

УДК 004.942

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

*Е.Е. Волхонская**

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

E-mail: lizaveta5.6@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача оптимального назначения автономных транспортных средств на выполняемые производственные процессы. Проведение виртуальных испытаний для организации прогнозного технического обслуживания предполагает создание цифровых двойников, основой которых являются имитационные модели. Решение задачи назначений, описанной в статье, является базой для построения имитационных моделей на сетях Петри для анализа динамики производственно-логистической системы. Рассмотрена структура агропромышленной системы уборки зерновых комплексом комбайнов с использованием автономных транспортных средств на базе автомобилей КАМАЗ. Определено множество характеристик производственно-логистической системы: площади и урожайность полей, производительность комбайнов, грузоподъемность и скорость автомобилей и др. Сформулирована задача минимизации эксплуатационных затрат для комплекса автомобилей при заданном распределении комбайнов по полям с зерновыми культурами. Задача относится к целочисленному линейному программированию с булевыми переменными. Отличие постановки данной задачи состоит в формировании ряда ограничений, учитывающих основные параметры производственно-логистической системы. Рассмотрен пример оптимизации распределения автономных транспортных средств при заданном количестве полей и обрабатывающих их комбайнов. Полученное решение позволяет определить набор готовых для эксплуатации автомобилей, а также сформировать резерв автомобилей для снижения простоев. Решение предложенной задачи может быть положено в основу структуры имитационной модели в составе цифрового двойника производственно-логистической системы. Также методика может применяться при текущем планировании реальных работ комбайнов и автомобилей.

Ключевые слова: системный анализ, целочисленное линейное программирование, задача назначения, имитационное моделирование, автономные автомобили, зерноуборочные комбайны.

Введение

Современное направление развития промышленности базируется на концепции «Индустрия 4.0» [1], в рамках которой проводится создание производственно-логистических систем с автономными и беспилотными транспортными средствами. Одна из важнейших задач – организация прогнозного технического обслуживания (ТО) [2, 3]. Это становится возможным, так как автономные транс-

* *Елизавета Евгеньевна Волхонская, аспирант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».*

портные средства имеют развитые бортовые измерительные системы и средства удаленного мониторинга технических состояний. В то же время для таких сложных и дорогих технических объектов построение систем технического обслуживания должно проектироваться еще на этапе виртуального запуска в эксплуатацию [4]. Виртуальные испытания с использованием цифровых двойников дают возможность заранее выявить проблемы и сформулировать задачи ТО [5]. Большое значение имеет управление резервом автономных транспортных средств и использование стратегии «каннибализации» для оперативной замены дефектных узлов [6, 7].

В рамках проекта создания роботизированных агротехнических автомобилей КАМАЗ [8] был применен подход, основанный на разработке комплекса системных моделей. В такой комплекс входят задача оптимизации структуры производства и имитационные модели производственного процесса [5]. Для построения имитационных моделей на первом этапе анализа решается задача назначения транспортных средств по заданному критерию. Полученное решение является базовым при формировании структуры имитационной модели.

Рассматриваемая системная задача назначения транспортных средств на обслуживание производственных объектов и процессов носит общий характер и может быть применена при анализе сложных логистических систем. В настоящей статье проведено исследование распределения роботизированных агротехнических автомобилей для вывоза зерна с полей во время уборки.

1. Модель производственно-транспортных операций в логистической системе агропромышленного предприятия

На рисунке представлена общая структура производственно-логистической системы, в которую входят:

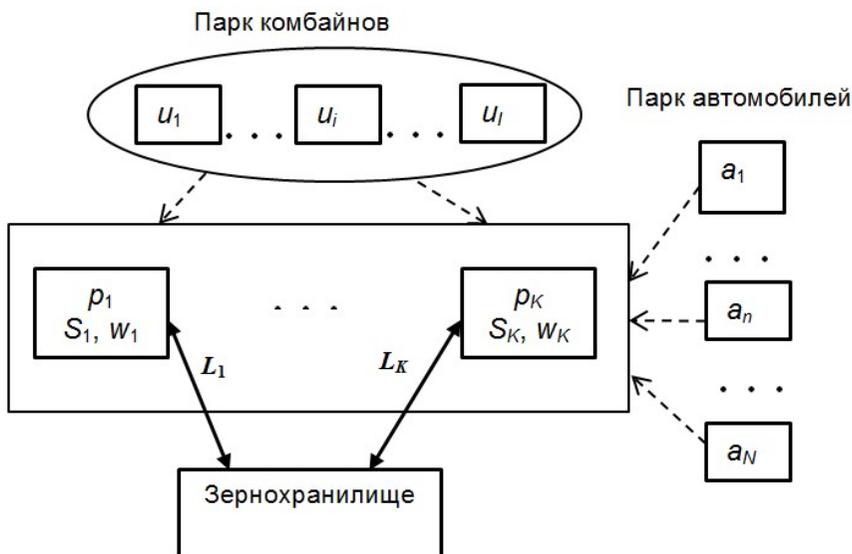
- парк беспилотных комбайнов $U = \{u_1, \dots, u_i, \dots, u_l\}$ [9];
- парк автономных автомобилей на базе шасси КАМАЗ $A = \{a_1, \dots, a_n, \dots, a_N\}$ [10];
- множество обрабатываемых полей $P = \{p_1, \dots, p_k, \dots, p_K\}$;
- множество маршрутов между зернохранилищем и полями L_1, \dots, L_K .

Парк автономных автомобилей A состоит из трех групп:

- множество активных автомобилей A^A , находящихся в эксплуатации и выполняющих работы на полях;
- множество резервных автомобилей A^R , прошедших техническое обслуживание или ремонт и готовых к эксплуатации;
- множество каннибализируемых автомобилей A^C , предназначенных для снятия агрегатов и узлов и установки на активные автомобили [7].

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

Задача назначения беспилотных комбайнов на поля в данной статье не рассматривается для простоты изложения предлагаемого подхода. Следует отметить, что описанная далее методика применима и к решению задачи назначения комбайнов для работы на полях по уборке урожая.



Структура агротехнической производственно-логистической системы

Введем следующие обозначения переменных и параметров:

- 1) S_k – площадь поля k , га;
- 2) w_k – урожайность зерна на поле k , ц/га;
- 3) Pf_i – производительность комбайна i , назначенного на поле k , т/час.

Производительность зависит от средней скорости комбайна, ширины жатки, урожайности зерна на данном поле;

- 4) T_k – заданное время уборки поля k , час;
- 5) L_k – расстояние от поля k до зернохранилища, км;
- 6) v_{sn} – средняя скорость автономного автомобиля n при передвижении по маршруту «Поле – Зернохранилище», км/час;
- 7) V_n^A – объем кузова автомобиля n , м³;
- 8) V_i^U – объем бункера комбайна i , м³;
- 9) β – коэффициент пересчета объема зерна определенного сорта в тонны, т/м³;
- 10) B_A – количество автомобилей, готовых к эксплуатации и доступных к назначению на поля, при этом $B_A = |A| - |A^R| - |A^C|$, где A – множество автономных автомобилей, A^R и A^C – множества резервных и каннибализируемых автомобилей соответственно.

Далее определяются основные соотношения, связывающие параметры процесса уборки зерна с характеристиками комбайнов и автономных автомобилей.

1. Масса зерна в тоннах, выращенного на поле k площади S_k с учетом коэффициента допустимых потерь δ при уборке, равна

$$M_k = (1 - \delta) S_k w_k / 10.$$

Масса зерна на поле k , которую можно убрать комбайном i за время T_k

$$M_{ki}(T) = Pf_i \times T_k.$$

С другой стороны, время T_{ki} , необходимое для полной уборки поля k комбайном i , определяется как

$$T_{ki} = (1 - \delta) S_k w_k / 10 P f_i.$$

2. Время цикла на маршруте вида «Загрузка на поле – Выгрузка в зернохранилище – Возврат на поле» одного автомобиля n для поля k равно $2L_k / v_{sn}$, час.

Максимальное количество циклов движения одного автомобиля n к комбайну i на поле k за период T_k :

$$\eta_{kn} = [T_k / (2L_k / v_{sn} + T_b)],$$

где T_b – время выгрузки зерна в зернохранилище.

Масса зерна, вывозимого за период T_k одним автомобилем n с поля k :

$$M_{kn} = \beta \eta_{kn} V_n^A.$$

2. Постановка задачи оптимального назначения автономных автомобилей для выполнения работ на полях

Рассматривается минимизация эксплуатационной стоимости работы автомобилей в производственно-логистической агропромышленной системе. Булеву переменную оптимизационной задачи определим так:

$$x_{kn} = \begin{cases} 1 - & \text{если для выполнения работы на поле } k \text{ назначен} \\ & n\text{-й автономный автомобиль,} \\ 0 - & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Как отмечено выше, считается, что решена задача назначения комбайнов на поля при условии, что на одно поле назначается только один комбайн. В результате известна функция соответствия $i = \Theta(k)$.

Теперь решается задача оптимального назначения автомобилей на работу с комбайнами на полях.

Целевая функция C – общая стоимость эксплуатации автономных автомобилей при выполнении работ на заданном множестве полей [11]:

$$C = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{kn} x_{kn} \right\}, \quad (2)$$

где $c_{kn} = 2\eta_k L_k (c_{kn}^e + s\varphi_n)$ – суммарная стоимость выполнения производственных операций автономным автомобилем n на поле p_k ; c_{kn}^e – удельные затраты на ТО, руб/км; φ_n – расход топлива автомобилем n , л/км; s – стоимость топлива, руб/л.

Ограничения задачи имеют вид:

1) назначение каждого автономного автомобиля a_n на одно и только одно поле p_k :

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} = 1, \quad n = \overline{1, N}, \quad (3)$$

другой вариант: назначение автономного автомобиля возможно не более чем на одно поле (в том числе возможно отсутствие назначения):

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} \leq 1, \quad n = \overline{1, N},$$

2) назначение на каждое поле p_k не менее одного автономного автомобиля:

$$\sum_{n=1}^N x_{kn} \geq 1, \quad k = \overline{1, K}, \quad (4)$$

3) назначение на все поля не более доступного количества автомобилей B_A :

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{kn} \leq B_A, \quad (5)$$

4) масса зерна, выгружаемого комбайном i из бункера в автомобили на поле k за период T_k , должна быть не больше суммарной массы, которую могут вывезти обслуживающие автомобили за этот период:

$$\sum_{n=1}^N \eta_{kn} \beta (V_n^A - V_i^U) x_{kn} \geq 0, \quad k = \overline{1, K}, \quad i = \Theta(k), \quad (6)$$

где Θ – функция соответствия номера назначенного комбайна i заданному полю k , η_{kn} – число циклов поездок, выполняемых каждым автомобилем за время T_k ;

5) масса зерна, которую могут вывезти автомобили с поля k за период T_k , должна быть не меньше массы зерна, обработанного комбайном i за этот период:

$$\sum_{n=1}^N \frac{\beta}{T_k P f_i} \eta_{kn} V_n^A x_{kn} \geq 1, \quad k = \overline{1, K}, \quad i = \Theta(k). \quad (7)$$

6) максимальный перемещаемый объем кузовов автомобилей за время T_k не должен превышать объем убранных зерна более чем в α раз, где коэффициент α показывает степень суммарной недогруженности автомобилей:

$$\sum_{n=1}^N \frac{\beta}{T_k P f_i} \eta_{kn} V_n^A x_{kn} \leq \alpha, \quad \alpha > 1, \quad k = \overline{1, K}. \quad (8)$$

Можно также рассматривать коэффициент загрузки кузовов автомобилей, равный $\gamma = 1/\alpha$.

В результате решения оптимизационных задач (2) – (8) получаем булеву матрицу X назначений автономных автомобилей на работы, которые задаются календарно-сетевым графиком G .

Полученное решение определяет структуру работ и статическое распределение ресурсов, но не описывает динамику процессов в режиме эксплуатации в условиях значительной неопределенности внешней среды и вероятностного характера технических состояний транспортных средств. Эти исследования проводятся на имитационных моделях на стохастических сетях Петри, описанных в работах [12, 13].

3. Пример оптимизации назначения автомобилей на множество полей

В качестве примера сформулирована и решена задача назначения при следующих исходных данных: а) число полей $K=4$; б) количество комбайнов $I=4$; в) количество автономных автомобилей $N = 12$.

Предположим, что имеются следующие типы комбайнов и автомобилей:

1. Два типа комбайнов [14–16], каждому комбайну соответствует индивидуальный номер:

- Тип 1 – TORUM 785, номера {1; 2};
- Тип 2 – CLAAS LEXION 580, номера {3; 4},
- 2. Три модели автономных автомобилей [17] с индивидуальными номерами:
 - КАМАЗ-6520-49, номера {1; 2; 3; 4; 5};
 - КАМАЗ-65115-42, номера {6; 7; 8; 9};
 - КАМАЗ-65111-48, номера {10; 11; 12}.

В табл. 1 и 2 приведено распределение комбайнов по полям и их характеристики. Для простоты принято, что на одном поле работает только один комбайн. При расчетах приняты следующие значения коэффициентов: $\beta = 0,77$ т/м³ и $\delta = 2$ %. При определении времени уборки поля принято, что выгрузка автомобиля в зернохранилище $T_b = 0,5$ час. В табл. 3 содержатся параметры автомобилей КАМАЗ трех моделей.

Таблица 1

Параметры полей

Номер k	Площадь S_k , га	Урожайность w_k , ц/га	Длина маршрута L_k , км	Масса убираемого зерна M_k , т	Время уборки T_k , час
1	122	22	12,5	263	16,5
2	250	19,2	5	470	29,4
3	360	25,4	8,8	900	45
4	480	16,8	10,4	790	39,5

Таблица 2

Параметры комбайнов, назначенных на поля

Тип комбайна	Номер i	Номер поля k	Производительность Pf_i , т/час	Объем бункера V_i^U , м ³
Тип 1	1	3	20	12,3
Тип 1	2	4	20	12,3
Тип 2	3	1	16	10,5
Тип 2	4	2	16	10,5

Таблица 3

Параметры автономных автомобилей

Модель	Номер n	Объем кузова V_n^A , м ³	Средняя скорость v_n , км/час	Расход топлива, л/км	Удельная стоимость ТО, руб/км
КАМАЗ 6520	1; 2; 3; 4; 5	20	27	0,29	8,1
КАМАЗ 65115	6; 7; 8; 9	10	30	0,26	6,9
КАМАЗ 65111	10; 11; 12	8,2	30	0,25	5,7

В табл. 4 приведены значения эксплуатационных расходов C_{kn} (руб.) различных моделей автомобилей, соответствующих назначениям на разные поля. От номера поля зависят в первую очередь число циклов поездок, расход топлива на маршруте и суммарные эксплуатационные издержки.

Эксплуатационные расходы при использовании автономных автомобилей на различных полях, руб.

Модель	Поле p_1		Поле p_2		Поле p_3		Поле p_4	
	η_1	C_{1n}	η_1	C_{2n}	η_3	C_{3n}	η_4	C_{4n}
КАМАЗ 6520	11	5895	33	7075	39	14716	31	13824
КАМАЗ 65115	12	5658	35	6601	41	13609	33	12945
КАМАЗ 65111	12	5160	35	6020	41	12411	33	11806

4. Решение задачи целочисленного линейного программирования с булевыми переменными

Преобразуем двухмерную матрицу значений искомым булевых переменных x_{kn} в одномерный массив x_j . При $k = 4$ и $n = 12$ имеем вектор $(x_1, x_2, \dots, x_{48})$. Тогда задача назначения имеет вид:

– целевая функция:

$$C_{\min} = \min \sum_{j=1}^{48} C_j x_j,$$

где C_j – суммарные эксплуатационные затраты для j -го назначения автономных автомобилей.

Соответственно ограничения (3)–(8) также приводятся к одномерной форме.

Решение задачи целочисленного линейного программирования с булевыми переменными выполнялось с использованием пакета Lpsolve 5.5 [18]. Задача имеет 48 неизвестных булевых переменных и 25 ограничений.

В результате решения получен вектор $X = (x_2, x_{10}, x_{11}, x_{13}, x_{27}, x_{30}, x_{40}, x_{41})$ булевых переменных, равных единице. При этом получен минимум эксплуатационных затрат в размере 79 263 руб. Соответствующие назначения раскрыты в табл. 5.

Распределение автономных автомобилей по полям

Номер поля	Комбайны	Автомобили $C_{\min} = 79\,263$ руб.			
		x_j	x_{kn}	Номер автомобиля	Модель
1	CLAAS LEXION 580	x_2	$x_{1,2}$	2	КАМАЗ 6520
		x_{10}	$x_{1,10}$	10	КАМАЗ 65111
		x_{11}	$x_{1,11}$	11	КАМАЗ 65111
2	CLAAS LEXION 580	x_{15}	$x_{2,1}$	1	КАМАЗ 6520
3	TORUM 785	x_{27}	$x_{3,3}$	3	КАМАЗ 6520
		x_{30}	$x_{3,6}$	6	КАМАЗ 65115
4	TORUM 785	x_{40}	$x_{4,4}$	4	КАМАЗ 6520
		x_{41}	$x_{4,5}$	5	КАМАЗ 6520

Коэффициент недогруженности автомобилей был принят $\alpha = 1,25$. Увеличение α до значения 1,4 приводит к непроизводительному перемещению зерна автомобилями (в этом случае обеспечивается только 70 % загруженности кузовов). В то же время при уменьшении α до значения 1,2 решение отсутствует. Это вы-

звано невыполнением ограничения (б) и свидетельствует о превышении количества убираемого комбайнами зерна над вывозимым объемом назначенных автомобилей.

Согласно полученному решению на полях будут эксплуатироваться восемь автомобилей из 12. Оставшиеся четыре автомобиля могут быть использованы следующим образом:

- а) все четыре автомобиля направлены в резерв;
- б) часть автомобилей будет служить для каннибализации, остальные – в резерве.

Заключение

Предложенная постановка задачи оптимизации распределения автотранспортных средств отличается введением ограничений, учитывающих интенсивность работы комбайнов и скорость выгрузки зерна, а также технические характеристики автономных автомобилей. Дальнейшее развитие задачи предполагается провести в направлении решения проблем:

- назначения на одно поле нескольких комбайнов;
- перевода освободившихся автомобилей на другие поля по мере полной уборки полей меньшей площади;
- учета потерь от простоя автомобилей в резерве или в качестве каннибализуемых единиц.

Получаемое решение является основой для разработки имитационных моделей на временных раскрашенных сетях Петри, позволяющих проводить анализ случайных факторов, влияющих на техническое состояние транспортных средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chachada A. et al.* Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture // Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy. IEEE Xplore, 2018.
2. *Sang G.M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F.* Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020), Lecce, Italy. 2020.
3. *Щербakov 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.
4. *Novak P., Kadera P., Wimmer M.* Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
5. *Волхонская Е.Е., Орлов С.П.* Моделирование системы автономных транспортных средств в процессе виртуального запуска в эксплуатацию // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 1. С. 148–153.
6. *Sheng J., Prescott D.* A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 189. P. 67–88.
7. *Волхонская Е.Е., Орлов С.П.* Модель стратегии каннибализации при техническом обслуживании роботизированных автомобилей // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 1. С. 52–56.
8. *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. 2019. Vol. 1399 (044032).

9. Agrotrend. 9 проектов комбайнов-беспилотников. URL: <https://agrotrend.ru/news/11816-9-proektov-kombaynov-bespilotnikov/> (дата обращения 20.04.2023).
10. ТракХолдинг. Самосвал КАМАЗ 65119-7915-5F АРГО (ЕВРО 5). URL: <https://www.truck-holding.ru/catalog/samosval-kamaz-65119-7915-5f.html> (дата обращения 21.04.2023).
11. *Белый В.С.* Оценка экономической эффективности модернизации парка грузовых автомобилей «Камаз-65117» // Вестник МФЮА. 2022. № 1. С. 144–153.
12. *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.
13. *Орлов С.П., Сусарев С.В.* Имитационные модели на сетях Петри для анализа процессов обслуживания и ремонта сложных технических систем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Вып. 30(4). С. 49–75.
14. Ростсельмаш. Зерноуборочные комбайны TORUM 785. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torum-785/> (дата обращения 20.4.2023).
15. CLAAS. Зерноуборочные комбайны LEXION. URL: <https://www.claas.ru/produktsiya/zernouborochnyye-kombajny/lexion-8700-7600#lexion-8000> (дата обращения 20.04.2023).
16. *Ломакин С.* Зерноуборочные комбайны: потребности покупателей, предложения производителей // Аграрное обозрение. 2010. URL: <https://agroobzor.ru/sht/a-143.html> (дата обращения 10.04.2023).
17. КАМАЗ. Продукция. URL: <https://kamaz.ru/production/serial/#samosvaly> (дата обращения 19.04.2023).
18. Lpsolver. Introduction to lp_solve 5.5.2.11. URL: <https://lpsolve.sourceforge.net/5.5> (дата обращения 12.04.2023).

Статья поступила в редакцию 11 мая 2023 г.

THE PROBLEM OF OPTIMAL ASSIGNMENT OF AUTONOMOUS VEHICLES IN PRODUCTION-LOGISTICS SYSTEM

*E.E. Volhonskaya**

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

E-mail: lizaveta5.6@mail.ru

Abstract. *The problem of optimal assignment of autonomous vehicles to ongoing production processes is considered. Virtual testing for predictive maintenance involves the creation of digital twins based on simulation models. The solution of the assignment problem described in the article is the basis for building simulation models on Petri nets to analyze the dynamics of the production- logistics system. The structure of the agro-industrial system of grain harvesting by a complex of combines using autonomous vehicles based on KAMAZ vehicles is considered. Many characteristics of the production-logistics system have been determined: field areas and productivity, productivity of combines, carrying capacity and speed of vehicles, etc. The problem of minimizing operating costs for a complex of vehicles for a given distribution of combines over fields with grain crops has been formulated. The problem relates to integer linear programming with Boolean variables. The difference in the formulation of this problem lies in the formation of a number of restrictions that take into account the main parameters of the production-logistics system. An example of optimizing the distribution of autonomous vehicles for a given number of fields of harvesters processing them is considered. The resulting solution allows you to determine the set of vehicles ready for operation, as well as form a reserve of vehicles to reduce downtime. The solution of the proposed problem can be used as the basis for the structure of the simulation model as part of the digital twin of the production and logistics system. Also, the technique can be used in the current planning of real work of combines and vehicles.*

Keywords: *system analysis, integer linear programming, assignment problem, simulation modeling, autonomous vehicles, combine harvesters.*

REFERENCES

1. *Chachada A. et al.* Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture // Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy. IEEE Xplore, 2018.
2. *Sang G.M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F.* Predictive Maintenance in Industry 4.0 // Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020), Lecce, Italy. 2020.
3. *Shcherbakov M.V., Sai Van K.* Arkhitektura sistemy predskazatel'nogo tekhnicheskogo obsluzhivaniia slozhnykh mnogoobiektnykh sistem v kontseptsii Industrii 4.0 [The architecture of the system of predictive maintenance of complex multi-object systems in the concept of Industry 4.0] // Programmnye produkty i sistemy. 2020. No. 2. Pp. 186–194. (In Russian)
4. *Novak P., Kadera P., Wimmer M.* Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study // 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
5. *Volhonskaia E.E., Orlov S.P.* Modelirovanie sistemy avtonomnykh transportnykh sredstv v protsesse virtual'nogo zapuska v ekspluatatsiiu [Modeling an autonomous vehicle system

* *Elizaveta E. Volhonskaya, Postgraduate Student.*

- during a virtual commissioning process] // *Matematicheskie metody v tekhnologiiakh i tekhnike*. 2021. No. 1. Pp. 148–153. (In Russian)
6. *Sheng J., Prescott D.* A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 189. P. 67–88.
 7. *Volkhonskaia E.E., Orlov S.P.* Model strategii kannibalizatsii pri tekhnicheskoi obsluzhivanii robotizirovannykh avtomobilei [Model of cannibalization strategy in the maintenance of robotic vehicles] // *Sovremennaya nauka: Aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2023. No. 1. Pp. 52–56. (In Russian)
 8. *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*. 2019. Vol. 1399 (044032).
 9. Agrotrend. 9 proektov kombainov-bespilotnikov [9 drone harvester projects]. URL: <https://agrotrend.ru/news/11816-9-proektov-kombaynov-bespilotnikov/> (accessed April 20, 2023). (In Russian)
 10. TrakK Holding. Samosval KAMAZ 65119-7915-5F ARGO (EVRO 5). URL: <https://www.truck-holding.ru/catalog/samosval-kamaz-65119-7915-5f.html> (accessed April 21, 2023). (In Russian)
 11. *Belyi V.S.* Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti modernizatsii parka gruzovykh avtomobilei Kamaz-65117 [Assessment of the economic efficiency of the modernization of the fleet of trucks "Kamaz-65117"] // *Vestnik MFUA*. 2022. No. 1. Pp. 144–153. (In Russian)
 12. *Susarev S.V., Orlov S.P., Bizyukova E.E., Uchaikin R.A.* Primenenie modelei na setiakh Petri pri organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniia avtonomnykh agrotekhnicheskikh transportnykh sredstv [Application of models on Petri nets in the organization of maintenance of autonomous agricultural vehicles] // *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gos. tekhnolog. instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 2021. No. 58(84). P. 98–104. (In Russian)
 13. *Orlov S.P., Susarev S.V.* Imitatsionnye modeli na setiakh Petri dlia analiza protsessov obsluzhivaniia i remonta slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Simulation models on Petri nets for the analysis of maintenance and repair processes of complex technical systems] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2022. 30(4). Pp. 49–75. (In Russian)
 14. Rostselmash. Zernouborochnye kombainy TORUM 785 [Rostselmash. Combine harvesters TORUM 785]. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torum-785> (accessed April 20, 2023). (In Russian).
 15. CLAAS. Zernouborochnye kombainy LEXION [CLAAS. Combine harvesters LEXION]. URL: <https://www.claas.ru/produksiya/zyernouborochnyye-kombajny/lexion-8700-7600#lexion-8000> (accessed April 20, 2023). (In Russian).
 16. *Lomakin S.* Zernouborochnye kombainy: potrebnosti pokupatelei, predlozheniia proizvoditelei [Combine harvesters: customer needs, manufacturers' offers] // *Agrarnoe obozrenie*. 2010. URL: <https://agroobzor.ru/sht/a-143.html> (accessed April 10, 2023). (In Russian)
 17. KAMAZ. Produktsiia [KAMAZ. Products]. URL: <https://kamaz.ru/production/serial/#samosvaly> (accessed April 19, 2023). (In Russian)
 18. Lpsolver. Introduction to lp_solve 5.5.2.11. URL: <https://lpsolve.sourceforge.net/5.5> (accessed April 12, 2023).