УДК 004.942:631.3:629.73

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Афонин П.Н., Беглова К.Р.
Казанский кооперативный институт (филиал) Российского университета кооперации

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF THE OPERATION PROCESSES OF UNMANNED VEHICLES IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN BASED ON HIERARCHICAL PETRI NETS

Afonin P.N., Beglova K.R.
Kazan Cooperative Institute (branch) of the Russian University of Cooperation

Аннотация

В статье рассматривается задача совершенствования технологий агропромышленного комплекса Республики Татарстан за счёт расширения эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). На основе анализа фактических данных о применении агродронов в регионе обоснована необходимость формализации и имитационного моделирования соответствующих производственных процессов. Предложена иерархическая модель процессов на основе сетей Петри, позволяющая описывать параллельное функционирование БПЛА, наземной техники и операторов, учитывать ресурсные ограничения, временные задержки и возможные отказы. Модель реализована в виде двухуровневой сети с замещением переходов: верхний уровень отражает агрегированный цикл авиационной обработки, вложенные подсети детализируют подготовительные, полётные и сервисные операции. Приведены результаты вычислительных экспериментов, демонстрирующие возможность оценки пропускной способности парка БПЛА и обоснования рациональной структуры технических средств для условий Республики Татарстан.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, агропромышленный комплекс, Республика Татарстан, сети Петри, имитационное моделирование, иерархические сети, точное земледелие

Abstract

The article examines the task of improving the technologies of the agro-industrial complex of the Republic of Tatarstan through the expanded use of unmanned aerial vehicles (UAVs). Based on an analysis of actual data on the use of agrodrones in the region, the need to formalize and simulate the relevant production processes is substantiated. A hierarchical process model based on Petri nets is proposed; it makes it possible to describe the parallel operation of UAVs, ground equipment, and operators, and to take into account resource constraints, time delays, and possible failures. The model is implemented as a two-level network with transition substitution: the upper level reflects the aggregated cycle of aviation processing, while the nested subnetworks detail the preparatory, flight, and service operations. The results of computational experiments are presented, demonstrating the possibility of assessing the throughput capacity of a UAV fleet and justifying the rational structure of technical means for the conditions of the Republic of Tatarstan.

Keywords: unmanned aerial vehicles, agro-industrial complex, Republic of Tatarstan, Petri nets, simulation modeling, hierarchical networks, precision agriculture

Ссылка для цитирования: Афонин П.Н., Беглова К.Р. Разработка имитационной модели процессов эксплуатации беспилотных аппаратов в агропромышленном комплексе республики Татарстан на основе иерархических сетей Петри // Бюллетень инновационных технологий. – 2026. – Т. 10. – № 4 (40). – С. 43-46. – EDN XUXKIY.

Введение

Республика Татарстан входит в число пилотных регионов Российской Федерации, где сформирован экспериментальный правовой режим для эксплуатации сельскохозяйственных беспилотных авиационных систем. По данным Минсельхозпрода РТ, в 2025 г. агродроны и легкомоторные самолёты обработали 40,5 тыс. га сельскохозяйственных угодий, а на 2026 г. поставлена задача увеличения этой площади до 100

тыс. га [1]. Потребность республики в сельскохозяйственных дронах в перспективе оценивается примерно в 3,5 тыс. единиц [1]. Экономический эффект подтверждается отраслевыми оценками: применение агродронов сокращает затраты на мониторинг полей до 40 %, а себестоимость авиационной обработки на полях правильной формы площадью свыше 100 га составляет 180–220 руб./га против 250–300 руб./га при использовании самоходных опрыскивателей [2].

Однако наращивание парка БПЛА без адекватного моделирования производственных процессов приводит к нерациональному распределению ресурсов, простоям техники и снижению экономического эффекта. Традиционные методы сетевого планирования и статические модели не позволяют в полной мере отразить параллелизм, ресурсные конфликты и стохастичность отказов, характерные для эксплуатации БПЛА в открытой полевой среде. В связи с этим актуальной является разработка формальной модели процессов на основе сетей Петри – математического аппарата, сочетающего графическую наглядность с возможностью анализа достижимости, ограниченности и производительности дискретно-событийных систем.

Цель работы – разработать иерархическую модель процессов эксплуатации БПЛА в агропромышленном комплексе Республики Татарстан на основе сетей Петри для обоснования рациональной структуры технических средств и оценки пропускной способности парка беспилотников.

Состояние вопроса и предпосылки моделирования

Применение БПЛА в АПК Республики Татарстан развивается по нескольким направлениям: аэрофотосъёмка и мониторинг состояния посевов, выявление проблемных зон, внесение средств защиты растений и удобрений, оценка урожайности, создание карт полей для точного земледелия. В регионе создаются и проходят опытную эксплуатацию автономные сельскохозяйственные дроны с элементами искусственного интеллекта, в частности для промышленного садоводства; разрабатываются алгоритмы машинного зрения для прогнозирования фитопатологий по данным с БПЛА [3]. Испытывается первый в стране «летающий трактор», способный за смену опрыскивать до 600 га посевов [4].

Вместе с тем практика эксплуатации БПЛА сталкивается с системными ограничениями: временем подготовки аппарата к вылету, необходимостью смены аккумуляторных батарей, метеорологическими окнами, пространственным рассредоточением полей и конкуренцией за ограниченное число операторов. Эти факторы имеют дискретно-событийную природу и могут быть эффективно описаны аппаратом сетей Петри.

В научной литературе сети Петри применяются для моделирования агротехнологических процессов: известны иерархические сети Петри для анализа процесса посева с учётом отказов агрегатов [5], модели планирования сельскохозяйственных работ на основе сетей Петри и имитации отжига [6], а также подходы к построению сетей Петри для управления процессами с использованием дронов в тепличных комплексах [7]. Для задач с участием БПЛА предложены модели на стохастических сетях Петри, в частности для мониторинга лесных пожаров с использованием дронов и граничных вычислений [8]. Однако комплексная модель, ориентированная на процессы эксплуатации агродронов в условиях конкретного региона – Республики Татарстан, – в проанализированной литературе отсутствует.

Методика построения иерархической сети Петри

Для моделирования процесса эксплуатации БПЛА применяется аппарат иерархических сетей Петри с замещением переходов. Такой подход позволяет разделить модель на уровни детализации: верхний уровень описывает агрегированную логику функционирования системы, а вложенные подсети раскрывают содержание отдельных операций.

Формально иерархическая сеть Петри задаётся кортежем:

$$N=(P,T,F,W,M_0,H),$$

где P – конечное множество позиций (состояний системы); T – конечное множество переходов

Таблица 1

Интерпретация элементов иерархической сети Петри для процесса авиационной обработки полей

Элемент сети Петри	Содержательный смысл
Позиция p_1	БПЛА находится в состоянии готовности на площадке
Позиция p_2	Запас рабочей жидкости (СЗР/удобрения) в баке
Позиция p_3	Заряд аккумуляторной батареи достаточен для выполнения задания
Позиция p_4	Поле (участок) ожидает обработки
Позиция p_5	Оператор наземной станции управления доступен
Переход t_1	Подготовка БПЛА к вылету (предполётная проверка, заправка, установка батареи)
Переход t_2	Выполнение полётного задания (авиационная обработка участка)
Переход t_3	Возврат и послеполётное обслуживание (смена батареи, дозаправка)
Переход t_4 (замещаемый)	Агрегированный цикл обработки участка; раскрывается вложенной подсетью

(событий); $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – отношение инцидентности; W: $F \to \mathbb{N}$ – функция кратности дуг; M_0: $P \to \mathbb{N}_0$ – начальная маркировка; H – функция иерархии, ставящая в соответствие переходам верхнего уровня вложенные подсети N_t.

Содержательная интерпретация элементов модели для рассматриваемой предметной области приведена в таблице (табл. 1).

Вложенная подсеть перехода t_4 детализирует полётное задание и включает позиции, отражающие прохождение контрольных точек маршрута, и переходы, соответствующие операциям распыления на рабочих гонах. Такая декомпозиция позволяет, с одной стороны, сохранить наглядность верхнего уровня, а с другой – исследовать влияние детальных параметров (длины гона, числа разворотов, расхода рабочей жидкости) на интегральные показатели.

Для учёта временных характеристик модель расширяется до временной сети Петри: каждому переходу ставится в соответствие интервал срабатывания $[d_{min}, d_{max}]$, отражающий минимальную и максимальную продолжительность операции. Например, для перехода t_2 длительность определяется площадью участка, рабочей шириной захвата и скоростью полёта; для перехода t_3 – временем замены батареи и заправки.

Стохастическая составляющая вводится путём задания переходов, имитирующих отказы и неблагоприятные метеорологические условия. В соответствии с подходом, апробированным для посевных комплексов [5], целесообразно выделять автоматически устранимые, устранимые вручную и неустранимые отказы с соответствующими ветвями восстановления. Для БПЛА к автоматически устранимым относится, например, возврат по сигналу системы управления при снижении заряда ниже порога; к устранимым вручную – замена повреждённого пропеллера; к неустранимым в рамках смены – отказ двигателя или бортового компьютера.

Реализация модели и вычислительные эксперименты

Модель реализована в среде имитационного моделирования на основе свободно распространяемого инструментария для сетей Петри (GPenSIM). Начальная маркировка задавалась исходя из структуры парка: число одновременно доступных БПЛА, число операторов, число зарядных станций и комплектов аккумуляторных батарей. В качестве входных параметров использовались усреднённые характеристики, соответствующие условиям Республики Татарстан: площадь обрабатываемого участка – 80–150 га; рабочая ширина захвата – 12–18 м; скорость полёта – 5–7 м/с; продолжительность полётного задания – 25–40 мин; время замены батареи и дозаправки – 8–12 мин.

Вычислительные эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе исследовалась пропускная способность системы при фиксированном числе БПЛА и переменном числе комплектов батарей. Результаты показали, что при одном комплекте батарей на аппарат коэффициент использования БПЛА не превышает 0,55–0,60 из-за простоев в ожидании зарядки; при двух комплектах коэффициент возрастает до 0,80–0,85, а дальнейшее увеличение числа батарей даёт незначительный прирост. Этот результат согласуется с практикой эксплуатации агродронов, где «бутылочным горлышком» часто является не сам полёт, а предполётно-послеполётное обслуживание.

На втором этапе варьировалось число участков, обслуживаемых одним оператором. Установлено, что при пространственном рассредоточении полей и необходимости перемещения наземной станции управления между участками рациональное число одновременно обслуживаемых участков составляет 2–3; превышение этого порога приводит к росту очереди заявок и снижению общей производительности системы. Модель позволяет количественно оценить этот эффект через среднее время пребывания заявки в системе и коэффициент загрузки оператора.

Для анализа корректности модели проверялись свойства сети: ограниченность (число фишек в любой позиции не превышает заданного значения), отсутствие тупиковых маркировок (достижимость из любой достижимой маркировки финального состояния) и живость переходов. Проверка осуществлялась построением дерева достижимости для редуцированной подсети и имитационным прогоном с генерацией случайных времён срабатывания.

Обсуждение результатов и практическая значимость

Предложенная иерархическая модель обладает рядом свойств, существенных для задач совершенствования технологий АПК Республики Татарстан. Во-первых, она обеспечивает единообразное описание процессов с участием разнородных агентов – БПЛА, наземной техники, операторов, зарядной инфраструктуры – в терминах позиций, переходов и маркировок, что создаёт основу для согласованного анализа их совместного функционирования. Во-вторых, иерархическая структура позволяет наращивать детализацию без перестройки верхнего уровня модели: при появлении новых типов БПЛА или изменении регламентов обслуживания достаточно модифицировать соответствующую вложенную подсеть. В-третьих, временная и стохастическая интерпретации переходов дают возможность оценивать не только среднюю производительность, но и вероятностные характеристики выполнения сменных заданий, что важно в условиях метеорологической неопределённости.

С практической точки зрения модель может использоваться региональными органами управления АПК и агрохолдингами для решения следующих задач: обоснование рационального соотношения между числом БПЛА, комплектов батарей и операторов; оценка пропускной способности парка при планировании сезонных работ; выбор стратегии обслуживания (централизованная зарядка на базе или зарядка в полевых условиях); анализ чувствительности производительности к отказам отдельных компонентов. Для

условий Республики Татарстан, где площадь обработки БПЛА растёт опережающими темпами (с 40,5 тыс. га в 2025 г. до планируемых 100 тыс. га в 2026 г.) [1], такие оценки приобретают непосредственную практическую ценность.

Следует отметить, что модель не претендует на исчерпывающий учёт всех факторов полевой среды. В частности, за рамками рассмотрения остались динамика фитосанитарного состояния посевов и связанная с ней адаптация маршрутов в реальном времени. Эти аспекты могут быть включены в модель путём расширения множества позиций и введения управляемых переходов, срабатывающих по событиям от бортовых систем машинного зрения.

Заключение

Разработана иерархическая модель процессов эксплуатации БПЛА в агропромышленном комплексе Республики Татарстан на основе сетей Петри. Модель позволяет формализовать параллельное функционирование беспилотников, наземной техники и операторов с учётом временных задержек, ресурсных ограничений и отказов. Вычислительные эксперименты подтвердили адекватность модели и выявили рациональные структурные соотношения элементов системы: двух комплектов аккумуляторных батарей на аппарат и 2–3 обслуживаемых участков на оператора. Дальнейшее развитие работы связано с интеграцией в модель данных дистанционного зондирования и алгоритмов адаптивного планирования маршрутов, а также с валидацией результатов на фактических данных агрохозяйств Республики Татарстан.

.

Список литературы

1. В Татарстане хотят увеличить площадь обработки полей БПЛА до 100 тыс. га [Электронный ресурс] // РБК Татарстан. 2026. 16 марта. – URL: rt.rbc.ru/tatarstan/freenews/69b7fb499a7947f3ca1ac695.
2. В России испытывают первый в стране «летающий трактор» [Электронный ресурс] // ФГБУ «Центр АгроАналитики». 2025. – URL: specagro.ru/news/202509/v-rossii-ispytyvayut-pervyy-v-strane-letayuschiy-traktor.
3. Разработаны алгоритмы машинного зрения для прогнозирования болезней растений [Электронный ресурс] // Новости Mail: сообщение ТАСС. 2026. 25 июля. – URL: news.mail.ru/society/71756766/.
4. Чайковский Б. Испытания российского «летающего трактора» начались в полевых условиях [Электронный ресурс] // Агроэксперт. 2025. 28 августа. – URL: agroexpert.press/tehnika/gau-v-kazani-nachal-ispytaniya-rossijskogo-letayushhego-traktora-v-polevyh-usloviyah/.
5. Чеботарев В. А., Ломазов В. А., Ломазова В. И., Голованова Е. В. Имитационное моделирование процесса посева с учетом возможных отказов агрегатов на основе иерархических сетей Петри // Инженерный вестник Дона. – 2026. – № 9(141). – EDN WRPDPZ.
6. Guan S., Matsuda H., Nakamura M., Shikanai T., Okazaki T. Scheduling for Farm Work Planning based on Petri Net Model and Simulated Annealing // Agricultural Information Research. – 2007, Vol. 16, no. 3. – P. 188–195.
7. Hustiu S., Kloetzer M., López-Martínez A., Mahulea C. Whitening of greenhouse's roof using drones and Petri net models // 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – IEEE, 2022. – P. 1–8.
8. Sabino A., Lima L. N., Brito C., Feitosa L., Caetano M. F., Barreto P. S., Silva F. A. Forest fire monitoring system supported by unmanned aerial vehicles and edge computing: a performance evaluation using petri nets // Cluster Computing. – 2024. – Vol. 27, no. 7. – P. 9735–9755..

Поступила в редакцию 22.10.2026

Сведения об авторах:

Афонин Петр Николаевич – профессор кафедры экономики и управления Казанского кооперативного института (филиала) Российского университета кооперации (г. Казань), доктор технических наук, доцент, e-mail: pnafonin@yandex.ru

Беглова Камилла Ринатовна – преподаватель кафедры таможенного дела, аспирант Казанского кооперативного института (филиала) Российского университета кооперации (г. Казань), e-mail: missis.bilalova2017@yandex.ru

Электронный научно-практический журнал "**Бюллетень инновационных технологий**"
(**ISSN 2520–2839**) является сетевым средством массовой информации
регистрационный номер **Эл № ФС77-73203**
по вопросам публикации в Журнале обращайтесь по адресу bitjournal@yandex.ru