

УДК 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.41.2.014](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.014)

К вопросу минимизации затрат в GERT-сетевых моделях транспортно-технологических циклов БПЛА

И.В. Ковалев^{1,2,3}, Д.И. Ковалев^{1,4}✉, К.Д. Астанакулов⁴, В.А. Подоплелова^{1,5},
М.Ф. Иконникова²

¹Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск,
Российская Федерация

²СибГУ имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

⁴Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства,
Ташкент, Республика Узбекистан

⁵Сочинский государственный университет, Сочи, Российская Федерация
grimm7jow@gmail.com✉

Резюме. В статье рассматривается применение графоаналитического метода оценки и пересмотра планов для GERT-сетевого моделирования транспортно-технологических циклов беспилотных летательных аппаратов, применяемых в системе точного земледелия. Предложено формальное описание модели и алгоритм поиска оптимальной реализации транспортно-технологического цикла БПЛА, позволяющий минимизировать затраты на его выполнение с учетом характеристик производственных ситуаций, возникающих в системе точного земледелия при применении БПЛА. Метод формализации основывается на рассмотрении транспортно-технологического цикла БПЛА как ациклической GERT-сети с истоком и стоками. Так как рассматривается стохастическая динамическая структура транспортно-технологического цикла, то предусматривается возможность введения случайных событий при его реализации и выполнении нескольких последовательных циклов. При этом минимум возможных затрат при выполнении этих транспортно-технологических циклов должен удовлетворять критерию оптимальности. Предлагается, с учетом конечного числа этапов реализации транспортно-технологических циклов БПЛА, на этапе оптимизации перейти к сокращению затрат с помощью итерационной процедуры, в результате которой лицо, принимающее решение, используя решающую GERT-сеть, сможет выбрать реализацию транспортно-технологического цикла, минимизирующую затраты на его реализацию. В работе предложена алгоритмическая процедура, обеспечивающая выбор наилучшего возможного решения, что способствует повышению эффективности формирования, анализа и управления транспортно-технологическими циклами БПЛА, так как позволяет более полно учесть характеристики производственных ситуаций в системах точного земледелия с применением беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: GERT-сеть, моделирование, минимизации затрат, беспилотный летательный аппарат, транспортно-технологический цикл.

Для цитирования: Ковалев И.В., Ковалев Д.И., Астанакулов К.Д., Подоплелова В.А., Иконникова М.Ф. К вопросу минимизации затрат в GERT-сетевых моделях транспортно-технологических циклов БПЛА. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(2). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1362> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.014

On the issue of cost minimization in GERT-network models of UAV transport and technological cycles

I.V. Kovalev^{1,2,3}, D.I. Kovalev^{1,4}✉, K.D. Astanakulov⁴, V.A. Podoplelova^{4,5},
M.F. Ikonnikova²

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

⁴Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Tashkent,
the Republic of Uzbekistan

⁵Sochi State University, Sochi, the Russian Federation
grimm7jow@gmail.com✉

Abstract. The article discusses the use of a graphic-analytical method for evaluating and revising plans for GERT-network modeling of transport and technological cycles of unmanned aerial vehicles utilized in the precision farming system. A formal description of the model and an algorithm for searching for the optimal implementation of the UAV transport and technological cycle are proposed, which allows minimizing the costs of its implementation taking into account the characteristics of production situations that arise in the precision farming system when using the UAV. The formalization method is based on the notion of the UAV transport and technological cycle as an acyclic GERT network with a source and sinks. Since the stochastic dynamic structure of the transport-technological cycle is considered, the possibility of introducing random events during its implementation and the execution of several successive cycles is provided. At the same time, the minimum possible costs when performing these transport and technological cycles must satisfy the optimality criterion. It is suggested to switch to cost reduction by means of an iterative procedure at the optimization stage taking into account the finite number of UAV transport and technological cycle implementation stages. As a result, the decision maker, employing the decision GERT network, will be able to choose the implementation of the transport and technological cycle that minimizes costs for its implementation. The paper proposes an algorithmic procedure that ensures the choice of the best possible solution, which helps to increase the efficiency of formation, analysis and management of UAV transport and technological cycles, as it enables full consideration of the characteristics of production situations in precision farming systems using unmanned aerial vehicles.

Keywords: GERT-network, modeling, cost minimization, unmanned aerial vehicle, transport and technological cycle.

For citation: Kovalev I.V., Kovalev D.I., Astanakulov K.D., Podoplelova V.A., Ikonnikova M.F. On the issue of cost minimization in GERT-network models of UAV transport and technological cycles. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1362> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.014 (In Russ.).

Введение

Графоаналитический метод оценки и пересмотра планов, основанный на GERT-сетевых моделях [1], успешно зарекомендовал себя при решении многих задач, связанных с моделированием технологических, экономических, производственных процессов, построением моделей функционирования программных и информационно-управляющих систем [2-8]. В [9] отмечается, что стохастический анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) важен на современном этапе развития технологий точного земледелия, в частности, при дифференцированном внесении пестицидов и удобрений, когда БПЛА выполняет полетное задание в соответствии с заданной программой обработки поля.

В работах [9-11] показано, что задачу минимизации возможных затрат на реализацию транспортно-технологического цикла (ТТЦ), описанного в виде GERT-сети, можно свести к стохастической динамической задаче программирования. Однако такой подход является трудным, с точки зрения вычислительных затрат [12], и он так же является единственным применимым подходом в случае, когда GERT-сеть представляет собой допустимую EOR-сеть [13], то есть включает выполнение условий независимости и обладает Марковскими свойствами для допущений сети.

В работе предлагается использовать формализацию GERT-сетевой модели ТТЦ для минимизации затрат на его реализацию. Данная формализация позволяет учитывать стохастическую динамическую структуру ТТЦ. В [14] анализ представлен для простой детерминированной GERT-сетевой модели, так как она задается GERT-подобной узловой логикой, на базе которой генерируется решающая модель общего вида, позволяющая лицу, принимающему решение (ЛПР), выбрать реализацию ТТЦ, минимизирующую затраты. Фактически, решающая модель определяет набор операций ТТЦ, которые должны быть выполнены, чтобы минимизировать суммарные затраты на реализацию ТТЦ и, если необходимо, временные характеристики. Подобная постановка задачи комбинаторной оптимизации, как частный случай, представлена в [13] для анализа СРМ-модели (Critical path method – метод критического пути) с двумя типами узлов (AND и OR). Каждая операция (узел сети) имеет входную и выходную функции активации. Отметим, что именно эти функции влияют на параметры операций (активируемых узлов). Определено, что AND-функция соответствует активации узла при выполнении всех дуг, входящих в него. Для OR-функции представлены две модификации: IOR-функция и EOR-функция. IOR-функция инициирует операцию (активирует узел), если выполняется любая дуга, входящая в него, а EOR-функция инициирует операцию (активирует узел), если выполняется любая дуга, входящая в него, но при условии, что в данный момент времени может выполняться только одна дуга, входящая в данный узел.

Учитывая, что рассматривается стохастическая динамическая структура ТТЦ, следует предусмотреть возможность введения случайных событий при его реализации и выполнении нескольких последовательных ТТЦ. При этом минимум возможных затрат при выполнении этих ТТЦ должен удовлетворять критерию оптимальности. Учитывая конечное число шагов реализации ТТЦ, на этапе оптимизации можно перейти к сокращению затрат в рамках итерационной процедуры. В [14-17] отмечается, что минимизация времени в GERT-моделях является вопросом более сложным, чем минимизация затрат.

Цель данного исследования заключается в разработке алгоритма минимизации затрат в GERT-сетевых моделях транспортно-технологических циклов БПЛА, учитывающего стохастическую динамическую структуру ТТЦ, возможность случайных событий при его реализации, а также возможность выполнения нескольких последовательных ТТЦ.

Поставленная цель достигается путем решения следующих задач:

- расширить формальный аппарат GERT- сетевого моделирования для стохастического анализа транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов;
- формализовать постановку задачи минимизации затрат на реализацию ТТЦ, представленного в виде решающей GERT-сети, при выполнении условий узловой логики для *допустимых* реализаций;
- разработать алгоритм выбора наилучшего возможного решения при минимизации затрат в GERT-сетевых моделях ТТЦ БПЛА, позволяющий лицу,

принимающему решение, выбрать на базе решающей GERT-сети *допустимую* реализацию, минимизирующую затраты.

Метод

Метод формализации основывается на рассмотрении транспортно-технологического цикла БПЛА как ациклической сети N с истоком и стоками, где V – множество узлов, E – множество дуг, r – исток, который соответствует началу реализации ТТЦ, s – сток, который соответствует успешному завершению всех операций ТТЦ. В сети N могут существовать еще несколько стоков, не приводящих к успешному завершению ТТЦ из-за некорректного завершения операций или прерывания процесса их реализации. В такой сети N , используемой для решения поставленной задачи (в [13] она называется решающей GERT-сетью), для узла i введены входные характеристики $X_i^- \in \{0, 1, \dots, |P(i)|\}$ и выходные характеристики $X_i^+ \in \{0, 1, \dots, |S(i)|\}$, которые формируют узловую логику сети (условия активации узлов представлены в [13]). Источник r всегда активирован, то есть для него $X_r^- = 0$ и $X_r^+ = 0$, при $i \in S$, где S – множество стоков N . Если $X_i^- = 1$, то узел i имеет IOR-вход, если $X_i^- \in |P(i)|$, то узел i имеет AND-вход, при $X_i^+ = 1$ имеем стохастический выход и при $X_i^+ \in |S(i)|$ – детерминированный выход.

Всегда имеется возможность формально преобразовать сеть N в одноисточковую сеть, введя псевдоисточник r_0 и дополнительную дугу для каждого $i \in R$ (R – множество стоков N). Тогда допущение о наличии единственного псевдоисточника r_0 у решающей GERT-сети не означает потерю общности постановки задачи. Для решающих сетей с несколькими источниками данное допущение, естественно, необязательно. Также очевидно, что ни одно из введенных в [13] допущений, которые связаны со стохастической структурой и циклами GERT-сетей, не являются необходимыми.

Минимизация затрат

Для постановки задачи минимизации затрат определим затраты $c_{ij} \in R$ для каждой из дуг решающей сети N . Это и будут затраты, появляющиеся при выполнении действий заданного ТТЦ. Необходимо выбрать успешную реализацию GERT-сети $w \in \mathcal{E}$ с минимальными затратами. «Успешная» реализация GERT-сети означает, что эта реализация сетевой модели приводит к активации стока s , который, в свою очередь, соответствует успешному завершению ТТЦ. Это приводит к задаче оптимизации следующего вида:

$$C_w \rightarrow \min \tag{1}$$

при условии, что $w \in \mathcal{E}$ и w активирует s . Здесь $C_w = \sum_{i,j \in E} c_{ij} w_{ij}$ – это суммарные затраты на w -ю реализацию ТТЦ.

Следует иметь в виду, что данная задача оптимизации предполагает рассмотрение w -й реализации ТТЦ, как действие, осуществляемое лицом, принимающим решение.

Задача (1) при заданных условиях является NP-трудной. В ряде случаев, например, когда X_i^- для всех $i \in V \setminus \{r\}$ или $X_i^+ \in |S(i)|$ для всех $i \in V \setminus S$ (что соответствует ациклическим EOR-сетям) имеем $X_i^- = 1$ для $i \in V \setminus \{r\}$ или в СРМ-сетях, когда $X_i^+ \in |S(i)|$ для $i \in V \setminus S$, всегда существует успешная реализации ТТЦ.

В общем же виде, когда эти условия не выполняются, для того чтобы успешно реализовать ТТЦ, источник r и сток s должны быть активированы. Возникает вопрос о существовании допустимого решения задачи оптимизации. Активирует ли $w \in \mathcal{E}$ сток s ?

Если для задачи (1) однозначно определено множество узлов, активированных в процессе w -й реализации ТТЦ, то такая постановка задачи соответствует постановке задачи Штейнера, представленной в [13]. Она предусматривает покрытие деревом с

минимальным весом нескольких заданных узлов взвешенного графа (минимальное покрывающее дерево). Известно, что задача о минимальном покрывающем дереве может быть решена за полиномиальное время в отличие от задачи Штейнера.

Следуя [13], будем обозначать через $w_{i,j}$ дуговые переменные, а через u_i , – узловые переменные. Переменные $w_{i,j}$ ($\langle i, j \rangle \in E$) принимают следующие значения:

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } \langle i, j \rangle \text{ выполняется;} \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

а переменные u_i ($i \in V$):

$$u_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i \text{ активируется;} \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

при этом $u_r = 1$ (источник r активирован).

С учетом введенных обозначений формализуем постановку задачи минимизации затрат:

$$\sum_{i,j \in E} C_{ij} w_{ij} \rightarrow \min \quad (2)$$

при выполнении условий узловой логики

$$\sum_{k \in P(i)} w_{ki} \geq X_i^- u_i \quad i \in V \setminus \{r\}, \quad (3)$$

$$\sum_{k \in P(i)} w_{ki} < X_i^- + M_i u_i, \quad (4)$$

где $M_i > |P(i)| - X_i^-, i \in V \setminus \{r\}$,

$$\sum_{j \in S(i)} w_{ij} \leq X_i^+ u_i \quad i \in V \setminus S, \quad (5)$$

$$w_{ij} \in \{0, 1\}, (\langle i, j \rangle \in E), \quad (6)$$

$$u_i \in \{0, 1\}, i \in V \setminus \{s\}, \quad (7)$$

$$u_s = 1. \quad (8)$$

Здесь (3)-(5) – это условия узловой логики. Следуя этим условиям, при $u_i = 1$ выполняется активация узла i при выполнении X_i^- входящих воздействий. Если в (4) $u_i = 0$, узел i не активируется, так как менее чем X_i^- входящих действий выполнено. Условия (6) и (7) – это условия бинарности узловых и дуговых переменных, а (8) – условие активации стока s . Считаем, что выполнение действий X_i^- , ведущих в узел i , имеет смысл только в случае, если под этим подразумевается активация узла i . Уравнение (4) обеспечивает нормировку исходных данных задачи.

Используя нотацию К. Neumann [13], определим функцию $w: E \rightarrow \{0,1\}$; ($\langle i, j \rangle \in E$), значения которой имеют вид:

$$w(\langle i, j \rangle) := w_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } \langle i, j \rangle \text{ выполняется;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Для каждой реализации сети w узловые и дуговые переменные определяются условиями (3)-(5), то есть такая реализация сети является одной из допустимых реализаций (так как w удовлетворяет условиям узловой логики). Формально, если $e^* = \{w: E \rightarrow \{0,1\}; w_{ij} \text{ — удовлетворяет (3) — (5); } \langle i, j \rangle \in E\}$, то e^* – это множество всех допустимых реализаций ТТЦ, из которых ЛПР на базе решающей сети имеет возможность выбрать реализацию, минимизирующую затраты. Таким образом, каждая реализация модели или сетевая реализация может быть определена через набор выполняемых действий через функцию $w: E \rightarrow \{0,1\}$.

Алгоритм решения

Для решения поставленной задачи предлагается следующая алгоритмическая процедура на основе метода ветвей и границ. Пусть A – это множество активирующихся узлов основной решающей сети N в ходе w -й реализации ТТЦ. Множество A^- – это множество не активирующихся узлов. Множество A содержит, как минимум, источник r и сток s . Эти узлы, не принадлежащие ни к A , ни к A^- , как способные, так и неспособные активироваться, будем называть свободными узлами. Тогда, помимо ограничений (3)-(8), введем дополнительное условие

$$u_i = \begin{cases} 1 & \text{для } i \in A; \\ 0 & \text{для } i \in A^- \end{cases}$$

и задачу оптимизации для краткости обозначим (A, A^-) . Поскольку задана реализация w , то соответствующие ей узловые переменные однозначно определены. Далее будем говорить о полученном ЛПР «решении w » для задачи (A, A^-) , если соответствующая дуговая переменная w_{ij} ($\langle i, j \rangle \in E$) и соответствующие узловые переменные u_i ($i \in E$) вместе представляют решение для (A, A^-) .

Задача (2) совпадает с задачей $(\{r, s\}, \emptyset)$ и соответствует корню дерева ветвлений в схеме метода ветвей и границ. Для удобства узел в дереве ветвлений, соответствующий задаче минимизации (A, A^-) , обозначается (A, A^-) . Если узел (A, A^-) не лист (то есть сток) дерева ветвлений, то он имеет два преемника $(A \cup \{k\}, A^-)$, где k – это свободный узел N .

Наилучшее решение задачи (2), полученное в рамках процедуры ветвей и границ обозначим w^+ . Алгоритм имеет две границы. Положим, что B – верхняя граница минимальных значений целевой функции задачи (2). В начале алгоритма мы можем установить: $B := \sum_{i,j \in E} C_{ij} W_{ij}$. $b(A, A^-)$ – нижняя граница минимальных значений целевой функции задачи (A, A^-) .

Если $A^- = V/A$, то есть в N нет свободных узлов, то минимальное значение целевой функции равно $b(A, A^-)$. Соответствующий предел для b рассмотрим ниже.

Лист дерева ветвлений будем называть активным, если он еще не рассматривался. В начале алгоритма корень $(\{r, s\}, \emptyset)$ – единственный активный узел. Активный узел рассматривается следующим образом.

Если $b(A, A^-) \geq B$, то узел (A, A^-) может быть удален из дерева ветвлений. Если $b(A, A^-) < B$ и $A^- = V/A$, то присвоим: $w^+ := w$ и $B := b(A, A^-)$, где w – решение задачи (A, A^-) . Если $b(A, A^-) < B$ и в N более 1 свободного узла, тогда два преемника узла (A, A^-) : $(A \cup \{k\}, A^-)$ и $(A, A^- \cup \{k\})$ генерируются в случае, когда k – любой свободный узел N . Будем называть данную процедуру *ветвлением от узла* (A, A^-) . В этом случае $(A \cup \{k\}, A^-)$ и $(A, A^- \cup \{k\})$ представляют новые активные узлы дерева ветвлений.

Активные узлы будем отмечать, как принадлежащие множеству L . Если L содержит более одного элемента, то необходимо выбрать следующий рассматриваемый узел. Существует три основных правила такого выбора [18-20]. Поиск в глубину (LIFO) означает, что L формируется как стек. В поиске в ширину (FIFO) L формируется как очередь. Также можно рассматривать формирование L как множество следующим образом: для узла (A, A^-) при формировании L значение целевой функции должно быть не менее $b(A, A^-)$.

Алгоритмическая процедура завершается, когда $L \neq \emptyset$. Тогда наилучшее возможное решение w^+ , полученное ранее, оптимально. При этом соответствующее предельное значение $b(A, A^-)$ соответствует минимальному значению целевой функции задачи оптимизации (2) с учетом выполнения условий узловой логики (3)-(8).

Заключение

Предложенная GERT-сетевая модель транспортно-технологического цикла БПЛА позволяет корректно использовать формальный аппарат, предложенный К. Neumann [13], описывая структуру сети (множество выполняемых действий сети), задав дуговые и узловые переменные и условия узловой логики. В итоге, ЛПП на базе решающей GERT-сети имеет возможность выбрать реализацию ТТЦ, минимизирующую затраты на реализацию ТТЦ. Алгоритмическая процедура, рассмотренная в работе, обеспечивает выбор наилучшего возможного решения, что способствует повышению эффективности формирования, анализа и управления ТТЦ БПЛА, так как позволяет более полно учесть характеристики производственных ситуаций в системах точного земледелия при применении беспилотных летательных аппаратов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Phillips D., Garcia-Diaz A. *Fundamental of network analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1981. 495 p.
2. Kozlova M.F. Multi-stage analysis of business processes using GERT-networks. *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации*. 2021;20:343–345.
3. Андриющенко В.А., Скалозуб В.В. Метод структурного преобразования стохастических сетей для ГЕРТ-моделирования технологических и экономических процессов. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2008;23:167–170.
4. Зырянов А.А. Модель узла GERT-сети, описывающая разветвление хода бизнес-процесса по логическому «Или». *Хвойные бореальной зоны*. 2012;29(5-6):25–29.
5. Saramud M.V. et al. Development of methods for equivalent transformation of GERT networks for application in multi-version software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;155:012015. DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012015.
6. Зырянов А.А., Доррер М.Г. Оценка показателей бизнес-процессов на основе GERT-сетей. *Хвойные бореальной зоны*. 2012;29(5-6):57–63.
7. Панфилова Т.А., Панфилов И.А., Золотарев В.В., Ковалев И.В., Сопов Е.А. Модель функционирования программной системы на основе GERT-сети. *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017;18(4):773–778.
8. Доррер М.Г., Зырянов А. Оценка числовых характеристик GERT-сети на основе эквивалентных преобразований. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2014;1(4):175–185.
9. Ковалев Д. И., Подоплелова В. А., Мансурова Т. П. GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов. *Информатика. Экономика. Управление*. 2022;1(1):0110–0120. DOI: 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120.
10. Kovalev I.V. et al. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022;1076:012055. DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012055.
11. 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.
12. Neumann K., Schneider W. Heuristic algorithms for job-shop scheduling problems with stochastic precedence constraints. *Annals of Operations Research*. 1999;92:45-63. DOI: 10.1023/A:1018955319343.
13. Neumann K. Stochastic Project Network: Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. 1990;344:1–237.

14. Ермолаева Л.В., Сенашов С.И. GERT-сетевой анализ производственных процессов. *Вестник СибГАУ*. 2007;3(16):101–110.
15. Царев М.Ю., Царев Р.Ю., Шевчук С.Ф. Модификация ГЕРТ-сети для анализа временных характеристик сетевых моделей. *Вестник СибГАУ*. 2009;1(22-2):74–78.
16. Царев Р. Ю., Штарик А. В., Штарик Е. Н., Кочергина М. А., Панфилова Т. А. Анализ вероятностно-временных характеристик отказоустойчивого программного обеспечения распределенных вычислительных систем. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2012;4(44):64–70.
17. Чернега В.С., Тлуховская-Степаненко Н.П., Еременко С.Н., Еременко А.Н. Сетевая модель для оценки длительности медицинского технологического процесса лазерной контактной литотрипсии. *Врач и информационные технологии*. 2018;4:75–82.
18. Bill McPherson B. LIFO and FIFO: providing other methods for business students to take “inventory”. *Journal of Behavioral Studies in Business*. 2011;2:1–18.
19. Sembiring A.C. et al. Improvement of inventory system using First In First Out (FIFO) method. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1361:012070. DOI: 10.1088/1742-6596/1361/1/012070.
20. Замятина О.М., Тюльменков В.Н. Методы организации и алгоритмы адресной системы хранения. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2006;309(7):106–110.

REFERENCES

1. Phillips D., Garcia-Diaz A. *Fundamental of network analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1981. 495 p.
2. Kozlova M.F. Multi-stage analysis of business processes using GERT-networks. Molodezh'. Obshchestvo. *Sovremennaya nauka, tekhnika i innovacii*. 2021;20:343–345.
3. Andryushchenko V.A., Skalozub V.V. Metod strukturnogo preobrazovaniya stohasticheskikh setej dlya GERT-modelirovaniya tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh processov. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta*. 2008;23:167–170. (In Russ.).
4. Zyryanov A.A. Model' uzla GERT-seti, opisyvayushchaya razvetvlenie hoda biznes-processa po logicheskomu «Ili». *Hvojnye boreal'noj zony = Conifers of the boreal area*. 2012;29(5-6):25–29. (In Russ.).
5. Saramud M.V. et al. Development of methods for equivalent transformation of GERT networks for application in multi-version software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;155:012015. DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012015.
6. Zyryanov A.A., Dorrer M.G. Ocenka pokazatelej biznes-processov na osnove GERT-setej. *Hvojnye boreal'noj zony = Conifers of the boreal area*. 2012;29(5-6):57–63. (In Russ.).
7. Panfilova T.A., Panfilov I.A., Zolotarev V.V., Kovalev I.V., Sopov E.A. Model' funkcionirovaniya programmnoj sistemy na osnove GERT-seti. *Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologii = Siberian Journal of Science and Technology*. 2017;18(4):773–778. (In Russ.).
8. Dorrer M.G., Zyryanov A. Ocenka chislovykh harakteristik GERT-seti na osnove ekvivalentnykh preobrazovanij. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii = Educational Resources and Technologies*. 2014;1(4):175–185. (In Russ.).
9. Kovalev D. I., Podoplelova V. A., Mansurova T. P. GERT-analiz transportnykh tekhnologicheskikh ciklov bespilotnykh letatel'nykh apparatov. *Informatika. Ekonomika. Upravlenie = Informatics. Economics. Management*. 2022;1(1):0110–0120. DOI: 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120. (In Russ.).

10. Kovalev I.V. et al. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022;1076:012055. DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012055.
11. 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.
12. Neumann K., Schneider W. Heuristic algorithms for job-shop scheduling problems with stochastic precedence constraints. *Annals of Operations Research*. 1999;92:45-63. DOI: 10.1023/A:1018955319343.
13. Neumann K. Stochastic Project Network: Temporal Analysis, Scheduling and Cost Minimization. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. 1990;344:1–237.
14. Ermolaeva L.V., Senashov S.I. GERT-setevoj analiz proizvodstvennyh processov. *Vestnik SibGAU*. 2007;3(16):101–110. (In Russ.).
15. Carev M.Yu., Carev R.Yu., Shevchuk S.F. Modifikaciya GERT-seti dlya analiza vremennyh karakteristik setevykh modelej. *Vestnik SibGAU*. 2009;1(22-2):74–78. (In Russ.).
16. Carev R.Yu., Shtarik A.V., Shtarik E.N., Kochergina M.A., Panfilova T.A. Analiz veroyatnostno-vremennyh karakteristik otkazoustojchivogo programmnoho obespecheniya raspredelennyh vychislitel'nyh sistem. *Sibirskij aerokosmicheskij zhurnal = The Siberian Aerospace Journal*. 2012;4(44):64–70. (In Russ.).
17. Chernega V.S., Tluhovskaya-Stepanenko N.P., Eremenko S.N., Eremenko A.N. Setevaya model' dlya ocenki dlitel'nosti medicinskogo tekhnologicheskogo processa lazernoj kontaktnoj litotripsii. *Vrach i informacionnye tekhnologii = Medical doctor and information technologies*. 2018;4:75–82. (In Russ.).
18. Bill McPherson B. LIFO and FIFO: providing other methods for business students to take “inventory”. *Journal of Behavioral Studies in Business*. 2011;2:1–18.
19. Sembiring A.C. et al. Improvement of inventory system using First In First Out (FIFO) method. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1361:012070. DOI: 10.1088/1742-6596/1361/1/012070.
20. Zamyatina O.M., Tyul'menkov V.N. Metody organizacii i algoritmy adresnoj sistemy hraneniya. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2006;309(7):106–110. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ковалев Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики Сибирского федерального университета, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: kovalev.fsu@mail.ru

ORCID: [0000-0003-2128-6661](https://orcid.org/0000-0003-2128-6661)

Igor Vladimirovitch Kovalev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Informatics Department of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Ковалев Дмитрий Игоревич, аспирант кафедры информационных технологий и математического обеспечения информационных систем Красноярского государственного аграрного университета, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: grimm7jow@gmail.com

ORCID: [0000-0001-5308-308X](https://orcid.org/0000-0001-5308-308X)

Dmitry Igorevich Kovalev, Postgraduate Student, the Department of Information Technologies and Mathematical Support of Information Systems of Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

Астанакулов Комил Дуллиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственной техники и технологии, Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Ташкент, Республика Узбекистан.

e-mail: komiljon.astanaqulov@gmail.com

Komil Dullievich Astanakulov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Agricultural Engineering and Technology, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Tashkent, the Republic of Uzbekistan.

Подоплелова Валерия Анатольевна, аспирант кафедры информационных технологий и математического обеспечения информационных систем Красноярского государственного аграрного университета, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: podoplelovava@mail.ru

Valeria Anatolyevna Podoplelova, Postgraduate student, the Department of Information Technologies and Software for Information Systems of Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Иконникова Мария Федоровна, аспирант кафедры Системного анализа и исследования операций Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация.

e-mail: mk_6f@bk.ru

Maria Fedorovna Ikonnikova, Postgraduate Student, the Department of System Analysis and Operations Research of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 04.05.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 01.06.2023.

The article was submitted 04.05.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 01.06.2023.