

УДК 004.942

<https://www.doi.org/10.47813/dnit-III.2024.11.3011>

EDN [RSDFMV](#)

Анализ эффективности операций транспортно-технологического цикла БПЛА

Д.И. Ковалев*

Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт
инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент,
Узбекистан

*E-mail: kovalev.dw7@gmail.com

Аннотация. При применении БПЛА в сельскохозяйственной отрасли актуальной задачей является анализ эффективности операций транспортно-технологического цикла (ТТЦ) БПЛА. Исследования, связанные с анализом влияния рабочих параметров опрыскивающих БПЛА на осаждение капель и биологическую эффективность применения пестицидов, отражают косвенное влияние этих характеристик на реализацию транспортно-технологических циклов сельскохозяйственных БПЛА. В работе представлено описание четырех типовых БПЛА, используемых для защиты растений в точном земледелии в КНР, даны их основные технические параметры, а также представлены полетные параметры БПЛА при проведении полевых испытаний. Результаты анализа эффективности операций транспортно-технологического цикла БПЛА включают процентные соотношения временных операционных затрат ТТЦ БПЛА. Представленный анализ показал необходимость работ по дальнейшему повышению эффективности БПЛА для достижения удовлетворительных результатов.

Ключевые слова: БПЛА, анализ, эффективность, операция опрыскивания, транспортно-технологический цикл.

Analysis of the efficiency of UAV transport and technological cycle operations

D.I. Kovalev*

Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural
Mechanization Engineers", Tashkent, Uzbekistan

*E-mail: kovalev.dw7@gmail.com

Abstract. When using UAVs in the agricultural industry, an urgent task is to analyze the efficiency of UAV transport and technological cycle (TTC) operations. Research related to the analysis of the influence of operating parameters of spraying UAVs on droplet deposition and the biological effectiveness of pesticide use reflects the indirect influence of these characteristics on the implementation of transport and technological cycles of agricultural UAVs. The paper presents a description of four typical UAVs used for plant protection in precision agriculture in China, their main technical parameters are given, and the flight parameters of the UAV during field tests are presented. The results of the analysis of the efficiency of operations of the UAV transport and technological cycle include the percentage of time operating costs of the UAV TTC. The presented analysis showed the need for work to further improve the efficiency of UAVs to achieve satisfactory results.

Keywords: UAV, analysis, efficiency, spraying operation, transport and technological cycle.

1. Введение

В настоящее время БПЛА активно применяются в сельскохозяйственной отрасли для выполнения многих агротехнических операций [1-6], включая операции для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия [7-12].

Следует отметить достаточно большое количество исследований, проведенных в последние годы, и связанных с анализом влияния рабочих параметров БПЛА на осаждение капель и биологическую эффективность применения пестицидов [13-16]. Это важное направление исследований, которое отражает косвенное влияние этих характеристик на реализацию транспортно-технологических циклов (ТТЦ) сельскохозяйственных БПЛА [17-21]. Это полезная информация, которая служит основой для описания технологических операций ТТЦ, так как применение в сельскохозяйственной авиации БПЛА направлено на повышение эффективности процесса опрыскивания, включая эффект распределения брызг капель, их сноса, которые зависят от скорости и высоты полета БПЛА, а также используемого бортового оборудования [22-24]. Например, в экспериментах на рисовых полях при использовании инфракрасного тепловизора для изучения распределения капель брызг через температурный градиент для однороторного БПЛА было показано, что технология инфракрасного тепловидения может точно отражать закономерности распределения капель на растениях [25].

В [26] рассматривалась технология воздушного электростатического распыления. Показано, что данная технология улучшает равномерность осаждения капель. Также результаты опытов подтвердили эффективность использования пестицидов при обеспечении контроля, который позволил существенно уменьшить снос капель распыляемой жидкости. Авторы работы [27] изучали характеристики распыления для БПЛА типа CD-10 с учетом высоты и скорости полета. Рассматривались такие характеристики, как концентрация и однородность осаждения капель, и изменение их значений в зависимости от высоты и скорости перемещения БПЛА CD-10. Эксперименты подтвердили, что взаимодействие этих двух факторов (скорости и высоты полета) оказывает существенное влияние на плотность капель и равномерность их осаждения.

Ряд работ был посвящен контролю действия инсектицидов, распыляемых с помощью БПЛА против различных болезней растений. Изучалась как инсектицидная

эффективность, так и период стойкости инсектицидов, также было выполнено сравнение с результатами, которые были достигнуты с помощью традиционных технологий распыления инсектицидов [28].

В работах [29, 30] основное внимание авторы уделили характеристикам распылительных сопел БПЛА, в частности, исследовался процесс распыления с помощью вихревого сопла сверхмалого объема и выполнялся анализ аэродинамических насадок на сопла и их влияние на распределение капель распыляемого раствора в зависимости от условий полета БПЛА.

Таким образом, большинство проведенных ранее исследований были направлены на изучение влияния рабочих параметров БПЛА и его распылительного оборудования на распределение, осаждение капель и биологическую эффективность применения пестицидов [31].

2. Материалы и методы

В работе [32] представлено описание четырех типовых БПЛА, используемых для защиты растений в точном земледелии в КНР, основные технические параметры которых приведены в таблице 1:

- 3WQF120-12 (Anyang Quanfeng Aviation Plant Protection Technology Co., Ltd.);
- 3CD-15 (Wuxi Hanhe Aviation Technology Co., Ltd.);
- WSZ-0610 (Shandong Wish Plant Protection Machinery Co., Ltd.);
- HY-B-15L ((Shenzhen High-Tech New Agricultural Technology Co. Ltd.).

Таблица 1. Основные технические параметры БПЛА.

Тип БПЛА	3WQF120-12	3CD-15	WSZ-0610	HY-B-15L
Длина ротора/мм	2410	2240	2220	2460
Емкость бака/л	12	15	10	15
Количество сопел	2	4	2	5
Тип насадки	LU120-02	Flat-fan 01	Центробежный распылитель	Плосковентильные и конусный
Тип насоса	Мембранный насос	Мембранный насос	Шестеренный и мембранный насос	Мембранный насос
Время полета при полной нагрузке/мин	30	20	20	15
Время полета ненагруженный/мин	50	30	40	35

В таблице 2 представлены полетные параметры БПЛА при проведении полевых испытаний.

Таблица 2. Полетные параметры БПЛА в полевых испытаниях.

Тип БПЛА	3WQF120-12	3CD-15	WSZ-0610	HY-B-15L
Скорость полета (м/с)	5,0	6,0	4,0	4,5
Высота полета (м)	2,0	2,0	2,0	1,5
Полоса распыления (м)	4,5	5,0	5,0	6,0
Расход одного сопла (л/мин)	0,80	0,54	0,72	0,38

3. Результаты анализа эффективности операций транспортно-технологического цикла БПЛА

БПЛА – это высокоэффективные средства для защиты растений, функционирование которых описывается набором операций ТТЦ [33-35]. Понятийные средства спецификации ТТЦ позволяют описывать характеристики операций, зависящие от параметров БПЛА, однако важны статистические данные эффективности их выполнения и временные операционные затраты для каждого элемента операции [36, 37]. Эти данные позволяют формировать графоаналитическую модель ТТЦ на базе GERT-сетевого подхода с вероятностно-временными параметрами операций для исследования процесса выполнения ТТЦ и его реализуемости в заданных временных рамках [38-40].

Обычно эффективность работы БПЛА оценивается по площади участка ($S_{уч}$), который подвергнулся опрыскиванию при выполнении полетного задания. С полетным заданием связаны временные затраты на планирование маршрута (ПМ) БПЛА. Последствия отказов в процессе технического обслуживания, на этапе подготовки (ПГ) и наземном обслуживании (НО) полета БПЛА не учитываются.

В работах [19-24, 32] рассматривается интенсивность отказов (ИО), как соотношение времени отказа и времени протекания всего рабочего процесса БПЛА, который регламентируется транспортно-технологическим циклом. При этом неисправность, например, включала не только повреждение и замену деталей, но также

стабильность системы управления, блокировку насоса, трубки, сопла и многие другие факторы, которые могут повлиять на нормальную и стабильную работу БПЛА.

Допустимая реализация ТТЦ включала чистые операции (ЧО), связанные с процессом непосредственного распыления пестицидов с помощью БПЛА на выбранной площади $S_{уч}$ участка поля.

Процентное соотношение временных операционных затрат ТТЦ БПЛА четырех типов с привязкой к ежедневно обслуживаемой площади участка опрыскивающего БПЛА показано в Таблице 3.

Таблица 3. Процентное соотношение временных операционных затрат ТТЦ БПЛА.

Тип БПЛА	ПГ (%)	ИО (%)	ПМ (%)	НО (%)	ЧО (%)	$S_{уч}$ (hm ²)
3WQF120-12	9.56	3.73	9.75	47.03	29.93	18.0
3CD-15	7.60	3.42	9.84	52.14	27.00	16.7
WSZ-0610	8.37	4.36	10.37	48.96	27.94	13.4
HY-B-15L	8.81	4.17	10.26	-	-	-

4. Заключение

Начальный этап ТТЦ в рамках времени подготовки (ПГ) был в пределах от 7,60% (3CD-15) до 9,56% (3WQF120-12). и находится в основном в начале работы. Отказы в ходе этого испытаний БПЛА в основном происходили из-за блокировки сопел, трансфузионной трубки и насоса. Это занимало 3,73%-4,36% общего времени в процессе реализации ТТЦ. Эти потери могут быть компенсированы за счет повышения стабильности работы системы распыления, например, за счет снижения вязкости распыляемых жидкостей или увеличения их текучести (разработка специализированных рецептов для воздушного применения пестицидов). Затраты на планирование маршрута (формирование полетного задания с учетом местности расположения испытательного участка) составили около 10%.

Временные затраты на ПМ можно существенно сократить за счет применения систем автономного планирования маршрута или, например, с использованием алгоритма планирования маршрута, минимизирующего число возвратов БПЛА [41], что

позволит снизить неэффективное потребление энергоресурсов БПЛА (холостой пробег) и, следовательно, повысить эксплуатационную эффективность.

Авторы [32] не указывают процентные составляющие для наземного обслуживания, чистой работы и ежедневно обрабатываемой площади для НУ-В-15L. Это связано с тем, что в процессе экспериментальной отработки выявлен перегрев двигателя НУ-В-15L. Применялось два аппарата поочередно, что существенно увеличило эксплуатационные расходы и сделало нецелесообразным участие данного типа БПЛА в сравнительном анализе.

Представленный анализ показал необходимость работ по дальнейшему повышению эффективности БПЛА для достижения удовлетворительных результатов.

Список литературы

1. Ковалев И.В. Современные тенденции применения беспилотных технологий в агробизнесе / И.В. Ковалев // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий: Сборник IV Всероссийской (национальной) научной конференции, Новосибирск, 20 декабря 2019 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2019. – С. 607-611. – EDN ZJHEKP
2. Ценч Ю.С. История развития систем управления беспилотных воздушных судов / Ю.С. Ценч, Р.К. Курбанов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – № 17(3). – С. 4-15. – <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15>
3. Kovalev I.V. Overview of the International Conference on Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies - AGRITECH - 2019 / I.V. Kovalev, A.A. Voroshilova, E.A. Borisova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, June 20–22, 2019. – Krasnoyarsk, 2019. – P. 011001. – <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/315/1/011001>. – EDN PZXVYJ
4. Kovalev I.V. Analysis of the economic effect of increasing the reliability of information systems of digital agricultural enterprises / I.V. Kovalev, N.A. Testoyedov, E.V. Tuev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, June 18–20, 2020 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 548. – Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited,

2020. – P. 32043. – <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/548/3/032043>. – EDN KTDYWI
5. 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: conference proceedings, Krasnoyarsk, Russia, November 13–14, 2019 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 421. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 72020.
– <https://www.doi.org/10.1088/1755-1315/421/7/072020>. – EDN ZLDJY
 6. Kovalev I.V. Modern technological trends in the development of the ecosystem of cargo UAVs / I.V. Kovalev, A.A. Voroshilova // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, March 04, 2020 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52068. – <https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/1515/5/052068>. – EDN JSTHHQ
 7. Смирнов И.Г. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия / И.Г. Смирнов, Л.А. Марченко, Г.И. Личман, Т.В. Мочкова, А.Ю. Спиридонов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № (3). – С. 10-16. – <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-10-16>
 8. Kovalev I.V. Modern unmanned aerial technologies for the development of agribusiness and precision farming / I.V. Kovalev, N.A. Testoyedov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, June 18–20, 2020 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 548. – Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52080.
– <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052080>. – EDN JZAPPN
 9. Ковалев И.В. Анализ средств спецификации транспортно-технологических циклов БПЛА в умном сельском хозяйстве / И.В. Ковалев, Д.И. Ковалев, В.А. Подошлелова, М.Ф. Иконникова // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 2(92). – С. 80-85. – EDN JBEVZX

10. Kovalev I.V. Statistical analysis of agro-climatic factors of crop failure of agricultural plots / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, Z.E. Shaporova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1112, No. 1. – P. 012093. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012093>. – EDN ANTDZZ
11. Kovalev I.V. Analysis of nonparametric methods for assessing the comparative efficiency of agro-industrial enterprises / I.V. Kovalev, N.V. Zenutkin, A.A. Voroshilova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, June 16–19, 2021 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. Volume 839. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 22097. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/2/022097>. – EDN QUSVVK
12. Zelenkov P.V. Use of innovative space technology in progressive crop production / P.V. Zelenkov, V.V. Brezitskaya, I.V. Kovalev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, June 20–22, 2019 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 315. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 72019. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/7/072019>. – EDN CRGOOX
13. Zhang D.Y. Evaluating effective swath width and droplet distribution of aerial spraying systems on M-18B and Thrush 510 G airplanes / D.Y. Zhang, L.P. Chen, R.R. Zhang, G. Xu, Y.B. Lan // Int J Agric & Biol Eng. – 2015. – № 8(2). – P. 21–30
14. Smith D.B. Uniformity and recovery of broadcast sprays using fan nozzles / D.B. Smith // Transactions of the ASAE. – 1992. – № 35(1). – P. 39-44
15. Kovalev I.V. On the problem of the manned aircraft modification to UAVs / I.V. Kovalev, A.A. Voroshilova, M.V. Karaseva // Journal of Physics: Conference Series: International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019", Krasnoyarsk, September 25–27, 2019 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. Vol. 1399. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 55100. – <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055100>. – EDN JUVXGY
16. Посконин М.В. Анализ различных моделей регуляторов для управления беспилотными летательными аппаратами с получением визуализированных данных об их эффективности / М.В. Посконин, А.О. Калинин, М.Н. Чувашова [и др.] //

- Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений 2017 (СПММОИиПВ-2017) : Труды Международной научной конференции, пос. Дивноморское, г. Геленджик, Краснодарский край, 04–11 сентября 2017 года. Том II. – пос. Дивноморское, г. Геленджик, Краснодарский край: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2017. – С. 220-227. – EDN XWRNPV
17. Подоплелова В.А. Обзор исследований в области ГЕРТ-анализа транспортно-технологических циклов / В.А. Подоплелова // Перспективы молодёжной науки: Материалы международной научной конференции, Красноярск, 25 декабря 2022 года – 30 декабря 2023 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. – С. 116-120. – EDN TMFFCD
 18. Сарамуд М.В. К вопросу классификации автономных беспилотных объектов / М. В. Сарамуд, И. В. Ковалев, В. В. Лосев [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 2, № 13. – С. 64-66. – EDN YQWFBH
 19. Kovalev I.V. To the question on implementation of multi-version execution environment software of onboard autonomous unmanned objects by means of real-time operating system / I.V. Kovalev, V.V. Losev, M.V. Saramud [et al.] // Siberian Journal of Science and Technology. – 2017. – Vol. 18, No. 4. – P. 744-747. – EDN YNZVRN
 20. Kuznetsov P.A. Dangerous failures in multifunctional systems / P.A. Kuznetsov, I.V. Kovalev, P.V. Zelenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific and Research Conference on Topical Issues in Aeronautics and Astronautics (Dedicated to the 55th Anniversary from the Foundation of SibSAU), Krasnoyarsk, April 06–10, 2015. Vol. 94. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012019. – DOI 10.1088/1757-899X/94/1/012019. – EDN VALCGJ
 21. Saramud M.V. Multi-version approach to improve the reliability of processing data of the earth remote sensing in the real-time / M.V. Saramud, I.V. Kovalev, V.V. Losev [et al.] // E3S Web of Conferences: 2018 Regional Problems of Earth Remote Sensing, RPERS 2018, Krasnoyarsk, September 11–14, 2018. Vol. 75. – Krasnoyarsk: EDP Sciences, 2019. – P. 01005. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197501005>. – EDN GAKVUA
 22. Kovalev I.V. Multiversion environment creation for control algorithm execution by autonomous unmanned objects / I.V. Kovalev, P.V. Zelenkov, V.V. Losev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Workshop on

- Mathematical Models and their Applications 2016, IWMA 2016, Krasnoyarsk, 07–09 ноября 2016 года. Vol. 173. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2017. – P. 012025. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/173/1/012025>. – EDN YVPDPB
23. 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 YKCCWL
 24. Ковалев И.В. Анализ периодичных задач при реализации алгоритмов распределенной обработки информации и управления / И. В. Ковалев, О. В. Богданова, Е. Л. Вайтекунене, М. Ю. Царев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 12. – С. 56-58. – EDN JODXBL
 25. Zhang J. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition / J. Zhang, X.K. He, J.L. Song, A. Zeng, A. Zeng, Y. Liu, et al. // Transactions of the CSAM. – 2012. – № 43(12). – P. 94-96
 26. Ru Y. Design and application of electrostatic spraying system / Y. Ru, H.P. Zhou, Z.C. Jia, X.W. Wu, Q.N. Fan // Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition. – 2011. – № 35(1). – P. 91-94
 27. Qiu B.J. Effect of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform / B.J. Qiu, L.W. Wang, D.L. Cai, J.H. Wu, G.R. Ding, X.P. Guan // Transactions of the CSAE. – 2013. – № 29(24). – P. 25-32
 28. Qin W.C. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers / W.C. Qin, B.J. Qiu, X.Y. Xue, C. Chen, Z.F. Xu, Q.Q. Zhou // Crop Protection. – 2016. – № 85. – P. 79-88
 29. Wen S. Analysis and experiment on atomization characteristics of ultra-low-volume swirl nozzle for agricultural unmanned aviation vehicle / S. Wen, Y.B. Lan, J.T. Zhang, S.H. Li, H.Y. Zhang, H. Xing // Transactions of the CSAE. – 2016. – № 32(20). – P. 85-93
 30. Ru Y. Droplet size distribution of aerial nozzle for plant protection in wind tunnel and flight conditions / Y. Ru, C.Y. Zhu, R. Bao, Z.F. Li, T. Ding // Transactions of the CSAE. – 2016. – № 32(20). – P. 94-98

31. Wang C.L. The small single- and multi-rotor unmanned aircraft vehicles chemical application techniques and control for rice fields in China / C.L. Wang, X.K. He, Y.J. Liu // *Aspects of Applied Biology*. – 2016. – № 132. – P. 73-81
32. Wang S.L. Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China / S.L. Wang, J.L. Song, X.K. He, L. Song, X.N. Wang, C.L. Wang, et al. // *Int J Agric & Biol Eng*. – 2017. – № 10(4). – P. 22-31. – <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.3219>
33. Ковалев И.В. К вопросу минимизации затрат в GERT-сетевых моделях транспортно-технологических циклов БПЛА / И. В. Ковалев, Д. И. Ковалев, К. Д. Астанакулов [и др.] // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2023. – Т. 11, № 2(41). – С. 30-31. – <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.014>. – EDN RYOYMW
34. Kozlova M.F. Multi-stage analysis of business processes using GERT-networks / M.F. Kozlova // *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации*. – 2021. – No. 20. – P. 343-345. – EDN FVBQHO
35. Saramud M.V. Development of methods for equivalent transformation of GERT networks for application in multi-version software / M.V. Saramud, P.V. Zelenkov, I.V. Kovalev [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 11–15 April 2016. Vol. 155*. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2016. – P. 012015. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/155/1/012015>. – EDN YVDFAL
36. Kovalev I.V. Computational approach to the structure spectral analysis of GERT-network models of mobile object monitoring systems / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, N.A. Testoyedov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series: III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022), Krasnoyarsk, March 03–05, 2022*. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 52003. – <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052003>. – EDN ORXQBM
37. Ковалев Д.И. Спектральный подход к анализу структуры GERT-сетевых моделей / Д.И. Ковалев, И.В. Ковалев, Т.П. Мансурова [и др.] // *Достижения науки и технологий-ДНиТ-2021: сборник научных статей по материалам Всероссийской научной конференции, Красноярск, 10–11 декабря 2021 года*. – Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники

- Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2021. – С. 319-325. – EDN JIMUBB
38. Ковалев И.В. GERT-сетевой анализ мультиверсионных программных архитектур информационно- управляющих систем / И.В. Ковалев, П.В. Ковалев, А.И. Кудинкин, Ю.А. Нургалева // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 8. – С. 1-7. – EDN MUFZIT
39. Ковалев И.В. Анализ аппарата GERT-сетей для оценки вероятностной составляющей временных характеристик в многоконтурных системах управления АСУ ТП / И.В. Ковалев, В.В. Лосев, А.О. Калинин, М.В. Сарамуд // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий : сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 16–18 ноября 2022 года. – Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2022. – С. 536-541. – EDN NXXKDI
40. Ковалев И.В. Формализация организационной структуры предприятия на основе сетевой GERT-модели / И.В. Ковалев, М.Ф. Иконникова, В.А. Подоплелова // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2023. – № 3. – С. 144-156. – <https://doi.org/10.18137/RNU.V9187.23.03.P.144>. – EDN CTCNNW
41. Xu B. Path planning based on minimum energy consumption for plant protection UAVs in sorties / B. Xu, L.P. Chen, Y. Tan, M. Xu // Transactions of the CSAM. – 2015. – № 46(11). – P. 36-42