

УДК 004.942

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.1003>

EDN

[YTSYMZ](#)

Ресурсно-временной анализ транспортно-технологических циклов на основе GERT-сетевого моделирования

В.А. Подоплелова*

Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90,
Красноярск, 660049, Россия
Сочинский государственный университет, ул. Пластунская, 94, Сочи,
354003, Россия

*E-mail: podoplelovava@mail.ru

Аннотация. В статье представлен метод ресурсно-временного анализа транспортно-технологических циклов на основе GERT-сетевого моделирования. Рассмотрены две модели: базовая GERT с учетом только временного фактора и расширенная MTP-GERT (Multiple Transfer Parameters GERT), учитывающая время выполнения операций и потребляемые ресурсы. Предложены методы анализа неопределенности процесса реализации транспортно-технологических циклов: на основе дисперсии для однофакторного анализа и на основе ковариации для многофакторного анализа. Показано, что метод на основе ковариации позволяет получить более полную картину влияния различных факторов на неопределенность процесса реализации транспортно-технологических циклов. Применение данного подхода дает возможность выявить критические операции транспортно-технологического цикла и предоставить лицам, принимающим решения, надежную информацию для оптимизации процессов. Результаты исследования могут быть использованы для повышения эффективности управления сложными техническими системами.

Ключевые слова: GERT-сетевое моделирование, GERT-сетевой анализ, ресурсно-временной анализ.

Resource-time analysis of transport-technological cycles based on GERT-network modeling

V.A. Podoplelova*

Krasnoyarsk State Agrarian University, 90 Mira Avenue, Krasnoyarsk, 660049,
Russia
Sochi State University, Plastunskaya St., 94, Sochi, 354003, Russia

*E-mail: podoplelovava@mail.ru

Abstract. The article presents a method for resource-time analysis of transport-technological cycles based on GERT modeling. Two models are considered: the basic GERT taking into account only the time factor and the extended MTP-GERT (Multiple Transfer Parameters GERT) taking into account the time of operations and consumed resources. Methods for analyzing the uncertainty of the process of implementing transport-technological cycles are proposed: based on variance for single-factor analysis and based on covariance for multifactor analysis. It is shown that the method based on covariance allows obtaining a more complete picture of the influence of various factors on the uncertainty of the process of implementing transport-technological cycles. The use of this approach makes it possible to identify critical operations of the transport-technological cycle and provide decision makers with reliable information for process optimization. The results of the study can be used to improve the efficiency of complex technical systems management.

Keywords: GERT network modeling, GERT network analysis, resource-time analysis.

1. Введение

Транспортно-технологические циклы (ТТЦ) представляют собой сложные процессы, характеризующиеся высокой степенью неопределенности [1-3]. Эта неопределенность обусловлена разнообразием операционной среды, ограничениями по ресурсам и пространству, многовариантностью выполнения операций, а также различными случайными факторами [4, 5]. Все эти аспекты напрямую влияют на анализ и оптимизацию ТТЦ, затрудняя эффективное прогнозирование таких ключевых параметров, как время выполнения операций и потребность в ресурсах.

Как отмечается в [6], традиционные методы моделирования, такие как IDEF, сети Петри и PERT, хотя и позволяют описать структуру ТТЦ, не дают возможности провести полноценный анализ неопределенности процесса. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых подходов, способных учесть стохастическую природу ТТЦ и оценить влияние различных факторов на общую неопределенность процесса.

Метод графической оценки и анализа (GERT) представляет собой перспективный инструмент для моделирования сложных стохастических сетей с логическими узлами и направленными ветвями. GERT позволяет учесть вероятностный характер выполнения операций и их параметров, что делает его особенно подходящим для анализа ТТЦ [7].

В данной работе предлагается использовать расширенную версию GERT - MTP-GERT (Multiple Transfer Parameters GERT [5]) для построения модели ТТЦ, учитывающей как временные, так и ресурсные параметры операций [8-10]. На основе этой модели разрабатывается метод анализа чувствительности, позволяющий оценить вклад отдельных операций в общую неопределенность процесса реализации ТТЦ.

Предлагаемый подход направлен на решение актуальной задачи повышения эффективности управления ТТЦ путем выявления критических операций и предоставления лицам, принимающим решения (ЛПР), более надежной прогнозной информации для оптимизации процессов.

2. Методы и материалы исследования

В данном исследовании для ресурсно-временного анализа транспортно-технологических циклов применяются метод графической оценки и анализа и его модификация – метод оценки множественных параметров (MTP-GERT).

Для моделирования транспортно-технологического цикла с учетом только временного фактора используется базовая модель GERT [11]. Основными элементами модели являются узлы, представляющие логические операции, и направленные ветви, соответствующие отдельным операциям цикла. Каждая операция характеризуется вероятностью выполнения и передаточной W -функцией.

Для учета как временных, так и ресурсных параметров применяется расширенная модель MTP-GERT [5]. В этой модели каждая операция характеризуется временем выполнения и количеством потребляемых ресурсов. Предполагается линейная зависимость между временем и ресурсами.

Для анализа неопределенности используются два метода. Метод на основе дисперсии применяется для однофакторного анализа, где оценивается влияние изменения времени отдельной операции на общую дисперсию длительности процесса. Метод на основе ковариации используется для многофакторного анализа, где учитывается взаимосвязь между временем и ресурсами операций.

Применение данных методов позволяет выявить критические операции транспортно-технологического цикла и оценить их влияние на общую неопределенность процесса с учетом временных и ресурсных ограничений. Это дает возможность более точно моделировать сложные стохастические процессы и предоставлять надежную информацию для принятия управленческих решений по оптимизации транспортно-технологических циклов [12-14].

3. Результаты и обсуждение

MTP-GERT, являясь расширенной версией базовой модели GERT, позволяет учитывать несколько параметров при ресурсно-временном анализе ТТЦ. Таким образом, в рамках данного исследования будем использовать MTP-GERT для моделирования ТТЦ с учетом двух факторов: времени выполнения транспортно-технологических операций (ТТО) и потребляемых ресурсов на их выполнение [15-17].

Рассмотрим основные особенности MTP-GERT моделирования. Отметим, что базовый элемент модели представляет собой ТТО (i, j) со следующими параметрами:

- t_{ij} - время выполнения операции;
- c_{ij} - количество потребляемых ресурсов;
- p_{ij} - вероятность выполнения операции.

Передаточная функция для операции (i, j) имеет вид:

$$W_{ij}(s_1, s_2) = p_{ij}M_{ij}(s_1, s_2),$$

где $M_{ij}(s_1, s_2)$ – производящая функция моментов для операции (i, j) , (s_1, s_2) – параметры, соответствующие времени и ресурсам.

При анализе используется линейная зависимость между временем и ресурсами:

$$c_{ij} = kt_{ij} + k_0$$

где k и k_0 – константы.

Производящая функция моментов для допустимой реализации ТТЦ представляется, как:

$$M_E(s_1, s_2) = W_E(s_1, s_2) / P_E,$$

где $W_E(s_1, s_2)$ – эквивалентная передаточная функция всего процесса реализации ТТЦ, P_E – вероятность выполнения ТТЦ.

Использование МТР-GERT позволяет моделировать ТТЦ, учитывая взаимосвязь между временем выполнения ТТО и потребляемыми ресурсами. Это дает возможность проводить более детальный анализ неопределенности процесса реализации ТТЦ и выявлять критические операции с учетом нескольких факторов.

Одним из методов анализа неопределенности процесса реализации ТТЦ является метод на основе дисперсии [18, 19]. Данный метод используется для однофакторного анализа неопределенности и обладает следующими характеристиками:

- анализируется только фактор времени выполнения операций ТТЦ;
- используется базовая модель GERT;
- индекс чувствительности рассчитывается как:

$$S_i = \text{Var}(T) \text{Var}(T_i),$$

где $\text{Var}(T_i)$ – дисперсия длительности процесса реализации ТТЦ при изменении времени i -й операции; $\text{Var}(T)$ – общая дисперсия длительности процесса реализации ТТЦ.

Используя метод на основе ковариации [20, 21], можно реализовать многофакторный анализ неопределенности. Отметим ключевые аспекты данного подхода:

- учет двух факторов: время выполнения операций ТТЦ и потребляемые ресурсы;
- использование расширенной модели МТР-GERT;
- возможность определения индекса чувствительности, который представляется в следующем виде:

$$S_i = \left| \frac{Cov(C_i, T_i)}{Cov(C, T)} \right|,$$

где $Cov(C_i, T_i)$ – ковариация времени и ресурсов для i -й ТТО, $Cov(C, T)$ – общая ковариация времени и ресурсов процесса реализации ТТЦ.

То есть, для заданного ТТЦ изменение общей продолжительности цикла, вызванное изменением времени ТТО или ресурсным обеспечением, может быть получено отдельно. Для ТТО X_j соответственно определим время и ресурсы реализации ТТЦ – T_i и C_i . Общая продолжительность процесса реализации ТТЦ – T , ресурсы – C . Тогда индекс чувствительности S_i является отношением ковариации $Cov(C_i, T_i)$ определенного времени реализации ТТЦ и ресурсов для этой реализации и ковариации $Cov(C, T)$, соответствующей допустимой реализации полного транспортно-технологического цикла.

Подход на основе ковариации позволяет получить ЛПР более полную картину влияния различных факторов на неопределенность процесса реализации ТТЦ, учитывая взаимосвязь между временем выполнения операций и потребляемыми ресурсами.

4. Заключение

В работе представлен один из подходов к анализу неопределенности процесса реализации ТТЦ на основе GERT моделирования. Рассмотрена модель на основе базовой GERT сети с учетом только фактора времени и модель на основе MTP-GERT, учитывающая факторы времени и ресурсов. Выполнен анализ неопределенности процесса реализации ТТЦ на основе дисперсии для однофакторного анализа и на основе ковариации для многофакторного анализа. Следует отметить, что анализ на основе ковариации дает индекс чувствительности влияния факторов, а результаты многофакторного анализа удобны на практике.

Предложенный подход позволяет эффективно решать задачу оценки неопределенности процессов реализации ТТЦ, так как многофакторный анализ с использованием ковариации дает более полную и достоверную картину влияния различных операций на общую неопределенность процесса реализации ТТЦ. Это позволяет выявлять наиболее критичные операции ТТЦ и предоставлять лицам, принимающим решения, более надежную прогнозную информацию для оптимизации ТТЦ.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на учет большего числа факторов неопределенности, а также разработку методов оптимизации ТТЦ на основе полученных результатов анализа и применение предложенного подхода к различным сложным техническим системам.

Список литературы

1. Подоплелова, В. А. Обзор исследований в области Герт-анализа транспортно-технологических циклов / В. А. Подоплелова // Перспективы молодежной науки: Материалы международной научной конференции (г. Красноярск, 25 декабря 2022 г.). – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. – С. 116-120. – EDN: TMFFCD.
2. Podoplelova, V. A. Review of research in the field of GERT analysis of transport and technological cycles / V. A. Podoplelova // Инновационные тенденции развития российской науки: Материалы XVI Международной научно-практической конференции молодых ученых (г. Красноярск, 29-31 марта 2023 г.). – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. – С. 785-788. – EDN: GCCTJM.
3. Li, Zh. Analysis of the Transmission of Project Duration and Cost Impacts Based on the GERT Network Technique / Zh. Li, X. Nie, B. Wang, T. Fan // Symmetry. – 2019. – V. 11. – № 3. – P. 337.
4. Wang, Zh. Research on SoS-GERT Network Model for Equipment System of Systems Contribution Evaluation Based on Joint Operation / Zh. Wang, S. Liu, Zh. Fang // IEEE Systems Journal. – 2020. – V. 14. – № 3. – P. 4188-4196.
5. Wu, Y. Multi-parameters uncertainty analysis of logistic support process based on GERT / Y. Wu, X. Pan, R. Kang, C. He and L. Gong // Journal of Systems Engineering and Electronics – 2014 – V. 25 – № 6 – P. 1011-1019 – DOI: 10.1109/JSEE.2014.00116.
6. Иконникова, М. Ф. Сравнительный анализ вероятностных показателей бизнес-процессов методами GERT-сетевого и имитационного моделирования / М. Ф. Иконникова, И. В. Ковалев, В. А. Подоплелова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2024. – № 3. – С. 30-37. – DOI: 10.25791/asu.3.2024.1494. – EDN: EXAUPB.
7. 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. 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. – DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.014. – EDN: RYOYMW.
 9. 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. – DOI: 10.18137/RNU.V9187.23.03. P.144. – EDN: CTCNNW.
 10. Зырянов, А.А. Трансляция модели бизнес-процессов в нотации ARIS eEPC в GERT-сеть / А.А. Зырянов, М.Г. Доррер // Труды XI Международной конференции «ФАМЭБ-2012». – Красноярск: НИИППБ, СФУ, 2012. – С. 186-192.
 11. Tsepkova, M.I. Time characteristics assessment of performance of information processing system using modified GERT-network / M.I. Tsepkova // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1353. – №. 1. – P. 012106. – EDN: ODSEYI.
 12. Ковалев, И.В. Анализ средств спецификации транспортно-технологических циклов БПЛА в умном сельском хозяйстве / И. В. Ковалев, Д. И. Ковалев, В. А. Подоплелова, М. Ф. Иконникова // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 2(92). – С. 80-85. – EDN: JBEVZX.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Доррер, М.Г. Оценка числовых характеристик GERT-сети на основе эквивалентных преобразований / М.Г. Доррер, А.А. Зырянов // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 1 (4). – С. 175-184.

16. Филлипс, Д. Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас; пер. с англ. Е.Г. Коваленко, М.Г. Фуругяна. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
17. Neumann, K. Stochastic Project Networks: Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization / K. Neumann. – Berlin: Springer-Verlag, 1990. – 237 p.
18. Жилин, С.И. Решение задач дисперсионного и ковариационного анализа методом центра неопределенности / С.И. Жилин // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – № 1-2. – С. 54-57.
19. Боровикова, О. В. Применение моделей дисперсионного и ковариационного анализа в управлении качеством / О. В. Боровикова // Актуальные проблемы экономического развития: сборник докладов XI Международной заочной научно-практической конференции (г. Белгород, 01 сентября - 01 ноября 2020 г.). – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 75-79.
20. Горленко, О. А. Ковариационный анализ / О. А. Горленко, Н. М. Борбаць // Справочник. Инженерный журнал. – 2019. – № S1. – С. 1-20. – DOI: 10.14489/hb.sup.2019.01.pp.001-020. – EDN: VQSNVK.
21. Туровский, Я. А. Развитие метода повышения частотного разрешения на основе ковариационного анализа / Я. А. Туровский, С. В. Борзунов, А. А. Вахтин // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPA-2022): материалы 24-я Международной конференции (г. Москва, 30 марта - 01 апреля 2022 г.), выпуск: XXIV. – Москва: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2022. – С. 211-215. – EDN: TRPZIB.