

УДК 004.052.3

EDN [WSUSES](#)



<https://www.doi.org/10.47813/mip.5.2023.9.102-110>

Инструментальные средства поддержки расчетов микропроцессорной производительности роя БПЛА

В.А. Подоплелова

Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия
Сочинский государственный университет, Сочи, Россия

E-mail: podoplelovava@mail.ru

Аннотация. В статье представлена апробация GERT-сетевого анализа вероятностно-временных характеристик транспортно-технологических циклов беспилотных летательных аппаратов, которая выполнена при проектировании и реализации комплекса программной поддержки алгоритмов для вычисления микропроцессорной производительности роя дронов. Представлена графическая постановка задачи в виде стохастической схемы процесса и эквивалентная GERT-сеть. На основе топологического уравнения Мейсона для замкнутых потоковых графов вычислена вероятность успешного завершения сети, математическое ожидание и стандартное отклонение. Графическое представление зависимости вероятности успешного завершения процесса от количества мультиверсий демонстрируют эффективность мультиверсионного подхода для отказоустойчивого комплекса программной поддержки алгоритмов для вычисления микропроцессорной производительности роя беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, микропроцессорная производительность, GERT-сеть, вероятностно-временные характеристики.

Tools for supporting calculations of the microprocessor performance of a swarm of UAVs

V.A. Podoplelova

Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
Sochi State University, Sochi, Russia

E-mail: podoplelovava@mail.ru

Abstract. The article presents an approbation of the GERT-network analysis of the probabilistic-temporal characteristics of the transport-technological cycles of unmanned aerial vehicles, which was carried out during the design and implementation of a software support complex for algorithms for calculating the microprocessor performance of a swarm of drones. A graphical statement of the problem is presented in the form of a stochastic process diagram and an equivalent GERT network. Based on the topological Mason equation for closed flow graphs, the probability of successful completion of the network, the mathematical expectation and the standard deviation are calculated. A graphical representation of the dependence of the probability of successful completion of the process on the number of multiversions demonstrates the effectiveness of the multiversion approach for a fault-tolerant complex of software support for algorithms for calculating the microprocessor performance of a swarm of unmanned aerial vehicles.

Keywords: unmanned aerial vehicle, microprocessor performance, GERT network, probabilistic-temporal characteristics.

1. Введение

В работе [1] рассматривается анализ микропроцессорной производительности при роевом применении дронов-распылителей в точном земледелии. Показано, что для определения оптимального числа беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в рое необходимо знать, как зависит производительность, или пропускная способность этой системы от числа бортовых и наземных микропроцессоров. Отмечается, что реализация отказоустойчивого программного обеспечения (ПО) на основе мультиверсионного подхода позволяет повысить надежность выполнения транспортно-технологических циклов (ТТЦ) БПЛА, однако требует программной избыточности и дополнительных программно-аппаратных сред исполнения мультиверсионного ПО [2-5].

В данной работе представлены процедуры анализа вероятностно-временных характеристик отказоустойчивого программного обеспечения транспортно-технологических циклов БПЛА, реализованные в виде инструментальных средств поддержки расчетов (ИСПР) оптимальной микропроцессорной производительности роя БПЛА. Отказоустойчивость ПО обеспечивается на основе мультиверсионной методологии. Мультиверсионность исполнения программных компонент обеспечивает функционирование системы независимо от скрытых ошибок отдельных версий.

В работах [6-9] показана применимость GERT-сетевых моделей для спецификации и оптимизации затрат при формировании ТТЦ БПЛА, имеющих различное назначение. Очевидно, что анализ микропроцессорной производительности роя БПЛА целесообразно проводить с использованием вероятностно-временных характеристик ТТЦ [10]. Для выполнения анализа предлагается комплекс программной поддержки алгоритмов (КППА) для вычисления микропроцессорной производительности роя БПЛА.

2. Материалы и методы

В данной работе рассматривается апробация предложенного GERT-анализа вероятностно-временных характеристик (ВВХ) ТТЦ. Данная апробация выполнена при проектировании и реализации КППА для вычисления микропроцессорной производительности роя БПЛА. Рассмотрим фрагмент блок-схемы алгоритма, приведенный на рисунке 1а.

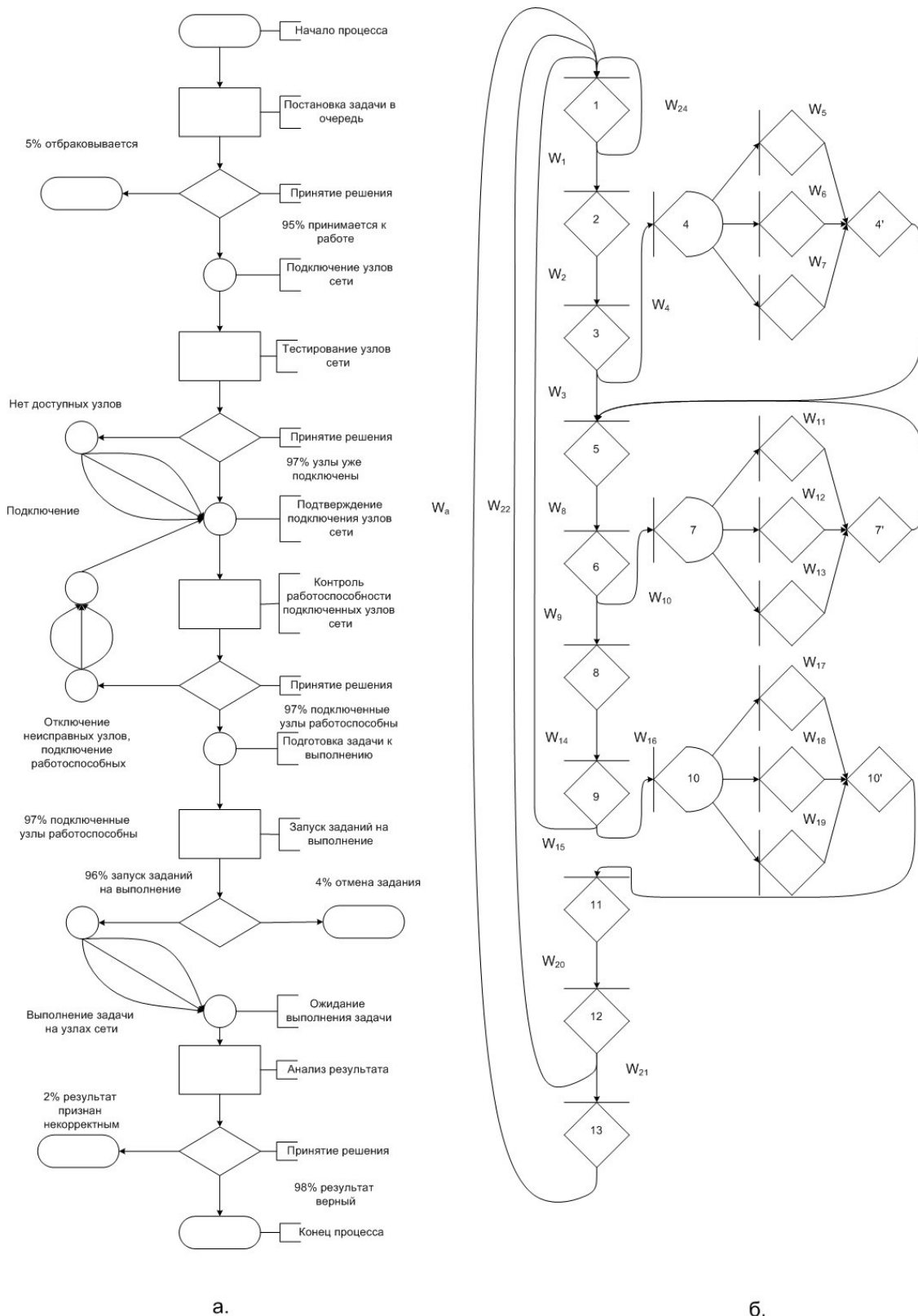


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма: а – стохастическое представление; б – GERT-сетевое представление процесса.

Данный фрагмент включает операции, связанные с постановкой задач в очередь,

принятия решений, подключения узлов среды исполнения КППА, тестирования, контроля работоспособности подключенных узлов, подготовки и запуска заданий на выполнение, ожидания выполнения задач, анализа результатов. Схема также включает блоки отклонения неисправных узлов, подключения работоспособных и анализа доступности узлов КППА в каждый момент времени при исполнении мультиверсий программных модулей.

На рисунке 1б представлена итоговая GERT-сеть после ряда эквивалентных преобразований, которые выполнены с учетом необходимых и достаточных условий функционирования мультиверсионного модуля ПО [11]. Результат проведенных эквивалентных преобразований, которые позволили упростить GERT-сеть, представлен на рисунке 1б.

Используя топологическое уравнение Мейсона для замкнутых потоковых графов [12], далее можно вычислить вероятность успешного завершения сети $P_{успешн.}$, матожидание и стандартное отклонение.

3. Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены модельные результаты расчетов. Данные расчеты получены для модели, которая описывается GERT-сетью, рассмотренной на рисунке 1б. В данном случае представлено модельное описание алгоритма КППА для вычисления микропроцессорной производительности роя БПЛА после эквивалентных преобразований сети.

Таблица 1. Модельные результаты расчетов для GERT-сети, описывающей процесс на рисунке 1а.					
Уровень мультиверсионности модулей КППА (шт.)			$P_{успешн.}$	Длительность функционирования	СКО
Подключено	Протестировано	Запуски	p	t , (мин.)	σ , (мин.)
4	4	4	0,7879	12,3842	4,2148
7	4	4	0,7931	12,3857	4,2177
10	5	5	0,8121	12,3866	4,2184
11	4	4	0,7891	12,3866	4,2193
14	4	4	0,8001	12,3872	4,2200
17	4	4	0,7883	12,3872	4,2207
5	5	4	0,8018	12,3933	4,2234
4	10	5	0,8010	12,3983	4,2278
4	13	4	0,7806	12,4012	4,2300
4	14	4	0,8001	12,4022	4,2312

4	17	4	0,7701	12,4031	4,2318
3	3	6	0,9021	12,4131	4,2776
3	3	9	0,9521	12,4275	4,3095
3	3	12	0,9632	12,4354	4,3258
3	3	15	0,9759	12,4393	4,3341
3	3	18	0,9869	12,4416	4,3383
4	4	4	0,6612	17,0739	5,5273
5	4	4	0,6637	17,0768	5,5317
10	4	4	0,6650	17,0771	5,5340
13	4	4	0,6657	17,0782	5,5352
16	4	4	0,6660	17,0784	5,5358
19	4	4	0,6611	17,0783	5,5361
4	5	4	0,6457	17,0862	5,5400
4	8	4	0,6958	17,0931	5,5465
4	10	4	0,7018	17,0972	5,5498
4	14	4	0,7673	17,0991	5,5515
4	17	4	0,7832	17,1000	5,5524
4	4	5	0,8787	17,2213	5,7442
4	4	10	0,9346	17,2988	5,8555
4	4	13	0,9678	17,3389	5,9126
4	4	16	0,9776	17,3595	5,9418
4	4	19	0,9898	17,3701	5,9568

Графики, представленные на рисунка 2 и 3, демонстрируют эффективность мультиверсионного подхода для отказоустойчивого комплекса программной поддержки алгоритмов для вычисления микропроцессорной производительности роя БПЛА.

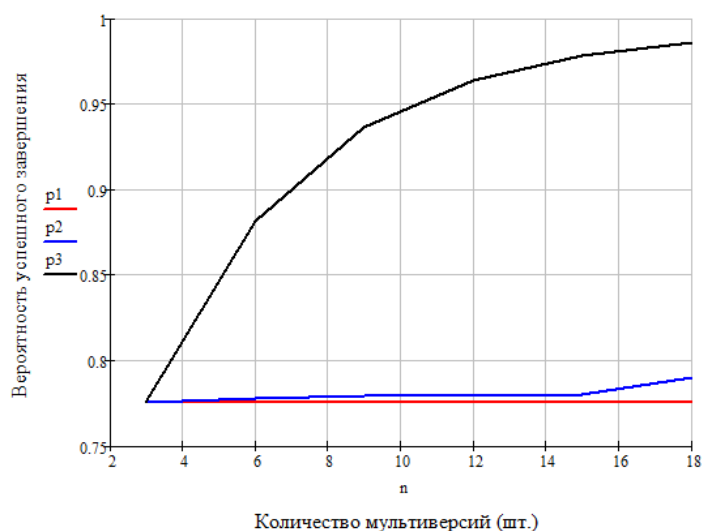


Рисунок 2. Графики зависимости вероятностных характеристик от количества мультиверсионных модулей ПО.

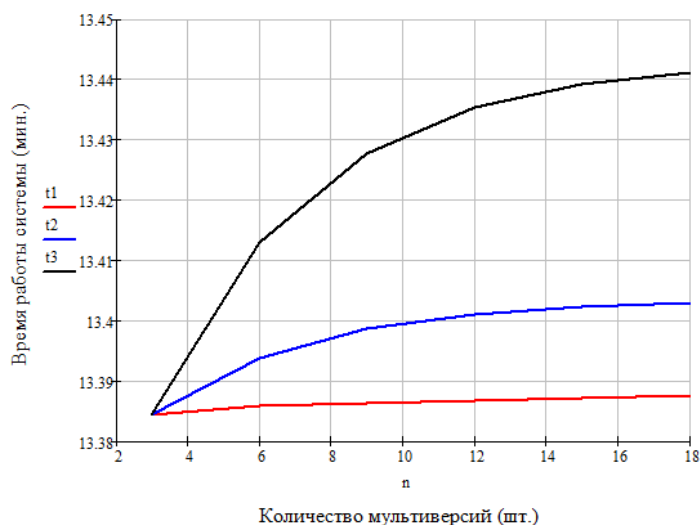


Рисунок 3. Графики зависимости временных характеристик работы инструментальных средств от количества мультиверсионных модулей ПО.

Можно отметить, что вероятность успешного завершения процесса в КППА, построенном на основе мультиверсионной архитектуры, возрастает. При этом в процессе реализации мультиверсионных модулей увеличивается время исполнения мультиверсий в среде КППА. Таким образом, возрастает не только время работы системы, но и среднеквадратичное отклонение (СКО). Это происходит в связи с тем, что возрастает уровень межпроцессорного взаимодействия с ростом количества мультиверсий программных модулей.

4. Заключение

Анализ результатов, представленный в данной статье, характеризует отказоустойчивость реализованных ИСПР в рамках КППА для вычисления микропроцессорной производительности роя БПЛА. Показана возможность применения при проведении расчетов ВВХ ТТЦ методики GERT-сетевое анализа. Влияние ТТЦ БПЛА в случае их роевого применения на микропроцессорную производительность БПЛА в рое является существенным, поэтому применение методики GERT-сетевое анализа как на этапе описания ТТЦ БПЛА, так и на этапе реализации КППА позволяет на единой методологической базе выполнить поддержку расчетов микропроцессорной производительности роя БПЛА в режиме реального времени, обеспечивая необходимый уровень отказоустойчивости ПО.

Модельные результаты (см. таблицу 1 и рисунки 1 и 2), полученные при помощи

GERT-сетевых моделей, хорошо согласуются с экспериментальными результатами. В [13-16] экспериментальные данные были получены в имитационной среде моделирования и исполнения мультиверсионных программных модулей. Отметим, что предложенный алгоритм вычисления ВВХ ТТЦ является более эффективным по сравнению с известными алгоритмами, исходя из критерия вычислительной сложности. Это является важным фактором при решении задачи оптимизации микропроцессорной производительности при роевом применении БПЛА.

Список литературы

1. Ковалев Д.И. Анализ микропроцессорной производительности при роевом применении дронов-распылителей в точном земледелии / Д.И. Ковалев, В.А. Подоплелова, Т.П. Черкасова // Российская наука, инновации, образование (РОСНИО-II-2023) : Сборник научных статей по материалам II Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием, Красноярск, 15–17 июня 2023 года. – Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2023. – С. 190-197. – EDN SPVOQL. <https://www.doi.org/10.47813/rosnio-II.2023.8.190-197>
2. 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. – EDN YVPDPB. <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/173/1/012025>
3. Ковалев И.В. Методология оценки и повышения надежности программно-информационных технологий и структур: монография / И.В. Ковалев, Т.И. Семенько, Р.Ю. Царев, 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.
4. 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.
5. Ковалёв П.В. Определение надежности мультиверсионного программного обеспечения с использованием методов анализа сетей / П.В. Ковалёв, А.Н. Лайков, С.Н. Гриценко // Вестник СибГАУ. Вып.1(22) в 2 частях. – Красноярск, 2009. Часть 2. – С. 55-60.
 6. Ковалев И.В. Анализ средств спецификации транспортно-технологических циклов БПЛА в умном сельском хозяйстве / И.В. Ковалев, Д.И. Ковалев, В.А. Подоппелова, М.Ф. Иконникова // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 2(92). – С. 80-85. – EDN JBEVZX.
 7. 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. – EDN RYOYMW. <https://www.doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.014>
 8. Ковалев И.В. Формализованный подход к проектированию микропроцессорных систем с элементами человеко-машинного взаимодействия / И.В. Ковалев, В.В. Лосев, А.О. Калинин // Современные инновации, системы и технологии. – 2023. – Т. 3, № 2. – С. 243-253. – EDN YEMKEW. <https://www.doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-2-0243-0253>
 9. Ковалев И.В. Использование метода роя частиц для формирования состава мультиверсионного программного обеспечения / И.В. Ковалев, Е.В. Соловьев, Д.И. Ковалев и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 3. – С. 1-6. – EDN TLFCSJ.
 10. Kovalev I.V. 2022 GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, A.A.Voroshilova, V.A. Podoplelova, D.A. Borovinsky // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022. – 1076. – 012055. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1076/1/012055>
 11. Kovalev I.V. Deriving the optimal structure of N-version software under resource requirements and cost/timing constraints / I.V. Kovalev, K.E. Grosspietsch // Proceedings of the 26th Euromicro Conference. EUROMICRO 2000. Informatics: Inventing the Future,

2000. – P. 200-207. – EDN SLWZWB.
<https://www.doi.org/10.1109/EURMIC.2000.874419>
12. 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. – 2016. – Vol. 155. – P. 012015. – EDN YVDFAL. <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/155/1/012015>
13. Ковалёв П.В. Графоаналитический метод анализа мультиверсионных архитектур программного обеспечения / П.В. Ковалев, И.А. Капчинский, С.Н. Гриценко // Вестник СибГАУ. Вып.3(24). – Красноярск, 2009. – 37-39 с.
14. Saramud M.V. Software interfaces and decision block for the execution environment of multi-version software in real-time operating systems / M.V. Saramud, I.V. Kovalev, V.V. Losev, M.O. Petrosyan // International Journal on Information Technologies and Security. – 2018. – Vol. 10, No. 1. – P. 25-34. – EDN PAJLCS.
15. 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, Rostov-on-Don. – 2017. – Vol. 132. – P. 04011. – EDN XNKSVN. <https://www.doi.org/10.1051/matecconf/201713204011>.
16. Ковалев И.В. Анализ тестовых задач мультиверсионного формирования отказоустойчивых программных систем / И.В. Ковалев, Д.И. Ковалев, Н.Д. Амбросенко, Д.В. Боровинский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, № 2(37). – EDN UKHCZR. <https://www.doi.org/10.26102/2310-6018/2022.37.2.003>.