

УДК: 629.734/.735

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>

GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов

Д. И. Ковалев^{1,2}, В. А. Подоплелова^{1,3}, Т. П. Мансурова²

¹Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

²Красноярский краевой Дом науки и техники РосСНИО, Красноярск, Россия

³Сочинский государственный университет, Сочи, Россия

Аннотация. В статье рассматривается стохастический анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов на современном этапе развития агросферы, связанный с применением технологий точного земледелия. Развитие технологии точного земледелия требует более высокого уровня технического обеспечения, основанного на применении беспилотных авиационных систем. Транспортный технологический цикл БПЛА по дифференцированному внесению пестицидов и удобрений соответствует заданной программе обработки поля и описывается стохастической GERT-моделью. В работе предлагается рассматривать в качестве критерия при рисковом анализе транспортных технологических циклов БПЛА потерю производительности БПЛА по времени. Выполнен GERT-анализ количественной характеристики рисков транспортных единиц БПЛА, как локального критерия прогнозируемой величины простоев и убытков. Предложена новая методика расчета количественных значений риска простоев БПЛА, как основного звена системы точного земледелия в одном транспортном технологическом цикле на основе процедур стохастических графов. Данный подход обладает универсальностью и подходит для БПЛА любых типов и любой грузоподъемности.

Ключевые слова: анализ транспортных циклов, беспилотный летательный аппарат, GERT-анализ, методика расчета, анализ риска, технология точного земледелия.

Для цитирования: Ковалев, Д. И., Подоплелова, В. А., & Мансурова, Т. П. (2022). GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов. Информатика. Экономика. Управление - Informatics. Economics. Management, 1(1), 0110–0120. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>

GERT-analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles

D. I. Kovalev^{1,2}, V. A. Podoplelova³, T. P. Mansurova²

¹*Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia*

²*Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, Krasnoyarsk, Russia*

³*Sochi State University, Sochi, Russia*

Abstract. The article discusses a stochastic analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles at the present stage of development of the agrosphere, associated with the use of precision farming technologies. The development of precision farming technology requires a higher level of technical support based on the use of unmanned aerial systems. The transport technological cycle of the UAV for the differentiated application of pesticides and fertilizers corresponds to a given field treatment program and is described by a stochastic GERT model. The paper proposes to consider the loss of UAV performance over time as a criterion in the risk analysis of UAV transport technological cycles. GERT-analysis of the quantitative characteristics of the risks of UAV transport units was performed as a local criterion for the predicted amount of downtime and losses. A new method for calculating the quantitative values of the risk of UAV downtime, as the main link in the precision farming system in one transport technological cycle, is proposed based on the procedures of stochastic graphs. This approach is universal and suitable for UAVs of any type and any payload.

Keywords: transport cycle analysis, unmanned aerial vehicle, GERT-analysis, calculation method, risk analysis, precision farming technology.

For citation: Kovalev D. I., Podoplelova V. A., & Mansurova T. P. (2022). GERT-analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles. Informatics. Economics. Management, 1(1), 0110–0120. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность управления транспортными технологическими циклами беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в значительной степени зависит от меры полноты анализа производственных ситуаций в системах точного земледелия [1-10]. Вследствие вероятностного характера большинства параметров транспортного технологического процесса, качественная и количественная оценка эффективности функционирования БПЛА без привлечения формальных методов затруднена [11-13].

Процесс погрузки-разгрузки БПЛА и выполнения полетных заданий может быть описан с помощью стохастических сетей. В работах [14, 15] предложены формальные методы анализа для оптимизации функционирования транспортных средств. Однако практическая необходимость качественного улучшения функционирования транспортной технологической сети БПЛА требует разработки новых эффективных математических методов для выполнения анализа реализации циклических транспортных технологических процессов.

Рисковый анализ является одним из методов нахождения «узких» мест в цикле технологических операций, внутри которых следует искать оптимальный вариант управляющих воздействий [7].

В качестве критерия при рисковом анализе транспортных технологических циклов БПЛА выступает потеря производительности БПЛА по времени. В данной работе предлагается метод определения количественной характеристики рисков транспортных единиц БПЛА, как локального критерия прогнозируемой величины простоев и убытков.

В работе предложена методика расчета количественных значений риска простоев БПЛА, как основного звена системы точного земледелия в одном транспортном технологическом цикле на основе процедур стохастических графов [16, 17].

Количественный анализ риска простоев в транспортном технологическом цикле БПЛА является необходимым условием внедрения беспилотных летательных аппаратов в сельское хозяйство, так как позволяет сократить нецелевой расход химической жидкости путём точечного внесения пестицидов и удобрений, что в свою очередь приведет к увеличению урожая, тем самым решая проблему издержек сельскохозяйственного производства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В классическом определении риск R понимается как скалярное произведение двух векторов: вектора величин стоимостных оценок потерь A_i , $i=1,2,\dots,n$, и вектора вероятностей их реализации p_i , $i=1,2,\dots,n$ при реализации принятого решения

$$R = \sum_{i=1}^n A_i p_i. \quad (1)$$

Однако для рискового анализа транспортных технологических циклов БПЛА, представленных сетевыми структурами, данный подход не применим. Адекватной альтернативой является трактовка риска как произведения математического ожидания случайной величины неблагоприятного события на величину стоимостной оценки события

$$R = A_i E [x_i], \quad (2)$$

где $E [x_i]$ – это математическое ожидание величины x_i . Такое определение риска подходит для применения в сетевых математических моделях со стохастической структурой и позволит оценивать численно величину риска.

В нашем случае авиатранспортным элементом системы точного земледелия является БПЛА, транспортирующий удобрения от наземных пунктов загрузки (бункеров заправки) до обрабатываемых полей. В обратном направлении БПЛА движется «порожняком», а в направлении обрабатываемых полей – загруженным. Выбор места загрузки БПЛА определяется диспетчерской службой или жестким закреплением БПЛА за одним из наземных (мобильных) пунктов. В рамках рассматриваемой системы точного земледелия используются, кроме того, наземные мобильные станции D-RTK 2, которые обеспечивают позиционирование летательного аппарата с точностью до сантиметра. Используются сигналы от спутников GPS, ГЛОНАСС и Galileo. Информация передается на дрон по защищенному беспроводному каналу.

Время продолжительности единичного транспортного цикла БПЛА T представляет собой сумму

$$T = t_1 + t_2 + t_3 \quad (3)$$

где t_1 - время загрузки БПЛА; t_2 - время движения БПЛА к пункту обработки поля; t_3 - время обработки поля.

Слагаемые равенства (3) определяются аналитически и зависят от характеристик БПЛА, который используется для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений по заданной программе обработки поля, а также от наземной инфраструктуры. В этом случае мы можем получить аналитическое выражение времени продолжительности единичного транспортного технологического цикла БПЛА. Полученное выражение является детерминированным выражением и не учитывает непроизводительных простоев БПЛА при выполнении технологических процессов. Простой объекта возникают в местах погрузки, в пунктах обработки полей и по ходу движения (в случае изменения траектории полета, неисправностей бортового и наземного оборудования и пр.). Таким образом в выражение (3), вместо введения некоторых коэффициентов неравномерности, можно добавить слагаемое простоев t_d , значение которого для каждого этапа транспортных технологических циклов БПЛА может быть вычислено достаточно точно.

Технологическая операция каждого цикла БПЛА может быть представлена графически в виде направленного графа. При этом множество дуг графа представляют собой процессы, а множество узлов – состояния элемента. Исходя из того, что транспортный технологический процесс имеет четкую последовательность операций, то

и последовательность простоев в транспортном технологическом цикле БПЛА следует в соответствии логикой процесса. Так как риск по дугам графа обладает свойством аддитивности, то, следовательно, к построенному графу можно применить процедуры GERT-моделирования для выявления рисков, связанных с выполнением всей сети. Таким образом, GERT-сети описывают графы со стохастической структурой эволюции и стохастической длительностью операций. Временной GERT-анализ включает в себя выявление самого раннего и самого позднего времени возникновения отдельных событий транспортного технологического цикла БПЛА, помимо вычисления (распределения) продолжительности всего цикла. Для GERT-сетей так же вводятся понятия ранней и поздней активации узлов. Их значения, однако, отличаются от значений для CPM и PERT (так как события цикла могут возникать несколько раз) и их вычисление намного более сложно [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для формализации GERT-сети введем следующие обозначения. Определим существующие процессы и операции транспортного технологического цикла отдельного БПЛА. Обозначим $S_i; i \in N$ - состояния БПЛА, а через функцию $W_{ij}; i, j \in N$ - процессы простоя БПЛА на этапах загрузки и транспортирования груза. При этом, S_i - будут соответствовать узлам сетевой модели и не иметь временной протяженности, W_{ij} - соответствуют дугам сетевой модели и имеют временную протяженность. W -функция случайной величины определяется как [17]:

$$W_{ij} = p_{ij} M_{ij}, \quad (4)$$

где p_{ij} - вероятность возникновения операции простоя БПЛА, M_{ij} - производящая функция моментов длительности операции простоя БПЛА. Декартово произведение элементов состояний (узлов GERT-модели) представляет собой множество пар, мощностью 4 (таблица 1).

Таблица 1. Элементы состояний БПЛА (узлы GERT-модели).

Возможные состояния БПЛА	Операция загрузки БПЛА	Положение БПЛА
S_1	Нет	Наземный пункт загрузки

S_2	Да	Наземный пункт загрузки
S_3	Да	Обрабатываемое поле
S_4	Нет	Обрабатываемое поле

Логический анализ транспортного технологического процесса БПЛА позволяет определить возможные простои каждой транспортной единицы в процессе функционирования. Сетевая стохастическая модель единичного транспортного цикла при любом способе закрепления БПЛА за наземными пунктами загрузки представляет собой топологию сети, для которой необходимо выполнить вероятностное описание простоев БПЛА в одном цикле.

Простои БПЛА по элементам единичного транспортного цикла, как случайные величины, подчинены определенному закону распределения. Хронометрический анализ простоев в цикле сельскохозяйственного БПЛА DJI Agras T30 позволил установить следующие распределения простоев и вероятности p_i их возникновения на основе критерия согласия Колмогорова, представленные в таблице 2.

Используя топологическое уравнение Мейсона [16], определим численное значение рисков на транспортном технологическом цикле. Для этого необходимо вычисление математического ожидания простоя. Для определения W_E – функции, эквивалентной GERT-сети, вводится дополнительная дуга для получения замкнутого графа.

Таблица 2. Дуги (операции простоя БПЛА) GERT-сетевой модели.

Обозначение операции простоя	Описание операции простоя	Вероятность возникновения операции простоя, p_{ij}	Параметры распределения операции	Вид распределения операции простоя [18]
$W_{1,1}$	Ожидание загрузки на наземном пункте	0.35	$\mu_{1,1} = 8$ $\sigma_{1,1} = 1.25$	Нормальное
$W_{1,2}$	Простои в процессе загрузки БПЛА	0.15	$\alpha_{1,2} = 3$	Экспоненциальное
$W_{2,3}$	Простои при движении загруженного БПЛА к обрабатываемому полю	0.15	$\alpha_{2,3} = 2.85$ $b_{2,3} = 0.09$	Гамма

$W_{3,3}$	Ожидание начала процесса обработки поля	0.45	$\mu_{1,1} = 7$ $\sigma_{1,1} = 2$	Нормальное
$W_{3,4}$	Простой БПЛА в процессе обработки поля	0.03	$\alpha_{1,2} = 2$	Экспоненциально е
$W_{4,1}$	Движение БПЛА от обрабатываемого поля к наземному пункту загрузки	0.09	$\alpha_{2,3} = 2.35$ $b_{2,3} = 0.05$	Гамма

Таким образом, для сельскохозяйственного БПЛА DJI Agras T30 получена GERT-модель с описанием состояний узлов и дуг (таблицы 1 и 2), позволяющая по методике [17] рассчитать величину убытка простоя БПЛА за минуту рабочего цикла. Далее с использованием стоимостной величины транспортного технологического цикла БПЛА, рассчитывается ожидаемый риск. Отметим, что расчеты выполняются для БПЛА DJI Agras T30 с баком объёмом 30 л, который имеет массу полезной нагрузки до 30 кг и производительность при обработке посевов ядохимикатами и жидкими удобрениями до 16,1 га/ч. Лучи данного БПЛА трансформируются для полива фруктовых деревьев. Он оснащён приёмником RTK, радаром кругового обзора и улучшенной системой визуального обнаружения. Возможна установка оборудования для разбрасывания семян и гранулированных удобрений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый подход к определению риска, позволяющий применить методы стохастического GERT-сетевого моделирования к анализу транспортных технологических циклов БПЛА при использовании в точном земледелии. В рамках GERT-модели строится универсальная рискованная сетевая структура по параметру простоя единичного транспортного цикла БПЛА, позволяющая достаточно точно определять численные характеристик величин простоев и убытков. Полученные данные могут быть использованы при планировании состава БПЛА, работающих на одном или нескольких участках обрабатываемых полей, а также с целью оптимизации использования наземного (мобильного) оборудования и снижения стоимости транспортировки пестицидов и удобрений при дифференцированном их внесении в почву или растительный покров. Предложенный подход обладает универсальностью и подходит для БПЛА любых типов

и любой грузоподъемности. Модельный расчет выполнен для сельскохозяйственного БПЛА DJI Agras T30.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kovalev I.V., Karaseva M.V. On the problem of increasing the efficiency of UAVs technologies in agrarian business. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020; 421: 072020.
- [2] Сулейменов Б.У., Танирбергенов С.И. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в точном земледелии: обзор. Почвоведение и агрохимия. 2018; 2: 85-100.
- [3] Зубарев Ю. Н., Фомин Д. С., Чащин А. Н., Заболотнова М. В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве, Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2019; 2: 47-51. doi:10.7242/2658-705X/2019.2.5
- [4] Коротаев А.А., Новопашин Л.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторинга сельскохозяйственных угодий и посевных площадей в аграрном секторе. Аграрный вестник Урала. 2015; 12 (142): 38-42.
- [5] Zelenkov P.V, Brezitskaya V.V, Kovalev I.V, Karaseva M.V., Voroshilova A.A. Use of innovative space technology in progressive crop production. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2019; 315: 072019. doi:10.1088/1755-1315/315/7/072019
- [6] Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017; 3: 10-16. DOI 10.22314.2073-7599-2017.3.10-16
- [7] Хорт Д.О., Личман Г.И., Филиппов Р.А., Беленков А.И. Применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) в точном земледелии, Фермер. Поволжье. 2016; 7: 34-37.
- [8] Stafford J.V. Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. Journal of Agricultural Engineering Research. 2000; 76 (3): 267-275.
- [9] Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017; 3: 10-16. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-10-16>
- [10] Xinyu Xue, Yubin Lan, Zhu Sun, Chun Chang, W. Clint Hoffmann. Develop an

unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 128: 58-66.

[11] Kovalev I.V., Testoyedov N.A. Modern unmanned aerial technologies for the development of agribusiness and precision farming. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020; 548: 052080. doi:10.1088/1755-1315/548/5/052080

[12] Abie H, Borking J. *Risk Analysis Methods and Practices*. Norwegian: Norsk Regnesentral. 2012.

[13] Tuev E.V., Kozlova V., Olshevskaya O. Modern Innovations, Systems and Technologies. 2021; 1 (2): 34-45. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-2-34-45>

[14] Бидак Э.В., Мевша А.Р., Пода Д.В. Преимущества использования БПЛА в сельском хозяйстве. В сборнике: Новая наука: история становления, современное состояние, перспективы развития сборник статей Международной научно-практической конференции. 2017; 197-200.

[15] Глаголева Г.И. Преимущества применения БПЛА и их использование для нужд сельского хозяйства. В сборнике: Наука и молодёжь Сборник научных трудов. Новочеркасск. 2018; 104-106.

[16] Pregina K., Ramesh M. Stochastic Project Network Scheduling Technique for Construction Projects Using GERT. *Advances in Construction Management*. 2022; 191: 381-392. DOI:10.1007/978-981-16-5839-6_33.

[17] Phillips D., Garcia-Diaz A. *Fundamental of network analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1981.

[18] Neumann K. *Stochastic Project Network: Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization*. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems (LNE)*. 1990; 344.

REFERENCES

[1] Kovalev I.V., Karaseva M.V. On the problem of increasing the efficiency of UAVs technologies in agrarian business. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020; 421: 072020.

[2] Sulejmenov B.U., Tanirbergenov S.I. Perspektivy primeneniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov v tochnom zemledelii: obzor. *Pochvovedenie i agrohimiya*. 2018; 2: 85-100.

[3] Zubarev YU. N., Fomin D. S., CHashchin A. N., Zabolotnova M. V. Ispol'zovanie bespilotnyh letatel'nyh apparatov v sel'skom hozyaistve, *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo centra*. 2019; 2: 47-51. doi:10.7242/2658-705X/2019.2.5

- [4] Korotaev A.A., Novopashin L.A. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya monitorirovaniya sel'skohozyajstvennykh ugodij i posevnykh ploshchadej v agrarnom sektore. *Agrarnyj vestnik Urala*. 2015; 12 (142): 38-42.
- [5] Zelenkov P.V, Brezitskaya V.V, Kovalev I.V, Karaseva M.V., Voroshilova A.A. Use of innovative space technology in progressive crop production. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2019; 315: 072019. doi:10.1088/1755-1315/315/7/072019
- [6] Smirnov I.G., Marchenko L.A., Lichman G.I., Mochkova T.V., Spiridonov A.YU. *Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya vneseniya pesticidov i udobrenij v sisteme tochnogo zemledeliya. Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 3: 10-16. DOI 10.22314.2073-7599-2017.3.10-16
- [7] Hort D.O., Lichman G.I., Filippov R.A., Belenkov A.I. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov (dronov) v tochnom zemledelii, *Fermer. Povolzh'e*. 2016; 7: 34-37.
- [8] Stafford J.V. Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2000; 76 (3): 267-275.
- [9] Smirnov I.G., Marchenko L.A., Lichman G.I., Mochkova T.V., Spiridonov A.YU. *Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya vneseniya pesticidov i udobrenij v sisteme tochnogo zemledeliya. Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 3: 10-16. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-10-16>
- [10] Xinyu Xue, Yubin Lan, Zhu Sun, Chun Chang, W. Clint Hoffmann. Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 128: 58-66.
- [11] Kovalev I.V., Testoyedov N.A. Modern unmanned aerial technologies for the development of agribusiness and precision farming. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2020; 548: 052080. doi:10.1088/1755-1315/548/5/052080
- [12] Abie H, Borking J. *Risk Analysis Methods and Practices*. Norwegian: Norsk Regnesentral. 2012.
- [13] Tuev E.V., Kozlova V., Olshevskaya O. *Modern Innovations, Systems and Technologies*. 2021; 1 (2): 34-45. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-2-34-45>
- [14] Bidak E.V., Mevsha A.R., Poda D.V. *Preimushchestva ispol'zovaniya BPLA v sel'skom hozyaistve. V sbornike: Novaya nauka: istoriya stanovleniya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya sbornik statej Mezhdunarodnoï nauchno-prakticheskoi konferencii*. 2017; 197-200.
- [15] Glagoleva G.I. *Preimushchestva primeneniya BPLA i ih ispol'zovanie dlya nuzhd*

sel'skogo hozyaystva. V sbornike: Nauka i molodëzh' Sbornik nauchnyh trudov. Novocherkass. 2018; 104-106.

[16] Pregina K., Ramesh M. Stochastic Project Network Scheduling Technique for Construction Projects Using GERT. Advances in Construction Management. 2022; 191: 381-392. DOI:10.1007/978-981-16-5839-6_33.

[17] Phillips D., Garcia-Diaz A. Fundamental of network analysis. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1981.

[18] Neumann K. Stochastic Project Network: Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems (LNE). 1990; 344.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ковалев Д. И., аспирант, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия; Красноярский краевой Дом науки и техники РосСНИО, Красноярск, Россия
e-mail: grimm7jow@gmail.com

Подоплелова В. А., аспирант, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия; Сочинский государственный университет, Сочи, Россия
e-mail: podoplelovava@mail.ru

Мансурова Т. П., научный сотрудник, Красноярский краевой Дом науки и техники РосСНИО, Красноярск, Россия
e-mail: mansurovatp@mail.ru

Kovalev D. I., graduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia; Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, Krasnoyarsk, Russia

Podoplelova V. A., graduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia; Sochi State University, Sochi, Russia
e-mail: podoplelovava@mail.ru

Mansurova T. P., researcher, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, Krasnoyarsk, Russia

Статья поступила в редакцию 11.07.2022; одобрена после рецензирования 18.08.2022; принята к публикации 22.08.2022.

The article was submitted 11.07.2022; approved after reviewing 18.08.2022; accepted for publication 22.08.2022.