3) – ограничение для нового искусственного объекта;

$X_{i0}$  и  $Y_{r0}$  – искомые значения входов и выходов искусственного эффективного объекта.

Величина  $\rho$ , а также верхние  $V_{i0}^x, V_{r0}^y$  и нижние  $L_{i0}^x, L_{r0}^y$  границы диапазона входов и выходов искусственного объекта определяются с помощью экспертных оценок.

### **Исследование эффективности обслуживания роботизированных автомобилей в составе РССА**

В примере, иллюстрирующем предлагаемую методику, будем рассматривать совокупность из двух групп беспилотных автомобилей:

- роботизированные автомобили РА для полевых работ, {A1, A2, ..., A8};
- роботизированные транспортные средства РТС для сельхозпредприятий, {T1, T2, T3, T4}.

В соответствии с принятыми в автомобильной промышленности критериями [7] устанавливаются показатели эффективности работы РССА, приведенные в табл. 1. В табл. 2 и табл. 3 приведены значения параметров роботизированных автомобилей для двух периодов эксплуатации: 2019 год и 2020 год. В роли DMU рассматриваются наборы {A1, A2, ..., A8} и {T1, T2, T3, T4}.

Анализ технического обслуживания комплекса роботизированных автомобилей выполнялся на основе модели CCRinput с неуменьшаемым эффектом масштаба NDRS. Задавался режим нахождения границы суперэффективности Super Efficiency with Threshold с порогом  $\rho = 10\%$ .

Таблица 1

## Показатели для оценки эффективности

Обозначение	Показатель эффективности
P1	Средняя скорость движения автомобиля РА в наблюдаемый период, км/ч
P2	Потребление топлива автомобилем РА, л/(100 км)
P3	Пробег месячный, км
P4	Коэффициент простоя на ТО и Р, %
P5	Средняя надежность узлов и агрегатов автомобиля РА, %
P6	Коэффициент сходов с линии, %
P7	Удельная стоимость эксплуатационного и технического обслуживания (на 1 тонну перемещенного груза), руб/т
P8	Удельное грузоперемещение, т/км
P9	Остаточный ресурс автомобиля, часы наработки на отказ, час

Таблица 2

## Параметры P1–P5 в периоды 2019 г. и 2020 г.

Объекты	Параметры									
	P1 км/час		P2 л		P3 км		P4 %		P5 %	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
A1	25	30	35	32,3	2700	3100	1	0,72	93	96
A2	36	36	30	30	3200	3400	0,6	0,45	96,5	98
A3	30	27	34	34,5	3000	2800	0,77	1,1	95	91
A4	36	34	31	30,1	3200	3050	0,7	0,8	97	97
A5	35	34	29	27	3250	3350	0,6	0,1	98	98
A6	26	29	36	33	2800	3050	0,85	0,7	89	93
A7	29	29,6	33	32	3100	3300	0,73	0,3	95	97
A8	31	32	32	32	2900	3100	0,75	0,71	94	94
T1	24	29	36	34	2750	3100	0,9	0,7	88	92
T2	26	30	37	32,5	2650	3270	1,1	0,6	90	96
T3	37	30	29	28,5	3400	2800	0,65	1	97	90
T4	35	35	28	30	3600	3700	0,62	0,72	97,5	97

Важный момент при применении метода АСФ – правильное деление показателей на входные и выходные параметры. В рассматриваемом примере были определены множество входных параметров  $X = \{P2, P4, P6, P7, P9\}$  и множество выходных параметров  $Y = \{P1, P3, P5, P8\}$ .

Решение задач для моделей АСФ проводилось с использованием программы PIM DEASoft версии 3 [20].

Основная задача моделирования – определение для каждого  $j$ -го автомобиля целевых изменений  $\delta_{jl}$  его параметров для выхода на границу эффективности:

$$\delta_{jl} = \frac{P_{jl}^r - P_{jl}^D}{P_{jl}^D} \times 100\%, \quad j = \overline{1,12}, \quad l = \overline{1,9},$$

где  $P_{jl}^D$  – измеренное значение параметра,  $P_{jl}^r$  – целевое значение.

Таблица 3

## Параметры P6–P9 в периоды 2019 г. и 2020 г.

Объекты	Параметры							
	P6 %		P7 руб/т		P8 т/км		P9 час×10 <sup>4</sup>	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
A1	2	0,1	12	9,5	0,14	0,2	15	16
A2	0,6	0,2	8	7	0,22	0,25	19	19
A3	1,2	2	10,3	13	0,18	0,2	17	15
A4	0,7	0,45	7,8	8	0,21	0,2	18	18
A5	0,66	0,3	7,4	7	0,27	0,4	18,1	18
A6	1,6	1,2	11,5	9,5	0,11	0,22	16,2	17,3
A7	1	0,4	10	9,8	0,2	0,32	17,5	18,5
A8	0,95	0,88	9	10	0,16	0,165	17,1	16,7
T1	1,8	0,5	12,3	11	0,12	0,23	16,1	17,2
T2	1,4	0,3	11,8	12	0,11	0,19	15,6	16,8
T3	0,5	2,3	8,6	10	0,23	0,17	18,2	16
T4	0,57	0,8	7,9	8,2	0,28	0,28	17,9	18,2

Таблица 4

## Целевые изменения параметров роботизированных автомобилей в 2019 г.

Объекты	Изменение параметров, %								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
A1	0	46,57	27,42	41,38	39,69	38,32	64,25	0	33,83
A2	32,08	-10,03	5,58	13,53	0	13,53	13,53	22,19	10,46
A3	0	1,36	11,66	-29,94	1,85	-41,62	-31,66	0	-22,32
A4	0	0,65	2,9	-2,4	17,15	0,65	-19,96	36,89	-8,43
A5	17,14	-1,12	0	-1,12	1,13	-73,66	-6,41	0	-5,98
A6	27,57	5,84	23,67	-15,61	0	3,27	-23,73	0,71	5,84
A7	0	-2,32	44,54	-11,05	0	-2,32	-7,71	44,94	-12,36
A8	33,65	14,02	0	14,02	11,36	14,02	-2,98	74,04	14,02
T1	0	20,44	52,58	30,69	31,52	60,45	22,16	5,16	13,16
T2	0	4,81	0	-38,23	4,24	4,81	-31,43	63,43	-3,01
T3	0	13,09	0	-5,04	0	-43,59	13,09	80,32	-13,1
T4	47,73	5,99	11,03	5,99	0	-42,41	-19,55	29,93	-13,09

Результаты расчетов сведены в табл. 4, в которой показаны процентные значения целевых изменений параметров для РА в 2019 году для планирования повышения эффективности в 2020 году.

Графический интерфейс программы PIM DEASoft позволяет визуально оценивать положение объектов относительно границы эффективности. На рис. 3 показана диаграмма PPS (Production Possibility Set) – множество производственных возможностей в пространстве параметров P4 и P8. Для достижения границы эффективности автомобилем A1 в результате технического обслуживания в 2020 году должны измениться параметры:

а) увеличиться удельное грузоперемещение до 0,27 т/км при неизменном коэффициенте простоя на ТО и ремонт;

б) либо уменьшиться коэффициент простоя до 0,6 % при неизменном удельном грузоперемещении.

Второй вариант предпочтительнее, так как снижение коэффициента простоя приводит к улучшению других параметров, например к увеличению месячного пробега.

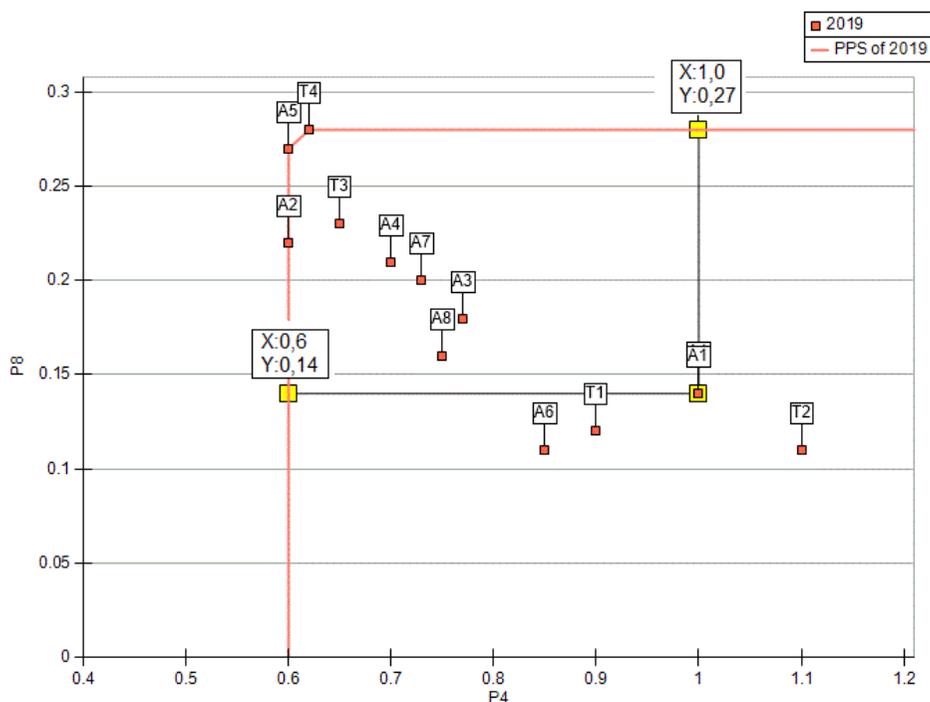


Рис. 3. Целевые изменения параметров P4 и P8 для выхода автомобиля A1 на границу эффективности

Представляет интерес сравнение границ эффективности для различных периодов времени.

На рис. 4 показаны границы эффективности для двух периодов (2019 и 2020 годы) и расположение всех оцениваемых РА для двух входов P4 и P6 относительно выхода P1 – средней скорости движения РА.

График на рис. 4 показывает, что в пространстве этих параметров в 2019 году наименее эффективными были автомобили A1, A6 и T1, T2. Они расположены далеко от границы эффективности. В результате принятых мер по улучшению технического обслуживания в 2020 году автомобиль A1 вышел на границу эффективности (траектория – пунктирная линия), а T1 и T2 переместились значительно ближе к границе. В то же время автомобиль A3, который в 2019 году был на среднем удалении от границы эффективности, в 2020 году показал наихудшие результаты и на графике наиболее удален от границы (стрелка). Из табл. 2 и 3 видим, что для A3 в 2020 году зафиксированы: уменьшение средней скорости

и месячного пробега, увеличение простоя на ТО, снижение надежности агрегатов и остаточного ресурса.

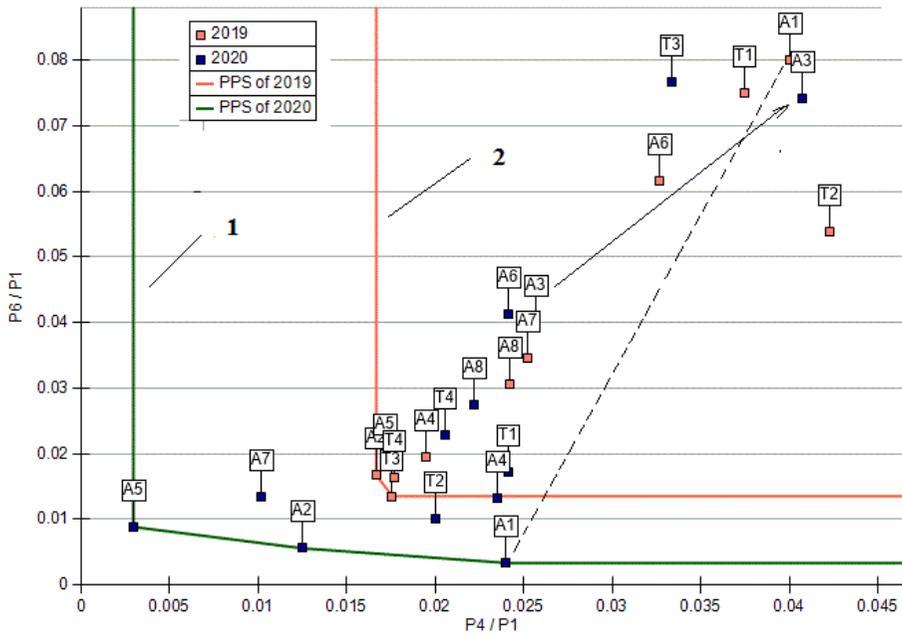


Рис. 4. Положение роботизированных автомобилей относительно границ эффективности в 2019 и 2020 году в зависимости от параметров  $P4$ ,  $P6$  и  $P1$ :  
1 – 2020 год; 2 – 2019 год

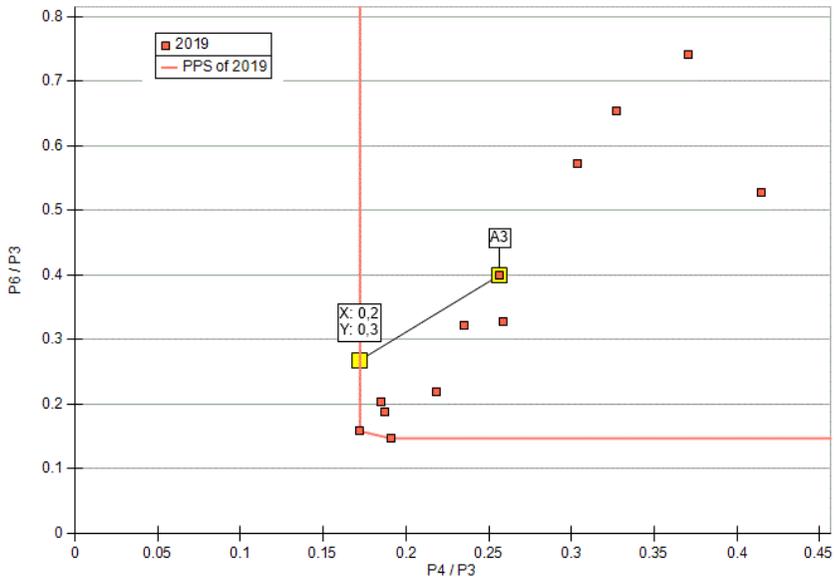


Рис. 5. Положение A3 относительно границы эффективности и целевые изменения  $P4$  и  $P6$

Целевые изменения параметров для АЗ, принятые в 2019 году, иллюстрируются на рис. 5. Здесь рассматривается выходной параметр Р3 – пробег месячный.

Параметры Р4 и Р6 характеризуют качество технического обслуживания: Р4 – время, затраченное на регламентные и ремонтные работы, Р6 – частоту появления событий, приводящих к прекращению выполнения автомобилем заданий на линии. Однако по результатам 2020 года автомобиль АЗ не достиг границы эффективности.

Анализ данной ситуации показал, что для автомобиля АЗ не были выполнены целевые изменения параметров, которые рекомендовались в соответствии с табл. 4. В табл. 5 выполнено сравнение значений параметров, которые планировались для повышения эффективности автомобиля АЗ, с реально достигнутыми значениями в 2020 году.

Таблица 5

**Целевые и реальные параметры роботизированного автомобиля АЗ**

Параметр	2019 г.	Целевое значение на 2020 г.	Реальное значение в 2020 г.
Р1	30	31,27	27
Р2	34	30	34,5
Р3	3000	3264	2800
Р4	0,77	0,76	1,1
Р5	95	95,82	91
Р6	1,2	1,1	2
Р7	10,3	9,43	13
Р8	0,18	0,23	0,2
Р9	17	16,82	15

Очевидно, что техническое обслуживание и ремонт АЗ были выполнены некачественно, что привело к следующим нежелательным последствиям:

- снижения потребления топлива Р2 не произошло, но при этом уменьшилась средняя скорость, что привело к уменьшению месячного пробега Р3;
- коэффициент сходов автомобиля с линии вырос в два раза, что привело к росту эксплуатационных расходов Р7;
- надежность агрегатов и остаточный ресурс уменьшились.

Аналогичные выводы можно сделать и по другим роботизированным автомобилям, что позволяет скорректировать режимы технического обслуживания и ремонта на следующий период времени.

В результате проведенных исследований определены направления развития системы технического обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей РССА в следующих аспектах:

1. Снижение времени простоя РА на ТО и ремонте за счет постоянного дистанционного мониторинга технического состояния РА во время эксплуатации.
2. Использование «цифровых двойников» РА для прогнозирования отказов агрегатов и их заблаговременного обслуживания или замены. Это приведет к снижению коэффициента схода РА с линии.
3. Уменьшение затрат на техническое обслуживание и ремонт РА.

## Анализ эффективности роботизированных автомобилей с помощью индекса Малмквиста

Индекс Малмквиста дает возможность оценивать развитие объектов на двух периодах времени. В статье используется методология DEA-Malmquist, которая основана на моделях CCR [10, 15].

В экспериментах для определения индекса Малмквиста была использована модель  $CCR_{input}$  с постоянным масштабом отдачи CRS без суперэффективности. Результаты работы программы приведены в табл. 6, где MI – индекс Малмквиста, EC – технический прогресс, TC – изменение эффективности. В такой интерпретации индекс Малмквиста представляется как произведение

$$MI = EC \cdot TC.$$

Величина индекса  $MI > 1$  свидетельствует о прогрессе в производительности оцениваемого РА в период от  $t$  до  $t+1$ , тогда как  $MI = 1$  или  $MI < 1$  соответствуют неизменному состоянию или снижению фактора производительности.

Таблица 6

Индекс Малмквиста для роботизированных автомобилей (2019–2020 гг.)\*

Индекс	Объекты (РА)											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	T1	T2	T3	T4
TC	2,2	1,63	0,95	1,04	2,95	1,04	1,62	1,01	1,04	1,3	0,97	0,99
EC	1	1	0,98	0,99	1	0,98	0,98	1,02	1,01	1,02	0,99	1
MI	2,2	1,63	0,93	1,03	2,95	1,02	1,58	1,04	1,05	1,33	0,96	0,99
Тенденция изменения качества ТО для РА	+	+	–	0	+	0	+	0	0	+	–	–

\*Здесь обозначены:

+ качество ТО улучшилось;

– качество ТО ухудшилось;

0 – качество ТО не изменилось.

Положительная тенденция развития наблюдается для роботизированных автомобилей A1, A2, A5 и A7, а также роботизированного транспортного средства T1. Индекс Малмквиста имеет максимальное значение для A1, что свидетельствует о значительном прогрессе этого автомобиля по эксплуатационным параметрам. Это видно и на рис. 4, где показана траектория (пунктирная линия) перемещения A1 от точки неэффективности в 2019 году до границы эффективности в 2020 году.

Ухудшение параметров наблюдалось для A3, T3 и T4. Это подтверждено также анализом расположения указанных РА относительно границ эффективности.

### Заключение

Предлагаемая методика обеспечивает принятие решений при организации технического обслуживания и выборе технологических операций для роботизированных автомобилей. Модели анализа среды функционирования предоставляют большой объем информации, обработка которой дает возможность выявить

неочевидные закономерности и связи между параметрами автомобиля, показателями обслуживания, условиями эксплуатации.

Дальнейшее направление исследований связано с детальным анализом функционирования РССА и включением в рассматриваемые модели новых наборов показателей эффективности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Khaitan S.K., McCalley J.D.* Design techniques and applications of cyber physical systems: A survey // *IEEE Systems Journal*, 2015. 15 p.
2. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to embedded systems. A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edition. The MIT Press, 2017.
3. *Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гащенко Ю.В.* Принципы построения систем управления роботизированных транспортных средств с автономным и дистанционным режимом управления // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции.* – Самара: Офорт, 2019. – С. 107–110 .
4. *Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O.Ya., Morev A.S.* Information system of agricultural robotic KAMAZ cars // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399 (033020). P. 1–5.
5. *Ляпин Н.А., Ширяев С.А., Федин А.П., Полуэктов М.В.* Современные системы технического обслуживания и ремонта грузовых автомобилей / под ред. Н. А. Ляпина. – Волгоград: ВолгГТУ, 2016. – 188 с.
6. *Коваленко Н.А.* Организация технического обслуживания и ремонта автомобилей. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 229 с.
7. *Сусарев С.В., Орлов С.П., Пугачев А.И.* Интеллектуальная система диагностики агрегатов роботизированного автомобиля КАМАЗ // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции (3–6 сентября 2019 г., Самара, Россия).* – Самара: Офорт, 2019. – С. 92–95.
8. *Терентьев А.В.* Научно-методический подход к многокритериальной оценке срока эксплуатации автомобиля: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.22.10. – Санкт-Петербург: СПб. гос. арх.-строит. ун-т., 2019. – 44 с.
9. *Терентьев В.А., Ефименко Д.* К вопросу многокритериальной оценки срока эксплуатации автомобиля // *Мир транспорта и технологических машин.* – 2018. – № 1(60). – С. 21–27.
10. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. 2nd edition. Springer Science + Business Media, 2007. 492 p.
11. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Springer, Boston, MA, 2011, P. 1–39.
12. *Нечаев Д.А., Орлов С.П.* Комплексная оценка и классификация объектов водоснабжения регионов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки.* – 2013. – Вып. 1(37). – С. 14–21.
13. *Рыбакова И.А., Орлов С.П.* Сравнительный анализ эффективности использования предприятиями CRM-систем // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки.* – 2018. – Вып. 1(57). – С. 31–37.
14. *Учайкин Р.А., Орлов С.П.* Сравнительная оценка эффективности компьютерной техники в подразделениях промышленного предприятия // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки.* – 2020. – Т. 28. – № 1(65). – С. 74–86.
15. *Лиссумса А., Бабичева Т.* Теоретические основы анализа продуктивности и эффективности сельскохозяйственных предприятий // *Discussion paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. Halle (Saale), Deutschland.* 2003. No. 49. 39 p.
16. *Susarev S.V., Orlov S.P.* Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system // *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 919. 052056.
17. *Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya.* Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference.* 2019. Vol. 1399 (044032). P. 1–6.
18. *Andersen P., Petersen N.C.* A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis // *Management Science.* 1993. Vol. 39. P. 1261–1264.
19. *Sowlati T., Paradi J.C.* Establishing the "practical frontier" in data envelopment analysis // *Omega.* 2004. Vol. 32 (4). P. 261–272.

20. PIM-DEA. Home page. Режим доступа: <http://www.deasoftware.co.uk/> (дата обращения 22.09.2020).

Статья поступила в редакцию 3 октября 2020 г.

## MODELS FOR THE ASSESSMENT OF ROBOTIC VEHICLE MAINTENANCE EFFICIENCY

*S.V. Susarev*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *Maintenance and repair are of great importance in creating and operating a system of unmanned vehicles for agricultural enterprises. The article proposes a methodology for assessing the effectiveness of robotic vehicles' functioning in terms of operation and maintenance. It is suggested to use the method of Data Envelopment Analysis based on fractional rational programming models. The parameters of robotic vehicles have been determined, for which a comparative assessment is carried out. The leading indicators of the maintenance and repair system efficiency are the downtime ratio for maintenance, the vehicle drift rate from the line, the reliability of the vehicle aggregates, robotic vehicle residual life, mileage per month, and the operation and maintenance unit cost. The basic models are the Cooper – Charnes – Rhodes and Bunker – Charnes – Cooper models using the super-efficiency frontier's construction. The analysis of solutions for various subsets of parameters of robotic vehicles is carried out. The production possibility set diagrams are plotted, and target changes in vehicles' parameters and the maintenance system are determined to achieve the efficiency frontier. The development of the maintenance system was assessed using the Malmquist index, and the reasons for the unsatisfactory operation of robotic vehicles were identified. Conclusions are made to improve the organization of the maintenance system.*

**Keywords:** *system analysis, efficiency, maintenance of vehicles, unmanned vehicles, Data Envelopment Analysis, Malmquist index.*

### REFERENCES

1. *Khaitan S.K., McCalley J.D.* Design techniques and applications of cyber physical systems: A survey // IEEE Systems Journal, 2015. 15 p.
2. *Lee E.A., Seshia S.A.* Introduction to embedded systems. A Cyber-Physical Systems approach. 2nd edition. The MIT Press, 2017.
3. *Susarev S.V., Sidorenko K.V., Morev A.S., Gashenko Yu.V.* Principles of building control systems for robotic vehicles with autonomous and remote control modes // Proceedings of the XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems. Samara: "Ofort", 2019. P. 107–110.
4. *Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O.Ya., Morev A.S.* Information system of agricultural robotic KAMAZ cars // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399 (033020). P. 1–5.
5. *Lypin N.A., Shirayev S.A., Fedin A.P., Poluektov M.V.* Modern systems of maintenance and repair of trucks. Ed.: Lypin N.A. Volgograd: Volgtu, 2016. 188 p.
6. *Kovalenko N.A.* Organization of maintenance and repair of cars. M.: NIC INFRA-M, 2016. 229 p.
7. *Susarev S.V., Orlov S.P., Pugachev A.I.* Intelligent Diagnostic System of Robotic KAMAZ Vehicle's Units // Proceedings of the XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems. Samara: "Ofort", 2019. P. 92–95.

---

*Sergey V. Susarev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

8. *Terentev A.V.* Scientific and methodological approach to multi-criteria assessment of the vehicle's service life: Abstract of diss. ... Doct. Tech. Sci.: 05.22.10. Saint\_Petersburg: SPBASY, 2019. 44 p.
9. *Terentev A.V., Efimenko D.K.* On the issue of multi-criteria assessment of the vehicle's service life // The world of transport and technological machines. 2018. No. 1(60). P. 21–27.
10. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. 2nd edition. Springer Science + Business Media, 2007. 492 p.
11. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Springer, Boston, MA, 2011, P. 1–39.
12. *Nechaev D.A., Orlov S.P.* Comprehensive assessment and classification of water supply facilities in regions // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering. 2013. Vol. 1(37). P. 14–21.
13. *Rybakova I.A., Orlov S.P.* Comparative analysis of the effectiveness of the use of CRM systems by enterprises // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering. 2018. Vol. 1(57). P. 31–37.
14. *Uchaykin R.A., Orlov S.P.* Comparative evaluation of computer equipment efficiency in the departments of industrial enterprise // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering. 2020. Vol. 28. № 1(65 ). P. 74–86.
15. *Lissitsa A., Babicheva T.* Theoretical foundations of the analysis of the productivity and efficiency of agricultural enterprises // Discussion paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. Halle (Saale), Deutschland. 2003. No. 49. 39 p.
16. *Susarev S.V., Orlov S.P.* Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system // IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 919. 052056.
17. *Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya.* Digital tests of the robotic chassis cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference. 2019. Vol. 1399 (044032). P. 1–6.
18. *Andersen P., Petersen N.C.* A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis // Management Science. 1993. Vol. 39. P. 1261–1264.
19. *Sowlati T., Paradi J.C.* Establishing the "practical frontier" in data envelopment analysis // Omega. 2004. Vol. 32 (4). P. 261–272.
20. PIM-DEA. Home page. <http://www.deasoftware.co.uk/> (Available 22.09.2020).