

УДК 631.331:629.735.073:004.8
<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.3006>

EDN
[ILHLKT](#)

К вопросу анализа чувствительности системных параметров транспортно-технологических циклов БПЛА

В.А. Подоплелова^{1,2,*}

¹Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, 660049, Россия

²Сочинский государственный университет, ул. Пластунская, 94, Сочи, 354003, Россия

*E-mail: podoplelovava@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу чувствительности системных параметров транспортно-технологических циклов БПЛА в условиях неопределенности, обусловленной разнообразием сред функционирования (точное земледелие, горная промышленность, логистика и т.д.) и взаимозависимостью системных параметров. Отмечаются ограничения классических методов анализа чувствительности, которые основаны на оценке дисперсии, применительно к моделям с взаимосвязанными параметрами, такими как время выполнения операций и требуемые ресурсы. Показано, что традиционные подходы, эффективные для независимых переменных, требуют модификации для учета нелинейных зависимостей, характерных для транспортно-технологических циклов БПЛА. Предложены способы совершенствования методов анализа чувствительности, включая введение корректирующих коэффициентов, многокритериальную оптимизацию и интеграцию с алгоритмами искусственного интеллекта. Это позволит повысить точность прогнозирования времени реализации циклов и оптимизировать ресурсное обеспечение, что важно для лиц, принимающих решения, в условиях ограниченной информации. Отмечается роль анализа чувствительности в оценке микропроцессорной производительности, распределении вычислительных ресурсов и интеграции систем распознавания образов в бортовое оборудование БПЛА. Обоснована необходимость разработки специализированных методов анализа, адаптированных к специфике транспортно-технологических циклов БПЛА.

Ключевые слова: анализ чувствительности, БПЛА, транспортные циклы, неопределенность, оптимизация, искусственный интеллект.

On the issue of sensitivity analysis of system parameters of transport and technological cycles of UAVs

V.A. Podoplelova^{1,2,*}

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, 90 Mira Avenue, Krasnoyarsk, 660049, Russia

²Sochi State University, Plastunskaya St., 94, Sochi, 354003, Russia

*E-mail: podoplelovava@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the sensitivity analysis of system parameters of UAV transport and technological cycles under uncertainty caused by the diversity of operating environments (precision agriculture, mining, logistics, etc.) and the interdependence of system parameters. The limitations of classical sensitivity analysis methods based on variance assessment are noted, as applied to models with interrelated parameters, such as operation execution time and required resources. It is shown that traditional approaches that are effective for independent variables require modification to account for nonlinear dependencies characteristic of UAV transport and technological cycles. The methods for improving sensitivity analysis methods are proposed, including the introduction of correction factors, multi-criteria optimization, and integration with artificial intelligence algorithms. This will improve the accuracy of forecasting the cycle implementation time and optimize resource provision, which is important for decision makers in conditions of limited information. The role of sensitivity analysis in assessing microprocessor performance, distributing computing resources, and integrating pattern recognition systems into UAV onboard equipment is noted. The need to develop specialized analysis methods adapted to the specifics of UAV transport and technological cycles is substantiated.

Keywords: sensitivity analysis, UAVs, transport cycles, uncertainty, optimization, artificial intelligence.

1. Введение

Для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) характерно разнообразие как среды функционирования, так операций, выполняемых в рамках реализации транспортно-технологических циклов (ТТЦ) [1-4]. Примерами служит применение БПЛА в точном земледелии, в горной промышленности, в системах логистической поддержки и т.п. [5-8]. При этом ограничения пространства и ресурсов, множественность операций ТТЦ и все виды случайных нарушений в этих операциях приводят к множеству неопределенностей в процессе реализации ТТЦ [9]. Эти неопределенности оказывают влияние на анализ и оптимизацию ТТЦ с учетом допустимых (возможных) реализаций процесса. Неопределенность является неотъемлемым свойством сложных информационно-управляющих систем БПЛА, включая наземную инфраструктуру и периферийное бортовое оборудование [10, 11]. В связи с этим лицо, принимающее решения (ЛПР), при разработке и реализации ТТЦ не может эффективно получить доступ к прогнозной информации, такой как время реализации ТТЦ и потребность в ресурсном обеспечении в условиях неопределенности. Компоненты этой прогнозной информации будем определять, как системные параметры ТТЦ БПЛА. Оценка влияния этих системных параметров на возможные реализации ТТЦ важна с точки зрения контроля точности выполнения и оптимизации ТТЦ.

Одним из общих методов анализа неопределенности является анализ чувствительности (Sensitivity Analysis - SA) [9, 12-14], основные положения которого могут быть использованы для анализа неопределенности процессов реализации ТТЦ. Один из классических примеров анализа чувствительности в инженерном программировании систем обработки сообщений рассмотрен в работах Боэма Б.У. [15-17]. Основываясь на этой работе, отметим, что необходимость применения анализа чувствительности в различных сферах применения БПЛА при реализации их транспортно-технологических циклов базируется на ряде ключевых факторов. Прежде всего, анализ чувствительности играет важную роль в таких аспектах инженерного программирования, как анализ осуществимости ТТЦ на предварительных исследовательских этапах и оценка рисков при планировании, анализе требований и проектировании ТТЦ. Такие оценки для анализа реализации ТТЦ БПЛА позволяют учесть в работе существующее разнообразие сред, в которых функционируют БПЛА, множественность операций в рамках ТТЦ и наличие различных видов случайных нарушений в этих операциях.

2. Методы и материалы исследования

В работе [9] отмечается, что применение анализа чувствительности становится необходимым инструментом для исследования влияния различных факторов на производительность систем БПЛА, включая микропроцессорную производительность [18]. Указанные подходы включает оценки накладных расходов в микропроцессорных системах БПЛА в реальных условиях эксплуатации, анализ характеристик работы алгоритмов распределения ресурсов и изучение особенностей интеграции систем искусственного интеллекта, применяемых совместно с БПЛА (или реализуемых на борту). Такой подход позволяет учитывать неопределенность, которая является неотъемлемым свойством таких интегрированных информационно-управляющих систем БПЛА, включая элементы ИИ как в наземной инфраструктуре, так и в периферийном бортовом оборудовании. Подчеркнем важность интеграции анализа чувствительности в процессы проектирования и эксплуатации систем БПЛА для обеспечения их надежности и эффективности в различных условиях применения.

Необходимость анализа чувствительности также обусловлена тем, что он помогает ЛПР преодолеть трудности в получении прогнозной информации о времени реализации ТТЦ и потребностях в ресурсном обеспечении.

В общем случае, анализ неопределенности направлен на выяснение влияния входных переменных на конечную выходную неопределенность модели на протяжении всего процесса анализа чувствительности. Оценка и представление влияния неопределенности является важным разделом теории анализа сложных систем [19, 20]. Формально такой процесс анализа неопределенности можно рассматривать как изучение функций в форме (уравнение 1):

$$Y = [X] = f[x_1, x_2, \dots], \quad (1)$$

где Y — зависимый выход, на неопределенность которого влияет флуктуация его независимых входов; функция f представляет общую исследуемую модель или модели Y , а $X = [x_1, x_2, \dots]$ — k независимые входы.

Известно, что целью анализа неопределенности является определение влияния распределения входов (X) на все распределение выходов (Y).

3. Результаты и обсуждение

Рассмотренный подход показал ограничения применимости традиционных методов анализа неопределенности и чувствительности к процессам логистической поддержки транспортно-технологических циклов БПЛА, для которых характерно наличие множества взаимосвязанных параметров. Как показано в ряде ранних работ [21, 22], классический анализ чувствительности, основанный на оценке дисперсии, демонстрирует эффективность лишь в условиях независимости входных параметров или при доминировании единственного параметра. Однако для моделей анализа ТТЦ БПЛА, где такие параметры, как время выполнения операций и потребление ресурсов, взаимозависимы, данный подход требует модификации.

Особенность реализации ТТЦ БПЛА, связанная с разнообразием сред функционирования (агротехнологии и точное земледелие, горная промышленность, логистические системы и др.), множественностью операций и случайными воздействиями на них, приводит к формированию сложных структур взаимозависимых параметров. Например, наблюдаемая корреляция между временем выполнения транспортно-технологических операций и ресурсными затратами создает линейные/нелинейные зависимости, которые не могут быть адекватно оценены методами, предполагающими независимость входных переменных. Это подтверждает необходимость расширения существующих подходов к анализу чувствительности, ориентированных на модели вида (1).

Таким образом, подтверждается важность учета взаимного влияния системных параметров ТТЦ, таких как прогнозируемое время реализации цикла и потребность в ресурсах, которые формируют неопределенность на этапах проектирования и эксплуатации БПЛА. В условиях, когда ЛПР сталкивается с ограниченной прогнозной информацией, классические методы анализа чувствительности, рассмотренные в работах Б.У. Боэма, оказываются недостаточными. Требуется разработка подходов, способных интегрировать анализ созависимых параметров, характерных для процессов реализации ТТЦ БПЛА, включая:

- оценку влияния инфокоммуникационных ресурсов на микропроцессорную производительность систем БПЛА в реальных условиях эксплуатации;
- анализ алгоритмов распределения ресурсов в условиях конкуренции за вычислительные мощности БПЛА и наземного комплекса управления (особенно, в условиях применения роя БПЛА);

- учет особенностей интеграции систем искусственного интеллекта (распознавание образов, эвристический поиск и т.п.) в бортовое оборудование [23, 24].

Расширение и обобщение методов анализа чувствительности должно быть направлено на преодоление ограничений, связанных с взаимозависимостью параметров. Например, модификация подходов на основе дисперсии может включать введение корректирующих коэффициентов, учитывающих степень связи между входными переменными, или применение методов многокритериальной оптимизации для оценки вклада каждого параметра в общую неопределенность модели. Это позволит не только повысить точность прогнозирования времени реализации ТТЦ и потребности в ресурсах, но и оптимизировать процессы принятия решений в условиях ограниченной информации.

Таким образом, разработка специализированных методов анализа чувствительности для ТТЦ БПЛА, учитывающих специфику взаимозависимых параметров, является одним из важных направлений для повышения надежности и эффективности систем логистической поддержки применения БПЛА в различных условиях эксплуатации.

4. Заключение

Для практики применения БПЛА в различных условиях эксплуатации анализ чувствительности в управлении системными параметрами транспортно-технологических циклов БПЛА имеет важное значение, так как условия эксплуатации, включая разнообразие сред функционирования, множественность операций ТТЦ и влияние случайных воздействий на БПЛА формируют сложные модели учета взаимозависимых параметров. Требуется разработка методов, способных оценивать неопределенности, связанные с прогнозированием времени реализации ТТЦ и потребностью в ресурсах, которые обеспечат программно-алгоритмическую поддержку ЛПР в условиях ограниченной информации.

Выявлены ограничения классических методов анализа чувствительности, основанных на оценке дисперсии для моделей с взаимозависимыми параметрами. Например, корреляция между временем выполнения операций и ресурсными затратами требует модификации традиционных методик, таких как введение корректирующих коэффициентов или применение многокритериальной оптимизации. Это позволит

учесть нелинейные зависимости между входными переменными, характерные для систем логистической поддержки БПЛА, и повысить точность прогнозирования.

Особое значение имеет интеграция анализа чувствительности в процессы проектирования и эксплуатации БПЛА, включая оценку микропроцессорной производительности, алгоритмов распределения ресурсов и особенностей систем искусственного интеллекта. Это позволит повысить надежность бортового оборудования и наземной инфраструктуры, особенно в условиях роевого применения БПЛА, когда конкуренция за вычислительные ресурсы усиливает неопределенность.

Перспективным направлением исследований является разработка специализированных методов анализа чувствительности, адаптированных к специфике ТТЦ БПЛА. Такие методы должны не только преодолевать ограничения, связанные с взаимозависимостью параметров, но и обеспечивать оптимизацию решений в условиях динамически изменяющейся среды. Дальнейшие исследования могут быть направлены на комбинацию анализа чувствительности с методами машинного обучения для автоматизации прогнозирования и управления ресурсами в реальном времени.

В заключение отметим, что совершенствование методик анализа чувствительности актуально для развития технологий БПЛА с целью повышения эффективности их применения в различных отраслях. Следует также отметить необходимость междисциплинарного подхода, объединяющего достижения инженерного программирования, теории сложных систем и искусственного интеллекта, для создания устойчивых и адаптивных систем управления ТТЦ БПЛА.

Список литературы

1. Маннонов, Ж. А. Технологические процессы функционирования производственно-транспортной системы и вопросы их логистического управления / Ж. А. Маннонов, С.К. Имомназаров, Д.Х. Купайсинов, Б.М. Жамилов // *Universum: технические науки*. – 2022. – № 6-3 (99). – Р. 43-47.
2. Kovalev, I. V. On the problem of increasing the efficiency of UAVs technologies in agrarian business / I. V. Kovalev, M. V. Karaseva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – V. 421. – P. 72020. – DOI: 10.1088/1755-1315/421/7/072020. – EDN: ZLDJJY.

3. Kovalev, I. The efficiency analysis of the automated plants / I. Kovalev, P. Zelenkov, S. Ognerubov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 70. – P. 012007. – DOI: 10.1088/1757-899X/70/1/012007. – EDN: UEMYPJ.
4. Ковалев, И. В. Анализ эффективности организационно-технологических комплексов предприятий / И. В. Ковалев, А. А. Новожилов, Т. А. Рукавицына // Системы управления и информационные технологии. – 2010. – № 4(42). – С. 36-39. – EDN: NBIRKP.
5. Yablokova, A. Environmental safety problems of swarm use of UAVs in precision agriculture / A. Yablokova, D. Kovalev, I. Kovalev [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – V. 471. – P. 04018. – DOI: 10.1051/e3sconf/202447104018. – EDN: FFYFSI.
6. Kovalev, I. Digitalization of UAV transport and technological cycles in smart agriculture / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et al.] // E3S web of conferences. – 2023. – V. 390. – P. 03014. – DOI: 10.1051/e3sconf/202339003014. – EDN: MPXPRL.
7. Kovalev, I. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – V. 471. – P. 04017. – DOI: 10.1051/e3sconf/202447104017. – EDN: LGAJJO.
8. Kovalev, I. Conceptual basis for digitalization of specifications of transport and technological cycles of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – V. 443. – P. 06014. – DOI: 10.1051/e3sconf/202344306014. – EDN: QEBFFO.
9. Wu, Y. Multi-parameters uncertainty analysis of logistic support process based on GERT / Y. Wu, X. Pan, R. Kang, C. He, L. Gong // Journal of Systems Engineering and Electronics. – 2014. – V. 25. – No. 6. – P. 1011-1019.
10. Kovalev, I. V. Space Technologies for the Sustainable Development of the Transport Infrastructure of the Arctic Territories / I. V. Kovalev, D. I. Kovalev, R. B. Kovalev [et al.] // Transportation Research Procedia. – 2023. – V. 68. – P. 796-801. – DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.111. – EDN: XHBTXI.
11. Брайткрайц, С. Г. Методический подход к формированию облика комплекса бортового радиоэлектронного оборудования беспилотных летательных аппаратов большой продолжительности полета / С.Г. Брайткрайц, В.А. Евдокимов, Е.М. Ильин, А.И. Полубехин // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 3(35). – P. 6-14.

12. Borgonovo, E. Probabilistic sensitivity measures as information value / E. Borgonovo, G.B. Hazen, V.R.R. Jose, E. Plischke // *European Journal of Operational Research*. – 2021. – Т. 289. – P. 595-610.
13. Ma, Y. Structural fault diagnosis of UAV based on convolutional neural network and data processing technology / Y. Ma, F. Mustapha, M. R. Ishak, S. Abdul Rahim, M. Mustap // *Nondestruct. Test. Eval.* – 2023. – P. 1-20.
14. Alsalem, A. Sensitivity Analysis of MEMS Accelerometer for the Vibration Measurement of VTOL UAV / A. Alsalem, M. Zohdy // *IEEE*. – 2023 – P. 320-325. – DOI: 10.1109/SMARTCOMP58114.2023.00079.
15. Боэм, Б. Характеристики качества программного обеспечения / Б. Боэм, Дж. Браун, Х. Каспар, М. Липов, Г. Мак-Леод, М. Мерит. – М.: Мир, 1981. – 208 с.
16. Боэм, Б.У. Инженерное проектирование программного обеспечения: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 512 с.
17. Ковалев, И.В. Многоатрибутивное управление трудозатратами на разработку n-вариантных программных систем / И.В. Ковалев, Ю.А. Нургалеева, С.Н. Ежеманская, В.Ю. Ерыгин // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 8-1. – С. 124-127.
18. Kovalev, I. V. Analysis of system parameters in a microprocessor performance model of a swarm of agricultural spraying UAVs / I. V. Kovalev, D. I. Kovalev, K. D. Astanakulov [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2023. – V. 1284. – No. 1. – P. 012030. – DOI: 10.1088/1755-1315/1284/1/012030. – EDN: OUMMEG.
19. Ковалев, И. В. Методология оценки и повышения надежности программно-информационных технологий и структур: монография / И. В. Ковалев, Т. И. Семенько, Р. Ю. Царев; Федер. агентство по образованию, Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск: КГТУ, 2005. – 160 с. – ISBN: 5-7636-0719-1. – EDN: QMPHWR.
20. Kovalev, I. The efficiency analysis of the automated plants / I. Kovalev, P. Zelenkov, S. Ognerubov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – V. 70. – P. 012007. – DOI: 10.1088/1757-899X/70/1/012007. – EDN: UEMYPJ.
21. Ковалев, И. В. К вопросу реализации мультиверсионной среды исполнения бортового программного обеспечения автономных беспилотных объектов средствами операционной системы реального времени / И. В. Ковалев, В. В. Лосев, М. В. Сарамуд [и др.] // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. – 2017. – Т. 18. – № 1. – С. 58-61. – EDN: YKKCWL.

22. Kovalev, I. Model implementation of the simulation environment of voting algorithms, as a dynamic system for increasing the reliability of the control complex of autonomous unmanned objects / I. Kovalev, V. Losev, M. Saramud, M. Petrosyan // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 132. – P. 04011. – DOI: 10.1051/mateconf/201713204011. – EDN: XNKSVN.
23. Бояринов, Е. Искусственный интеллект в беспилотных летательных аппаратах / Е. Бояринов // Вестник науки. – 2023. – V. 4. – № 5(62). – P. 770-773.
24. Матюха, С.В. Искусственный интеллект в беспилотных авиационных системах / С.В. Матюха // Транспортное дело России. – 2022. – № 1. – P. 8-11.