

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ПРОЦЕССЕ ВИРТУАЛЬНОГО ЗАПУСКА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ**Е.Е. Волхонская¹, С.П. Орлов²***Самарский государственный технический университет, Россия, Самара,**¹ lizaveta5.6@mail.ru, ² orlovsp1946@gmail.com*

Аннотация. Предложен комплекс системных моделей, используемых при виртуальных испытаниях автономных транспортных средств на этапе виртуального запуска в производство. Комплекс включает две оптимизационные модели и имитационную модель производственно-логистической системы. Сформулированы и решены задачи определения оптимального календарно-сетевого графика агротехнических работ и назначения автономных транспортных средств на работы по заданному графику. Имитационная модель построена на стохастических временных раскрашенных сетях Петри. Проведение виртуальных испытаний на разработанных моделях позволяют сформулировать требования и рекомендации для организации эксплуатации и прогнозного технического обслуживания автономных транспортных средств.

Ключевые слова: имитационное моделирование, виртуальное испытание, автономное транспортное средство, прогнозное техническое обслуживание, стохастическая раскрашенная сеть Петри.

SIMULATION OF AUTONOMOUS VEHICLE SYSTEM IN THE PROCESS OF VIRTUAL COMMISSIONING**Е.Е. Volkhonskaia¹, S.P. Orlov²***Samara State Technical University, Russia, Samara, ¹ lizaveta5.6@mail.ru, ² orlovsp1946@gmail.com*

Abstract. A set of system models is proposed that are used in virtual testing of autonomous vehicles at the stage of virtual commissioning. The complex includes two optimization models and a simulation model of the production-logistics system. The problem of finding the optimal activity progress chart for agricultural works and the task of assigning autonomous vehicles to work according to a given schedule are formulated and solved. The simulation model is designed as a stochastic time colored Petri net. Conducting virtual tests on the developed models makes it possible to formulate requirements and recommendations for organizing the operation and predictive maintenance of autonomous vehicles.

Keywords: simulation, virtual testing, autonomous vehicle, predictive maintenance, stochastic colored Petri net.

Для цитирования: Волхонская Е.Е., Орлов С.П. Моделирование системы автономных транспортных средств в процессе виртуального запуска в эксплуатацию // Математические методы в технологиях и технике. 2023. №1. С. 97-103. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_1_97.

Введение. Реализация концепции «Индустрия 4.0» обусловила активное развитие роботизированных комплексов, в т.ч. и на транспорте. Беспилотные и дистанционно управляемые автономные транспортные средства (АТС) представляют сложную киберфизическую систему, объединяющую как агрегаты и механические узлы, автономные подсистемы управления, контроля и передачи информации, так и диагностические и моделирующие системы на основе «цифровых двойников». Современный подход к проектированию сложных производственных систем базируется на проведении виртуальных испытаний с использованием цифровых двойников. Это позволяет выполнить виртуальный запуск в эксплуатацию создаваемых технических объектов до начала реальной эксплуатации и оценить качество проектных решений. Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) является важнейшим компонентом жизненного цикла АТС. Виртуальные испытания транспортных средств с имитацией различных режимов эксплуатации дают

возможность планировать прогнозное техническое обслуживание в условиях неопределенности [1, 2].

Гибкие производственные системы (FMS) крупных предприятий включают внутреннюю транспортную структуру, которая в совокупности с обрабатывающим оборудованием и складами образует производственно-логистическую систему. Автономные транспортные средства предназначены осуществлять погрузочно-разгрузочные работы и транспортировку грузов в пределах территории предприятия. Ряд производств характеризуется значительной площадью территории, на которой осуществляются производственные работы. К ним можно отнести добычу полезных ископаемых, крупные складские комплексы, агропромышленные предприятия. В этом случае особенно актуальной становится задача организации технического обслуживания и ремонта транспортной техники с учетом значительного расстояния между сервисными центрами и местами выполнения производственных операций.

В статье предлагается подход к моделированию производственно-логистической системы агропромышленного предприятия, использующего парк автономных транспортных средств для проведения уборочных полевых работ. В качестве автономных транспортных средств рассматриваются автономные автомобили (АА) и беспилотные зерноуборочные комбайны (ЗУ) агропромышленного предприятия. Цель моделирования – определить в процессе имитации различных сценариев производственных программ и стратегий ТОиР необходимую номенклатуру автономных транспортных средств, основные параметры оборудования сервисных центров, процедуры выполнения операций технического обслуживания и ремонта.

Исследования проводились в рамках НИР, выполненных СамГТУ совместно с АО «КАМАЗ», по Федеральной целевой программе по созданию робототехнического автомобиля сельскохозяйственного назначения [3].

Производственно-логистическая система агропромышленного предприятия на базе автономных транспортных средств. На рис. 1 представлена структура производственно-логистической системы предприятия, ориентированного на производство зерновых культур. Формальное определение компонентов системы задается следующим образом: $U = \{u_i\}, i = \overline{1, I}$ – парк зерноуборочных комбайнов; $A = \{a_n\}, n = \overline{1, N}$ – парк автономных автомобилей; $P = \{p_k\}, k = \overline{1, K}$ – множество полей, предназначенных для работ по уборке урожая; $Z = \{z_k\}, k = \overline{1, K}$ – множество работ по уборке K полей с зерновыми культурами; $G = (Z, T_Z, V_Z)$ – диаграмма календарно-сетевого графика работ Z , где T_Z – множество заданных длительностей выполнения работ, V_Z – множество дуг между вершинами графа.

В структурной схеме на рис. 1 представлены следующие компоненты системы.

1. Парк автономных автомобилей A , который состоит из трех групп:

- множество активных автомобилей A^A , находящихся в эксплуатации и выполняющих работы Z ,
- 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.

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

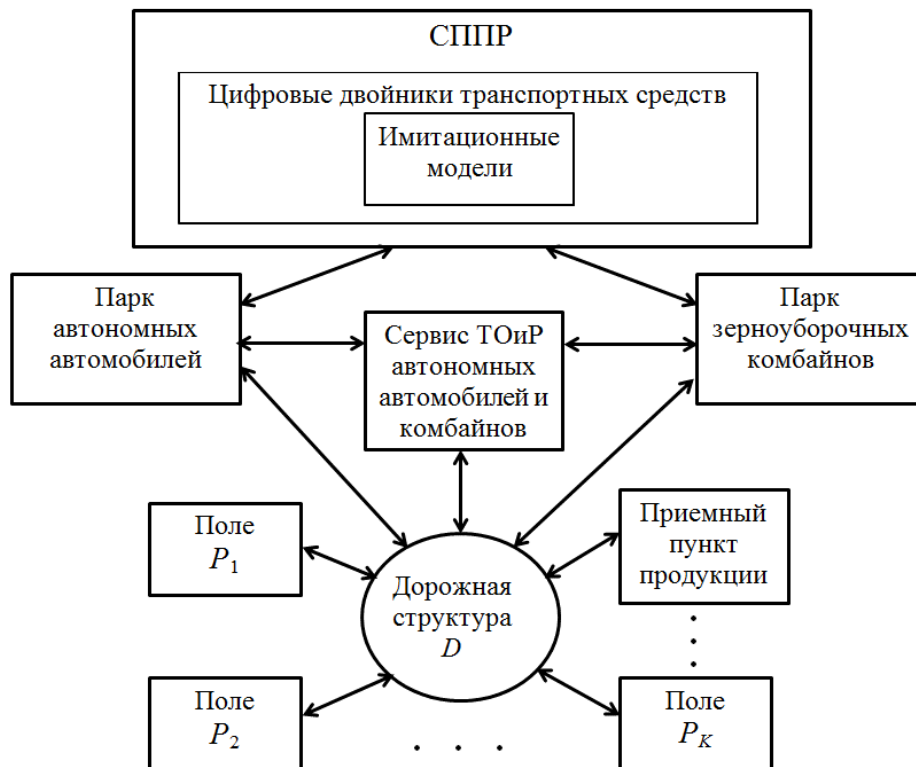


Рис. 1. Структура производственно-логистической системы агропромышленного предприятия

2. Парк зерноуборочных комбайнов U , который организован аналогично парку автономных автомобилей и состоит из групп комбайнов U^A, U^R и U^C .

3. Дорожная структура, представляющая граф D топологии дорог, связывающих поля p_k , приемный пункт продукции и места базирования комбайнов, автономных автомобилей и сервисных центров.

4. Комплекс сервисных центров для технического обслуживания и ремонта, как автономных автомобилей, так и беспилотных зерноуборочных комбайнов. В состав этого комплекса могут входить мобильные сервисы для обслуживания транспортных средств непосредственно на полях или маршрутах.

5. Система поддержки принятия решений СППР по организации работ, распределения ТС и их технического обслуживания, которая базируется на цифровых двойниках ТС и имитационных моделях производственных процессов.

В предлагаемой системе ТОиР используется стратегия каннибализации, заключающаяся в выделении множества полностью исправных транспортных средств, не использующихся при этом в эксплуатации. При необходимости замены агрегатов и узлов АТС и при отсутствии запасных частей на складе производится снятие необходимого агрегата с каннибализируемого автомобиля или комбайна и установка на обслуживаемое транспортное средство. Такая стратегия успешно использовалась в обслуживании авиационной техники. В работе [4] описаны имитационные модели процесса ТО с каннибализацией. Использование стратегии каннибализации становится актуальным при возрастании неопределенности с организацией контрактов и поставок на запасные части импортных моделей транспортных средств или их комплектующих.

Системные модели и задачи управления комплексом автономных транспортных средств. Методика базируется на оптимизационно-имитационном подходе, применяемом при управлении развитием сложного комплекса промышленных производств [5]. Согласно этому подходу, на первом этапе формализуются и решаются оптимизационные задачи построения статической

структуры исследуемой системы. На втором этапе создаются имитационные модели для изучения процессов, выполняющихся в системе. В случае несоответствия полученного решения требованиям, предъявляемым к системе, проводится коррекция параметров как оптимизационных, так и имитационных моделей. В результате итерационного процесса моделирования будет получено решение, на основе которого проектируется система технического обслуживания.

Для построения цифрового двойника используем следующий набор системных моделей.

1. Оптимизационная задача составления расписания работ Z на полях P . Результатом решения является календарно-сетевой график G .

Ключевые показатели эффективности:

а) целевая функция минимизации суммарного времени простоев зерноуборочных комбайнов:

$$\Delta T_W = \min\{\sum_i \sum_k \Delta T_{ik}^W\}, \quad (1)$$

где k и i – индексы полевых работ и комбайнов, соответственно;

ΔT_{ik}^W – время простоя при выполнении i -м комбайном работы z_k на поле p_k ;

б) минимизация максимального времени T_Z выполнения всех работ Z сводится к поиску критического пути на графе G :

$$\min\{T_Z = y_k - y_1\}, \quad (2)$$

$$y_r - y_k \geq t_{kr}, \quad \forall (k, r) \in V_Z, \quad (3)$$

где V_Z – множество дуг между работами, y_k – переменные, которые трактуются как ранние сроки завершения работ z_k , отсчитываемые от некоторого момента времени, общего для всех узлов сетевого графика G , t_{kr} – время выполнения операций.

Каждое ограничение (3) двойственной задачи связано с определённой работой, ограничения устанавливают отношения предшествования между различными операциями. Решение задач (1) и (2) ÷ (3) проводится с учетом плановых заданий и имеющихся ресурсов.

2. Задача оптимального назначения комбайнов U и автономных автомобилей A для выполнения работ на полях P в соответствии с G .

Рассматривается минимизация стоимости работ в производственно-логистической системе. Булеву переменную оптимизационной задачи определим, как:

$$x_{kin} = \begin{cases} 1 - \text{если для выполнения } k\text{-й работы назначены} \\ i - \text{комбайн и } n\text{-й автономный автомобиль,} \\ 0 - \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Целевая функция:

$$C = \min\{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N c_{kin} x_{kin}\}, \quad (4)$$

где c_{kin} – стоимости выполнения операций комбайнами и автономными ТС.

Ограничения задачи имеют вид:

а) назначение комбайнов, не меньше заданного числа β_k , на работу на заданное поле p_k :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N x_{kin} \geq \beta_k, \quad \forall n; k = \overline{1, K}, \quad (5)$$

б) время простоев транспортных средств должно быть меньше допустимого значения t_W :

$$|t_{ik}^R - t_{nk}^A| \leq t^W, \quad \forall i, n; k = \overline{1, K}, \quad (6)$$

где t_{ik}^R – время работы комбайна до выгрузки зерна из бункера, t_{nk}^A – время транспортировки зерна на приемный пункт и возвращение ТС на поле k ;

в) условие соответствия загрузочных объемов комбайнов и автономных автомобилей:

$$V_i^U \leq V_n^A, \exists(i, n)(x_{kin} = 1), k = \overline{1, K}, \quad (7)$$

где V_i^U – объем бункера зерноуборочного комбайна, V_n^A – объем кузова автономного автомобиля;

г) технические характеристики комбайнов и автомобилей должны лежать в допустимых границах:

$$q_{Um}^{min} \leq q_m^U \leq q_{Um}^{max}, m = \overline{1, M}, \quad (8)$$

$$q_{Al}^{min} \leq q_l^A \leq q_{Al}^{max}, l = \overline{1, L}, \quad (9)$$

где вектор $Q_i^U = (q_1^U, \dots, q_M^U)$ и вектор $Q_n^A = (q_1^A, \dots, q_L^A)$ – значения параметров для комбайнов и автомобилей, соответственно;

д) ограничения на доступные ресурсы:

$$\sum_{i=1}^I x_{kin} \leq B_U, \forall k, n, \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{kin} \leq B_A, \forall k, i, \quad (11)$$

где $B_U = |U| - |U^R| - |U^C|$ – количество комбайнов и $B_A = |A| - |A^R| - |A^C|$ – количество автономных автомобилей, доступных к вводу в эксплуатацию, которые зависят от задаваемых чисел резервных и каннибализируемых транспортных средств.

Условие (7) обеспечивает полную загрузку автомобилей. Если при этом в бункере комбайна остается зерно, то это не прерывает его работу до следующего прибытия автономного автомобиля. При несоблюдении условий (7) автомобили будут недогружены, что приведет к снижению средней эффективности логистических операций. В результате решения оптимизационных задач (1) ÷ (11) получаем булеву матрицу назначений $\theta(U, A, G)$ автономных автомобилей и комбайнов 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 неопределённости внешней среды и вероятностного характера технических состояний транспортных средств. Поэтому следующий этап виртуальных испытаний заключается в использовании имитационных моделей.

3. Иерархическая имитационная модель. Задача имитации заключается в исследовании динамики производственного процесса уборки урожая, транспортировки и технического обслуживания и ремонта комбайнов и автономных автомобилей. В работе использована иерархическая модель в виде стохастической временной раскрашенной сети Петри, построенная по методике, описанной в [6, 7] (рис. 2).

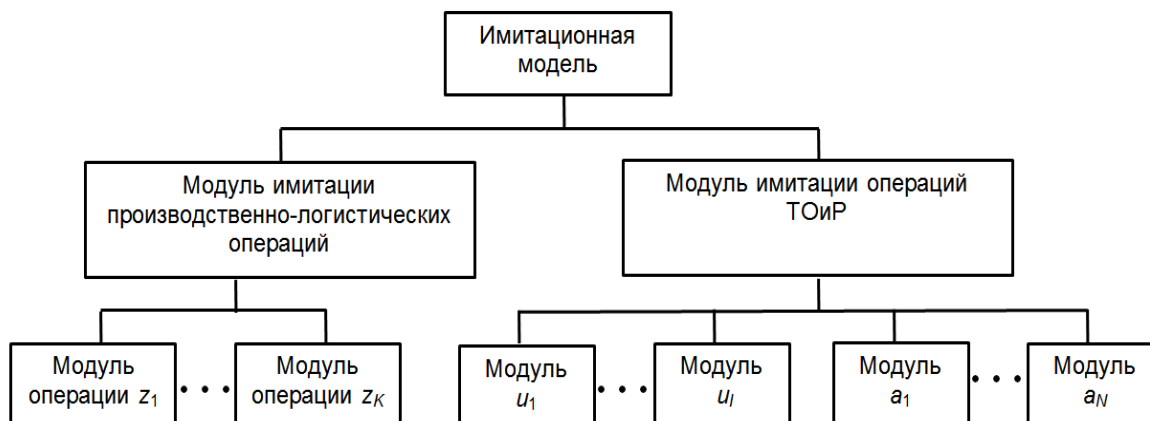


Рис. 3. Иерархическая имитационная модель

Уровни иерархии модели соответствуют детализации анализируемого технологического процесса. На верхнем уровне модели имитируется процесс уборки

зерна и передвижение АА по маршрутам. На нижних уровнях в модели представлены модули, имитирующие процессы появления отказов в отдельных транспортных средствах и процессы прогнозного технического обслуживания. Виртуальные испытания на такой модели позволяют определить оптимальную стратегию технического обслуживания АТС.

Общая схема виртуальных испытаний автономных транспортных средств и исследования системы технического обслуживания приведена на рис. 3.

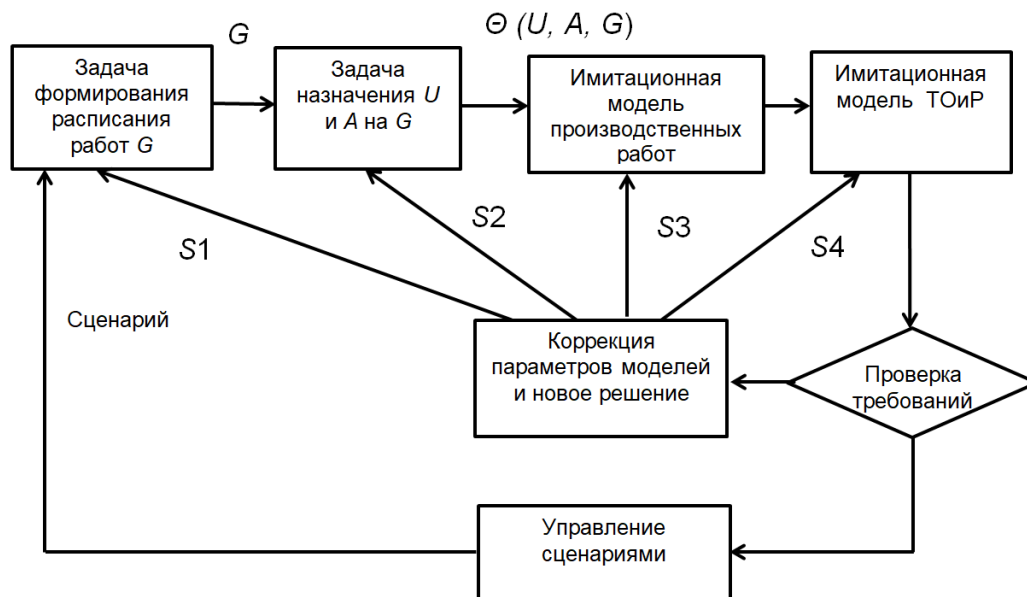


Рис. 3. Системные модели при виртуальных испытаниях

Корректирующие воздействия $S1 \div S4$ — это векторы, элементы которых используются для изменения настроек соответствующих моделей:

- 1) $S1$ определяет новые временные параметры для задачи оптимизации календарно-сетевого графика;
- 2) $S2$ задает новые условия для оптимизационной задачи назначения АТС (изменение числа резервных и каннибализируемых транспортных средств, изменение допустимых технических параметров комбайнов и автомобилей);
- 3) $S3$ меняет сроки работ, среднюю производительность и среднюю скорость транспортных средств;
- 4) $S4$ задает параметры вероятностных законов процессов износа агрегатов и событий отказов транспортных средств.

В блоке коррекции решения принимаются при участии группы аналитиков — специалистов по агротехнологиям и транспортным системам.

Исследования на комплексе системных моделей проводились для трех сценариев:

- 1) сценарий 1 — нормальные условия эксплуатации ЗУ и АА;
- 2) сценарий 2 — условия эксплуатации повышенной сложности (часть дорожного покрытия имеет повреждения, осадки);
- 3) сценарий 3 — сложные условия эксплуатации (большая часть дорог имеет повреждения, плохие погодные условия).

Парк автономных транспортных средств формируется из беспилотных зерноуборочных комбайнов модели TORUM 785 с объемом бункера 12 000 л и роботизированных автомобилей на базе шасси КАМАЗ 65119 с объемом кузова от 10 000 л до 18 000 л.

Выполнение статистического эксперимента на предлагаемых моделях позволяет оценить стоимость затрат и производительность транспортной системы, а также параметры надежности отдельных транспортных средств: наработка на отказ, остаточный ресурс, ремонтпригодность, вероятность появления различных отказов и т.д. В результате виртуальных испытаний были получены рекомендации по организации системы технического обслуживания и ремонта автономных транспортных средств агротехнического назначения.

Заключение. Предлагаемый подход к организации виртуальных испытаний на основе разработанных системных моделей является новым и позволяет провести всесторонний анализ различных аспектов работы производственно-логистической системы. Комплекс системных моделей обладает гибкой структурой, что обеспечивает их адекватность при имитации различных условий эксплуатации АТС. Дальнейшие направления исследований связаны с разработкой интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении автономными транспортными средствами в условиях реальной эксплуатации.

Библиографический список

1. Щербаков М.В., Сай Ван К. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 186-194.
2. 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.
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. Самара: ООО "Офорт". 2019. Т. 2. С. 107-110.
4. Sheng J. Prescott D. A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization// Reliab. Eng. Syst. Saf. 2019. Vol. 189, pp. 67-88.
5. Акинфиев В.К., Цвиркун А.Д. Оптимизационно-имитационные методы в задачах управления развитием крупномасштабных систем // В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 5690-5696.
6. Orlov S.P., Susarev S.V., Uchaikin R.A. Application of Hierarchical Colored Petri Nets for Technological Facilities' Maintenance Process Evaluation//Applied Sciences. 2021. Vol. 11, 5100, pp. 1-28.
7. Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А. Моделирование процессов прогнозного технического обслуживания роботизированных агротехнических автомобилей // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 1. С. 148-153.