doi: 10.14498/tech.2024.2.4

УДК 004.962

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

А.Е. Яковлева[1]

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

E-mail: nastya-yakovleva-97@mail.ru

Аннотация. *Предложено использовать метод оценки эффективности (Data Envelopment Analysis) системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей, который основан на решении задачи дробно-линейного программирования при анализе множества однородных производственных объектов. Этот метод применяется для интегральной оценки качества обслуживания роботизированных транспортных средств по заданным ключевым параметрам функционирования. В качестве основных параметров эффективности системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей выбраны: коэффициент технической готовности, эксплуатационная скорость, время простоя в техническом обслуживании и ремонте, среднесуточная продолжительность работы автомобиля, средний месячный пробег транспортного средства, остаточный ресурс автомобиля, удельная стоимость эксплуатационного и технического обслуживания и удельное грузоперемещение. Решение систем линейных уравнений позволяет определить положение каждого анализируемого объекта относительно границы эффективности в многомерном пространстве параметров. Выполнено решение задачи Банкера – Чарнеса – Купера. Получены наборы целевых изменений параметров роботизированных автомобилей, которые переводят объекты на границу эффективности. Проведен анализ параметров посредством построения диаграмм производственных возможностей в многомерном пространстве. На двух периодах эксплуатации системы роботизированных автомобилей для агропромышленного предприятия рассчитан индекс Малмквиста для оценки динамики эффективности функционирования.*

Ключевые слова: *роботизированный автомобиль, цифровой двойник, метод оценки эффективности, виртуальный ввод в эксплуатацию, индекс Малмквиста.*

Введение

Разработка систем роботизированных автомобилей (РА) в настоящее время использует технологию виртуального ввода в эксплуатацию [1]. Это позволяет на этапе проектирования сложных технических объектов провести моделирование сценариев эксплуатации изделий в различных условиях. Такой подход позволяет перейти от профилактического и регулярного технического обслуживания к прогнозному (предсказательному) техническому обслуживанию роботизированных автомобилей [2]. Чтобы поддерживать высокий уровень эксплуатационной готовности и надежности автомобиля, необходимо постоянно контролировать со-

[1] *Анастасия Евгеньевна Яковлева, ассистент кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».*

стояние его деталей и механизмов. Здесь важна информация о рабочих параметрах механических и электронных компонентов автомобиля, получаемая в реальном времени.

Анализ этих данных помогает предотвратить отказы, поломки и ситуации, когда движение становится опасным из-за возникновения скрытых дефектов датчиков или «плавающих» ошибок в электронных компонентах механических узлов автомобиля. Этот метод диагностики особенно важен для беспилотных автомобилей, так как отсутствие водителя не позволяет определить текущее состояние автомобиля во время движения.

Такой анализ данных проводится в сочетании с моделированием процессов эксплуатации на цифровых двойниках агрегатов и подсистем роботизированных автомобилей [3–5]. Цифровой двойник автономного автомобиля – это точная модель, которая описывает все характеристики автомобиля и процессы, связанные с его созданием и использованием. Эта модель позволяет анализировать и прогнозировать работу механизмов беспилотного автомобиля.

При разработке беспилотной транспортной системы автомобилей КАМАЗ используется моделеориентированный подход (Model Driven Development), использующий киберфизические модели для сбора информации о показателях надежности элементов, систем и механизмов транспортного средства [6–8]. Затем проводится анализ собранной информации и формулируются дальнейшие рекомендации по срокам проведения технического обслуживания и ремонта.

В настоящее время на стадии эксплуатации успешно внедряется концепция централизованного хранения эксплуатационной параметрической информации о работе компонент или узлов изделия. Данные, полученные от электронных систем изделия, передаются в центральное хранилище эксплуатационной информации без участия оператора с помощью технологии «Интернет вещей». Эта информация впоследствии используется для оценки и прогнозирования работоспособности и надежности изделия или его компонентов, определения необходимости технического обслуживания или ремонта. Эта задача решается с использованием интеллектуальной системы диагностики роботизированных сельскохозяйственных автомобилей (РСА) [9].

Анализ проводимых исследований и моделирования на цифровых двойниках дает множество вариантов проектных решений. В дальнейшем при реальной эксплуатации приходится принимать решения о реализации того или иного сценария эксплуатации, подбирать наиболее эффективные технические параметры для РСА. В настоящей статье предлагается использовать метод Data Envelopment Analysis (DEA) [10, 11], который основан на решении задачи дробно-линейного программирования, для оценки множества вариантов проектных и эксплуатационных решений относительно системы РСА. Рассматривается функционирование системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей (СРСА) семейства КАМАЗ с точки зрения организации технического обслуживания и ремонта.

Методика оценки системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей

Особенность методики DEA состоит в том, что не рассматриваются какие-либо конкретные критерии и не определяются функции, связывающие входные и выходные переменные объектов. Вместо этого для каждого исследуемого объекта DMU создается некоторый набор параметров, описывающих функционирование этого объекта.

Алгоритм анализа эффективности виртуальных испытаний системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей представлен на рис. 1.

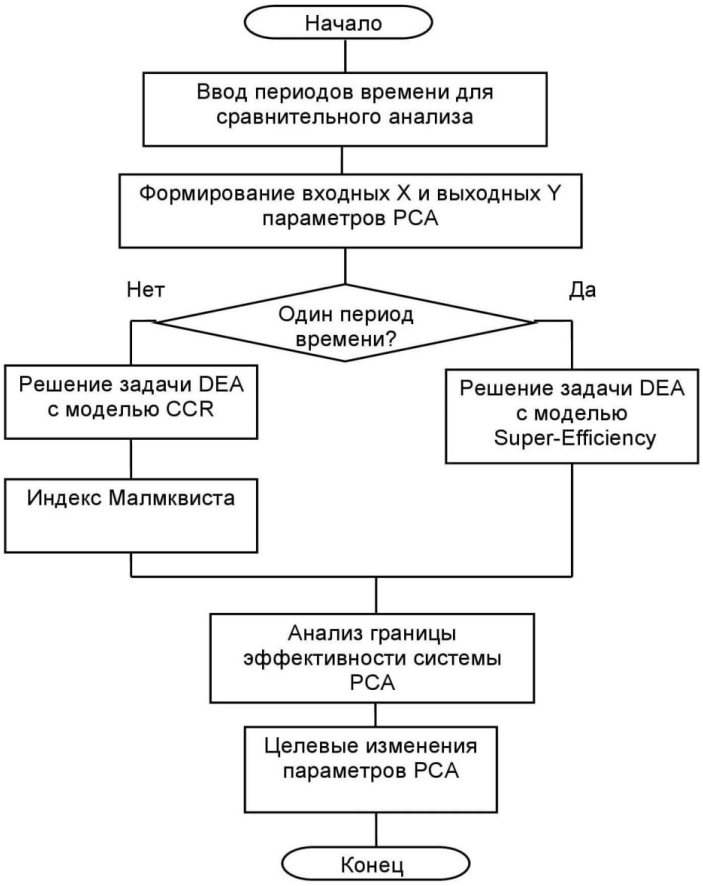

Рис. 1. Алгоритм анализа эффективности виртуальных испытаний

Процедура анализа базируется на использовании двух моделей метода DEA:

1) модель CCR Чарнеса – Купера – Родеса;
2) модель BCC Банкера – Чарнеса – Купера.

Первая модель позволяет рассчитать индекс Малмквиста для оценки эффективности в последовательные периоды времени, то есть оценить эволюцию системы РСА. На основе второй модели определяется граница «суперэффективности», то есть ориентир для развития РСА.

Математическая постановка задачи формулируется следующим образом. Для оценки системы роботизированных автомобилей из РА$_n$, $n = 1,...,N$ необходимо задать входной вектор параметров $x_n = (x_{n1},...,x_{nM})$ и выходной вектор $y_n = (y_n,...,y_{nK})$. Далее для N оцениваемых РА формируется матрица $X = (x_{nm})$, $m = \overline{1,M}$ с размерностью $M \times N$ и матрица $Y = (y_{nk})$, $k = \overline{1,K}$ с размерностью $K \times N$ с данными для всех объектов [12].

Задача анализа при оценке эффективности работы СРСА на множестве разных сценариев при использовании метода DEA сводится к нахождению миниму-

ма критерия эффективности θ (задача Банкера – Чарнеса – Купера) с постоянным эффектом масштаба (CRS) [14]:

$$\begin{aligned} &\min_{\theta,\lambda}(\theta), \\ &-y_n + Y\lambda \geq 0, \\ &\theta x_n - X\lambda \geq 0, \\ &e\lambda = 1, \quad \lambda \geq 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где θ – интегральный критерий эффективности исследуемого объекта $\theta \in (0;1]$, e – вектор-строка с единичными элементами, X – матрица входов, Y – матрица выходов, x_n и y_n – вектор-столбцы индивидуальных входов и выходов для n-го роботизированного автомобиля в X и Y соответственно, λ – полуположительный вектор (фактор взвешивания), $\lambda_n \geq 0$, $\forall i = 1,...,N$.

Решением системы уравнений (1) является набор целевых изменений параметров в многомерном пространстве относительно границы эффективности. Позиция объекта относительно границы позволяет не только оценить его эффективность, но и определить величину изменений параметров, которые выводят объект на границу. Если рассматриваются сценарии с двумя или более периодами работы СРСА, то выполняется решение задачи Чарнеса – Купера – Родеса и рассчитывается индекс Малмквиста, характеризующий динамику эффективности процесса.

Оценка эффективности функционирования системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей

Любая техническая система в процессе эксплуатации подвергается воздействию негативных факторов, снижающих эксплуатационную надежность. Выбор факторов (параметров) для анализа является ключевой задачей для оценки эксплуатационной надежности элементов и систем автомобиля, а также автомобиля в целом. Решение задач для моделей проводилось с использованием программы PIM DEASoft версии 3 [12].

Ключевые показатели эффективности KPI (Key Performance Indicators) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Ключевые показатели эффективности

Обозначение	Показатель эффективности
Входные параметры	
X1	Коэффициент технической готовности, %
X2	Эксплуатационная скорость (скорость перемещения РА на маршрутах при выполнении производственных задач), км/час
X3	Время простоя в ТОиР, дн.
X4	Среднесуточная продолжительность работы автомобиля, час
X5	Средний месячный пробег РА, тыс. км/месяц
Выходные параметры	
Y1	Остаточный ресурс автомобиля, тыс. час
Y2	Удельная стоимость эксплуатационного и технического обслуживания, руб/т
Y3	Удельное грузоперемещение, т/км

В табл. 2 и табл. 3 приведены значения параметров 10 роботизированных автомобилей (РА) для двух периодов эксплуатации: 2020 и 2021 гг.

Таблица 2

Значения входных параметров в 2020 и 2021 гг.

РА	Входные параметры									
	X1, %		X2, км/час		X3, дн.		X4, час.		X5, тыс. км/месяц	
	2020	**2021**	**2020**	**2021**	**2020**	**2021**	**2020**	**2021**	**2020**	**2021**
R1	0,93	0,93	28	27	2,1	2,1	16	16	13	14
R2	0,88	0,89	32	32	2,4	2,5	18	18	12,7	13
R3	0,89	0,88	34	33	2,6	2,7	20	20	14	15
R4	0,99	0,995	37	35	3,1	3	14	15	15,2	15,5
R5	0,92	0,96	42	40	2	1,5	15	15,5	11,3	11,6
R6	0,86	0,86	39	39	1,9	1,9	13	14	14,8	14
R7	0,85	0,87	40	41	2,3	2,1	19	19,7	12,1	14,2
R8	0,97	0,98	33	35	2,8	1,4	17	18	15	16
R9	0,94	0,97	29	30	3	1,6	18	20	13,4	14,8
R10	0,91	0,9	30	39	2,9	3	20	20	11,8	11

Таблица 3

Значения выходных параметров в 2020 и 2021 гг.

РА	Выходные параметры					
	Y1, тыс. час		Y2, руб/т		Y3, т/км	
	2020	**2021**	**2020**	**2021**	**2020**	**2021**
R1	16,3	16,5	7,7	8	0,17	0,18
R2	18	18	10,2	10,1	0,21	0,2
R3	17	17,3	9	9,2	0,33	0,34
R4	16,7	17	11,5	11,3	0,14	0,13
R5	15,2	17,2	12,8	14,5	0,22	0,26
R6	17,5	18	8,23	7,9	0,14	0,14
R7	18,1	17,1	9,71	9,5	0,21	0,2
R8	16,4	17,5	12,4	8,3	0,19	0,2
R9	15,6	16	13	7,1	0,31	0,15
R10	19	18,1	11,9	10,1	0,26	0,37

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

$$\delta_{jl} = \frac{P_{jl}^{T} - P_{jl}^{D}}{P_{jl}^{D}} \times 100\%,$$

где P_{jl}^{D} – измеренное значение параметра; P_{jl}^{T} – целевое значение.

В результате анализа в PIM-DEAsoft были получены целевые значения изменения параметров для СРСА в 2020 г., которые следует выполнить, чтобы получить повышение эффективности в 2021 г. (табл. 4).

Таблица 4

Целевые значения изменений параметров РА в 2020 г.

РА	Изменение параметров, %							
	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3
R1	-14,31	3,49	3,49	1,88	-11,53	0	19,96	11,86
R2	2,2	2,2	2,2	-4,%7	1,13	0	0	0
R3	21,28	10,42	21,28	-0,73	5,87	5,25	66,13	0
R4	-5,36	8,5	-28,94	8,5	-10,1	0	0	37,11
R5	7,03	-21,76	45,21	17,24	32,59	9,12	0	0
R6	16,95	-18,72	28,51	28,51	-3,19	0	9,1	25,55
R7	4,06	-19,75	5,26	-4,63	5,26	0	5,88	0,94
R8	-3,43	0,18	0,18	0,18	-13,42	0	0	31,04
R9	10,21	24,71	5,72	24,71	4,1	34,24	0	0
R10	7,19	18,66	-3,89	-0,55	18,66	0	0	0

Программа DEAsoft предоставляет графические данные, которые позволяют анализировать все объекты и разные комбинации входных и выходных параметров, в виде графиков расположения DMU в многомерном пространстве. Чтобы облегчить анализ, PIM DEASoft предлагает возможность изучения различных срезов этого параметрического пространства:

– один вход – один выход;

– два входа – один выход;

– два выхода – один вход.

На рис. 2 представлена диаграмма PPS (Production Possibility Set) в пространстве параметров X2 и Y3. Чтобы в 2021 г. достичь границы эффективности в результате ТОиР, автомобилю R6 требуется:

1) увеличить удельное грузоперемещение на 0,3 т/км при неизменной скорости эксплуатации;

2) уменьшить скорость эксплуатации до 28 км/час при неизменном удельном грузоперемещении.

Уменьшение скорости приведет к увеличению остаточного ресурса автомобиля и уменьшению времени простоя на ТОиР за счет снижения частоты отказов и выходов из строя агрегатов РА. Кроме того, движение роботизированного сельскохозяйственного автомобиля с повышенной скоростью по грунтовым дорогам между полями и зернохранилищами приведет к увеличению износа агрегатов автомобиля.

Таким образом, целесообразно увеличить удельное грузоперемещение за счет более полной загрузки кузовов РА.

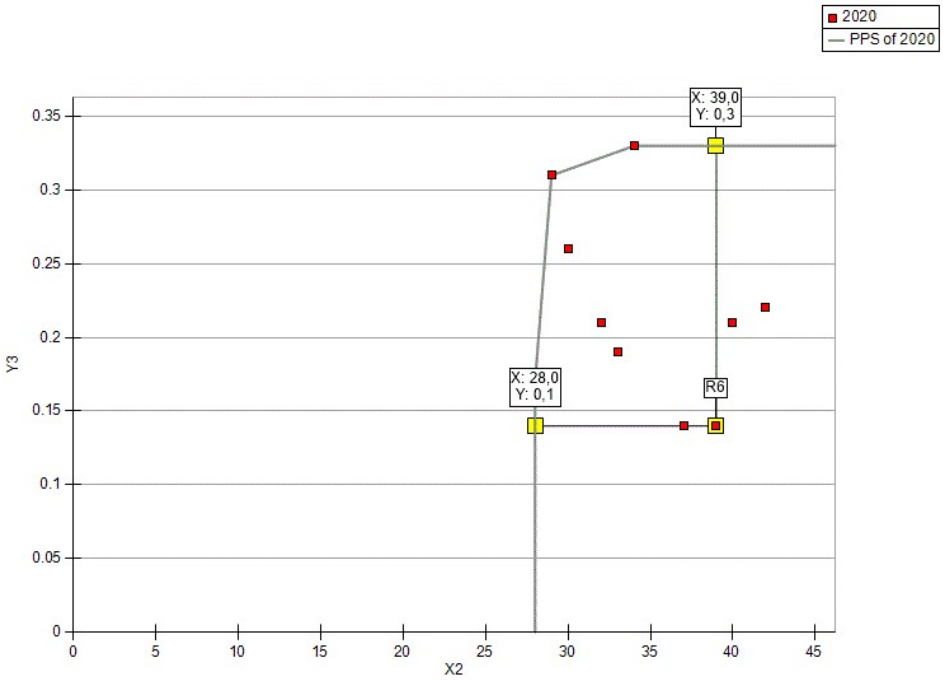

Рис. 2. Целевые изменения параметров X2 и Y3 для выхода автомобиля R6 на границу эффективности

На рис. 3 показано, что в 2021 г. автомобиль R3 стал ближе к границе эффективности, чем в 2020 г., относительно входных параметров – коэффициента технической готовности X1 и времени простоя X3 на техническом обслуживании и ремонте, а также выходного параметра Y2 – удельной стоимости эксплуатационного и технического обслуживания.

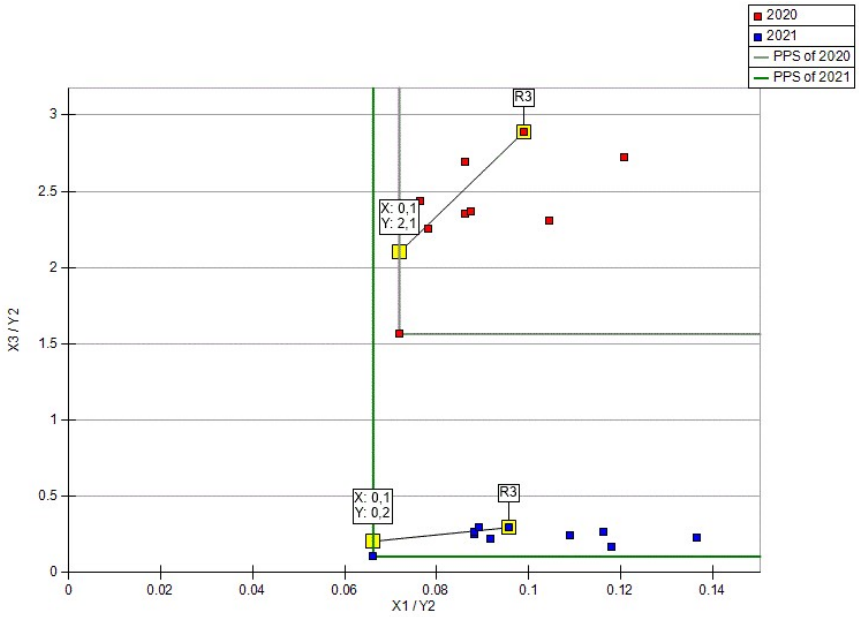

Рис. 3. Расположение границ эффективности в 2020 и 2021 гг.

Аналогичным образом можно получить информацию о целевых изменениях всех параметров системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей.

Интегральная оценка качества функционирования роботизированных автомобилей с применением индекса Малмквиста

Важной задачей является сравнение эффективности системы РСА на различных периодах времени. Это связано с тем, что изменения условий эксплуатации, износ агрегатов и другие временные факторы могут привести к неэффективности работы некоторых роботизированных автомобилей. Предлагается использовать методику сравнения, основанную на расчете индекса Малмквиста.

Индекс Малмквиста дает возможность оценивать развитие объектов на двух периодах времени. В статье используется методология DEA-Malmquist, которая основана на моделях CCR_{input} и описана следующим образом [15–17]:

$$MI\left(y_{t+1},x_{t+1},y_t,y_t\right)=\frac{D_{CRS}^{t+1}\left(y_{t+1},x_{t+1}\right)}{D_{CRS}^{t}\left(y_t,x_t\right)}\left[\frac{D_{CRS}^{t}\left(y_{t+1},x_{t+1}\right)}{D_{CRS}^{t+1}\left(y_{t+1},x_{t+1}\right)}\times\frac{D_{CRS}^{t}\left(y_t,x_t\right)}{D_{CRS}^{t+1}\left(y_t,x_t\right)}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (2)$$

где x_t и x_{t+1} – входные векторы; y_t и y_{t+1} – выходные векторы в периоды t и $t+1$; D_{CRS}^{t}, D_{CRS}^{t+1} – input-ориентированные функции дистанции по отношению к технологии производства в периоды времени t и $t+1$; CRS показывает, что рассматривается постоянный эффект масштаба.

Индекс Малмквиста (2) может быть представлен как произведение:

$$MI = EC \cdot TC,$$

где MI – индекс Малмквиста; EC – технический прогресс; TC – изменение эффективности.

В табл. 5 представлены значения показателей TC, EC и MI для роботизированных сельскохозяйственных автомобилей в 2020 и 2021 гг.

Таблица 5

Значения показателей TC, EC и MI для РСА (2020–2021 гг.)

DMU	TC	EC	TFPG (MI)
R1	1	1	1
R2	1	1	1
R3	1	1	1
R4	1,03	1	1,03
R5	1	1	1
R6	1	1	1
R7	1	0,98	0,98
R8	1,03	1	1,03
R9	1	0,99	0,99
R10	1	1	1

Из табл. 5 видно, что прогресса ($MI > 1$) достигли роботизированные автомобили R4 и R8. У роботизированных автомобилей R7 и R9 фактор производительности снизился ($MI < 1$), а у большей части РА остался неизменным ($MI = 1$).

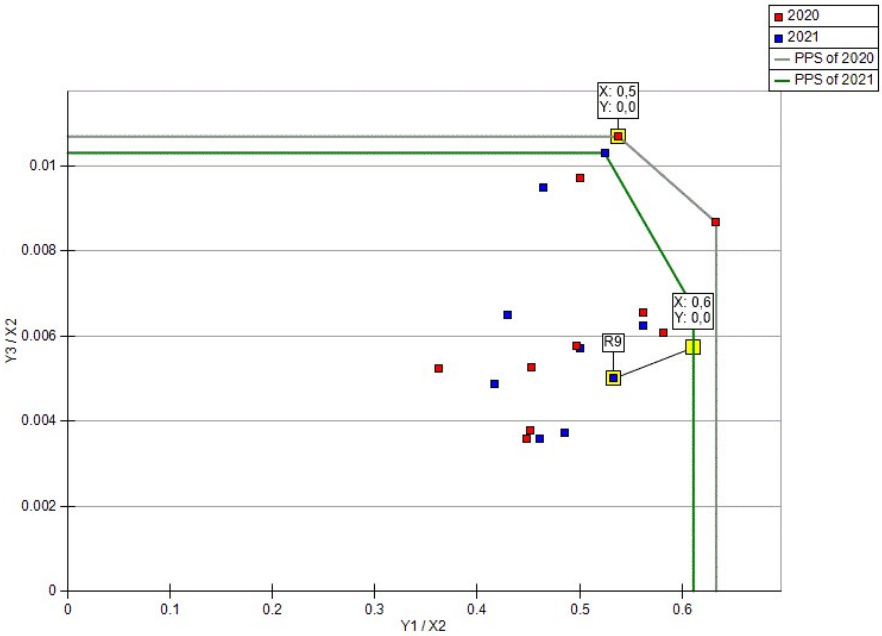

Рис. 4. Положение РА R9 относительно границы эффективности в двух периодах времени

Этот вывод подтверждается и анализом графика границ эффективности для двух периодов (рис. 4). Роботизированный автомобиль R9 в 2020 г. находился на границе эффективности, а в 2021 г. его эффективность снизилась за счет изменения целевых показателей следующих параметров: эксплуатационной скорости X2 (скорости перемещения РА на маршрутах при выполнении производственных задач) и выходных параметров – остаточного ресурса автомобиля Y1 и удельного грузоперемещения Y3.

Заключение

Метод DEA позволяет проводить комплексную оценку эффективности системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей благодаря возможности рассмотрения большого числа параметров и развития различных сценариев. Применение данного метода возможно как при виртуальном вводе в эксплуатацию РСА, так и при планировании реальных производственных работ на предприятиях. Использование индекса Малмквиста помогает более детально проанализировать систему РСА в различные периоды времени и оценить принятые проектные и организационные решения. Полученные с помощью моделей данные служат основой для формулирования правил принятия решений по техническому обслуживанию.

Перспективным направлением дальнейших исследований является применение многоэтапных моделей DEA для сравнительного анализа сложных систем [18, 19]. Обычные модели DEA рассматривают производственные объекты как системы типа «черный ящик», в которых известны только входы и выходы. Функции преобразования входов в выходы неизвестны, или их определение затруднено. Это приводит к тому, что невозможно использовать важные промежуточные ключевые параметры. Это часто приводит к невозможности разграниче-

ния и идентификации того, какая именно часть производственного объекта ответственна за его общую неэффективность.

В многоэтапных моделях DEA появляется возможность разделить общую структуру на несколько отдельных объектов анализа (от двух до пяти). Применительно к рассматриваемой в статье задаче такой подход можно использовать, представив производственный процесс в СРСА как два этапа: а) формирование группы эксплуатируемых РСА с учетом их технических и эксплуатационных характеристик; б) эксплуатация с оценкой эффективности получения конечного результата при определенной стратегии технического обслуживания РСА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Novak P., Kadera P., Wimmer M.* Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // In: Proc. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. IEEE Xplore, 2017. Pp. 1–4.
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. *Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гашенко 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. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 107–110.
4. *Губанов Н.Г., Одинцов В. П., Михеев Ю. В., Ахтямов Р. Н., Морев А. С.* Архитектура системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного транспортного средства // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 171–174.
5. *Яковлева А.Е., Сусарев С.В., Щербина В.Г.* Разработка диагностической системы прогнозирования технического состояния автономного транспортного средства // Сборник статей IX Международной научно практической конференции «Наука и просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации». Пенза, 2022. С. 46–49.
6. *Berrada J.* Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicle: A State of the Art // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 27. Pp. 215–221.
7. *Daigle M.* Model-based prognostics. Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center. 2014. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/da58/cbbf188590845e9bf3caf0e3d2bd3f3f6723.pdf (дата обращения 10.02.2024).
8. *Schulte P.Z., Spenser D.A.* On-Board model-based fault diagnosis for autonomous proximity operations // Proceedings of the 69th International Astronautically Congress (IAC), Bremen, Germany, 1–5 October 2018, IAC-18-C1.5.11x45016. 2018. Pp. 1–15.
9. *Орлов С.П., Сусарев С.В., Пугачев А.И.* Интеллектуальная система диагностики агрегатов роботизированного автомобиля КАМАЗ // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Т. 2. Самара: Офорт, 2019. С. 92–95.
10. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Boston, MA: Springer, 2011. Pp. 1–39.
11. *Sowlati T., Paradi J.C.* Establishing the "practical frontier" in data envelopment analysis // Omega. 2004. Vol. 32 (4). Pp. 261–272.
12. *Яковлева А.Е., Сусарев С.В., Орлов С.П.* Анализ эффективности роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей // Системы управления и информационные технологии. 2021. № 3 (85). С. 94–100.
13. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* 2007 Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. Springer-Verlag, 2007. 492 p.
14. PIM-DEA. Home page. URL: http://www.deasoftware.co.uk/ (дата обращения 10.02.2024).
15. *Учайкин Р.А., Орлов С.П.* Сравнительная оценка эффективности компьютерной техники в подразделениях промышленного предприятия // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 1. С. 74–86.

16. *Сусарев С.В.* Модели оценки эффективности технического обслуживания роботизированных транспортных средств // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 4. С. 62–76.
17. *Лисситса 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.
18. *Izadikhah M., Tavana M., Di Caprio D., Santos-Arteaga F.J.* A novel two-stage DEA production model with freely distributed initial inputs and shared intermediate outputs // Expert Systems With Applications. 2018. Vol. 99. Pp. 213–230.
19. *Шапошников А.М., Ратнер С.В.* Эволюция методологии анализа среды функционирования: литературный обзор // Экономический вестник ИПУ РАН. 2023. № 1. С. 67–90.

Статья поступила в редакцию 19 марта 2024 г.

INTEGRATED EVALUATION OF THE FUNCTIONING QUALITY OF ROBOTIC AGRICULTURAL VEHICLE SYSTEM

***A.E. Yakovleva*[1]**

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

E-mail: nastya-yakovleva-97@mail.ru

Abstract. *The article proposes to use a method for evaluating the effectiveness (Data Envelope Analysis) of a system of robotic agricultural vehicles, which is based on solving the problem of fractional linear programming when analyzing a set of homogeneous production facilities. This method is used for an integrated assessment of the quality of service of robotic vehicles according to the specified key parameters of functioning. The main parameters of the effectiveness of the system of robotic agricultural vehicles are selected: the coefficient of technical readiness, operational speed, downtime in maintenance and repair, the average daily duration of the car, the average monthly mileage of the vehicle, the remaining life of the car, the unit cost of maintenance and specific cargo displacement. Solving systems of linear equations makes it possible to determine the position of each analyzed object relative to the efficiency boundary in a multidimensional parameter space. The solution of the Bunker-Charnes-Cooper problem has been completed. Sets of target changes in the parameters of robotic cars have been obtained, which transfer objects to the efficiency boundary. The analysis of the parameters is carried out by constructing diagrams of production capabilities in a multidimensional space. For two periods of operation of the robotic vehicle system for an agro-industrial enterprise, the Malmquist index was calculated to assess the dynamics of operational efficiency.*

Keywords: *robotic vehicles, digital twin, efficiency evaluation method, virtual commissioning, Malmquist index.*

REFERENCES

1. *Novak P., Kadera P., Wimmer M.* Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // In: Proc. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. IEEE Xplore, 2017. Pp. 1–4.
2. *Shcherbakov M.V., Sai Van. K.* Arhitektura sistemy predskazatelnogo tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnyh mnogoobektnyh sistem v koncepcii Industrii 4.0 [Architecture of a predictive maintenance system for complex multi-object systems in the concept of Industry 4.0] // Programmnye produkty i sistemy. 2020. № 2. Pp. 186–194. (In Russian).
3. *Susarev S.V., Sidorenko K.V., Morev A.S., Gashenko Yu.V.* Principy postroeniya sistem upravleniya robotizirovannyh transportnyh sredstv s avtonomnym i distancionnym rezhimom upravleniya [Principles of building control systems for robotic vehicles with autonomous and remote control modes] // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah. Trudy XXI Mezhdunarodnoj konferencii. V. 2. Samara: Ofort, 2019. Pp. 107–110. (In Russian).
4. *Gubanov N.G., Odintsov V.P., Mikheev Yu.V., Akhtyamov R.N., Morev A.S.* Arhitektura sistemy diagnostiki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya robotizirovannogo transportnogo sredstva [Architecture of the system of diagnostics and forecasting of the technical condition of a robotic vehicle] // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah. Trudy XXI Mezhdunarodnoj konferencii. V. 2. Samara: Ofort, 2019. Pp. 171–174. (In Russian).
5. *Yakovleva A.E., Susarev S.V., Shcherbina V.G.* Razrabotka diagnosticheskoj sistemy prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtonomnogo transportnogo sredstva [Development of a diagnostic system for predicting the technical condition of an autonomous vehicle] // Sbornik

[1] *Anastasiya E. Yakovleva, Assistant.*

statej IX Mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoj konferencii «Nauka i prosveshchenie: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii». Penza, 2022. Pp. 46–49. (In Russian).
6. *Berrada J.* Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicle: A State of the Art // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 27. Pp. 215–221.
7. *Daigle M.* Model-based prognostics. Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center. 2014. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/da58/cbbf188590845e9bf3caf0e3d2bd3f3f6723.pdf (дата обращения 10.02.2024).
8. *Schulte P.Z., Spenser D.A.* On-Board model-based fault diagnosis for autonomous proximity operations // Proceedings of the 69th International Astronautically Congress (IAC), Bremen, Germany, 1-5 October 2018, IAC-18-C1.5.11x45016. 2018. Pp. 1–15.
9. *Orlov S.P., Susarev S.V., Pugachev A.I.* Intellektualnaya sistema diagnostiki agregatov robotizirovannogo avtomobilya KAMAZ [Intelligent diagnostic system for units of a robotic KAMAZ vehicle] // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah. Trudy XXI Mezhdunarodnoj konferencii. V. 2. Samara: Ofort, 2019. Pp. 92–95. (In Russian).
10. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Boston, MA: Springer, 2011. Pp. 1–39.
11. *Sowlati T., Paradi J.C.* Establishing the "practical frontier" in data envelopment analysis // Omega. 2004. Vol. 32 (4). Pp. 261–272.
12. *Yakovleva A.E., Susarev S.V., Orlov S.P.* Analiz effektivnosti robotizirovannoj sistemy sel'skohozyajstvennyh avtomobilej [Efficiency analysis of the robotic system of agricultural vehicles] // Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii. 2021. № 3 (85). Pp. 94–100. (In Russian).
13. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* 2007 Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. Springer-Verlag, 2007. 492 p.
14. PIM-DEA. Home page. URL: http://www.deasoftware.co.uk/ (accessed February 10, 2024).
15. *Uchaykin R.A., Orlov S.P.* Sravnitel'naya ocenka effektivnosti komp'yuternoj tekhniki v podrazdeleniyah promyshlennogo predpriyatiya [Comparative evaluation of the effectiveness of computer technology in the divisions of an industrial enterprise] // Vestn. Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki. 2020. V. 28. № 1. Pp. 74–86. (In Russian).
16. *Susarev S.V.* Modeli ocenki effektivnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya robotizirovannyh transportnyh sredstv [Models for evaluating the effectiveness of maintenance of robotic vehicles] // Vestn. Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki. 2020. V. 28. № 4. Pp. 62–76. (In Russian).
17. *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.
18. *Izadikhah M., Tavana M., Di Caprio D., Santos-Arteaga F.J.* A novel two-stage DEA production model with freely distributed initial inputs and shared intermediate outputs // Expert Systems With Applications. 2018. Vol. 99. Pp. 213–230.
19. *Shaposhnikov A.M., Ratner S.V.* Evolyuciya metodologii analiza sredy funkcionirovaniya: literaturnyj obzor [Evolution of data envelopment analysis methodology: literature review] // Ekonomicheskij vestnik IPU RAN. 2023. № 1. Pp. 67–90. (In Russian).