

УДК 004.724

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПРИБЫЛИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ПОТЕРЬ

А. П. Шибанов, д.т.н., профессор кафедры САПР ВС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-9438-8338, e-mail: apshibanov@yandex.ru

А. З. Нгуен, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-3695-4557, e-mail: nguyendunganhl306@yandex.ru

А. М. Фам, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-3055-3568, e-mail: phamanhminh231@gmail.com

Целью работы является использование GERT-сетей для решения задач подсчета реальной прибыли предприятия с учетом негативных факторов. Для каждой операции GERT-сети определяется планируемое оптимальное значение прибыли. Прибыль отдельных операций суммируется. Для каждой операции случайная величина потерь прибыли определяется несовершенством моделируемого процесса. Потери определяются или функциональной зависимостью между случайными величинами, или независимо на основании статистических данных. Планируемая прибыль уточняется с учетом ее потерь с использованием положительных и отрицательных случайных величин GERT-сети. Анализируются элементарные базовые преобразования в GERT-сети с положительными и отрицательными случайными величинами. Доказана возможность преобразования GERT-сети с положительными и отрицательными случайными величинами к единственной эквивалентной дуге с получением плотности распределения вероятности ее выходной величины.

Ключевые слова: GERT-сети, случайная величина, формула обращения, плотность распределения вероятностей, характеристическая функция, функциональная зависимость распределений, обратная функция, нормальное распределение, планируемая прибыль, потери прибыли.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-60-70

Введение

В традиционной GERT-сети [1] узлы соответствуют состояниям системы, а дуги связываются с аддитивными величинами, характеризующими некоторую i -ю операцию. Чаще всего в качестве такой величины берут случайное время выполнения. Выбор следующей $i+1$ операции в общем случае вероятностный. Сеть GERT является полумарковской моделью, в которой для каждой операции определены вероятность выбора, математическое ожидание и закон распределения случайной величины.

Существенно продвинуться дальше по сравнению с исследованиями А. Прицкера многочисленными последователями не удалось. Их работы были посвящены главным образом применению GERT-сетей на практике. Ограничениями являлись трудность получения плотности распределения выходной величины GERT-сети и экспоненциальная вычислительная сложность алгоритмов вследствие использования формулы Мейсона [1].

Исследования последних лет были посвящены как решению теоретических проблем [2-5], так и приложениям области телекоммуникаций [6-10]. В работе [2] рассматриваются вопросы получения плотности распределения выходной величины GERT-сети через формулу обращения с обеспечением точности интегрирования. В статье [3] излагаются вопросы получения плотности распределения для экспоненциальных и равномерно распределенных случайных величин с применением теории аналитических функций комплексного переменного. Работа [4] посвящена нахождению распределения вероятностей выходной величины GERT-сети, в которой все дуги описываются дискретными распределениями. Работа [5] посвящена установке контрольных точек в программах микроконтроллеров со сторожевыми таймерами.

Теоретическая часть

В качестве аддитивной случайной величины, характеризующей операцию, будем рассматривать получаемую прибыль.

В процессе выполнения операции могут получаться непроизводительные затраты, которые уменьшают прибыль, получаемую на данной операции. Потери от непроизводительных затрат могут быть выражены в доле прибыли. Причиной возникновения этих непроизводительных затрат может быть брак комплектующих, несовершенство технологических норм, неквалифицированные или даже злонамеренные действия персонала и т. п. Величина этих непроизводительных затрат определяется монотонной функциональной зависимостью от прибыли на данной операции. В результате получаемая прибыль уменьшается на величину непроизводительных затрат. Таким образом, в GERT-сети из положительной случайной величины, определяющей прибыль, нужно вычесть другую случайную величину, определяющую непроизводительные затраты.

В качестве случайных величин, определяющих прибыль, будем использовать нормально распределенные случайные величины. Тогда производящая функция моментов величины прибыли, достигаемой на одной операции $M_{\text{пр}}(s) = \exp\{m_{\text{пр}}s + 0,5\sigma_{\text{пр}}^2 s^2\}$, где $m_{\text{пр}}$ – математическое ожидание, а $\sigma_{\text{пр}}^2$ – дисперсия величины прибыли.

Определим линейную функциональную зависимость потерь Y от величины прибыли X : $Y = kX$, где k – постоянный множитель [11-12].

Пусть имеется непрерывная случайная величина X с плотностью $f(x)$; случайная величина потерь Y выражается через случайную величину X функциональной зависимостью $Y = \varphi(X)$.

Требуется найти закон распределения случайной величины Y .

Рассмотрим случай, когда функция $\varphi(X)$ строго монотонна, непрерывна и дифференцируема в интервале (a, b) всех возможных значений случайной величины X . Функция распределения $G(y)$ случайной величины Y определяется по формулам:

$$G(y) = P\{Y < y\}$$

и

$$g(y) = \frac{dG(y)}{dy} = f[\phi(y)]\phi'(y),$$

где $\phi(y) = x$ есть функция, обратная функции $\varphi(X) = Y$; $g(y)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины y .

Пусть время выполнения операции линейно связано со временем ее контроля по формуле $Y = kX$. Найдем плотность распределения $g(y)$ случайной величины Y . Обратная функция $\phi(y) = \frac{y}{k}$; а ее производная $\phi'(y) = \frac{1}{k}$; модуль производной $1/|k|$. Тогда

$$g(y) = f\left(\frac{y}{k}\right) \cdot \frac{1}{|k|}.$$

Пусть случайная величина X распределена по нормальному закону. Найти плотность распределения линейной функции нормально распределенного аргумента X с характеристиками m_x и σ_x . По формуле $g(y) = f(\phi(y))|\phi'(y)|$ имеем нормальный закон с характеристиками $m_y = km_x + b$; $D_y = k^2\sigma_x^2$; $\sigma_y = |k|\sigma_x$. Таким образом, в результате линейного преобразования нормально распределенной случайной величины X получаем случайную величину Y , также распределенную по нормальному закону.

Остается от величины планируемой прибыли вычесть неизбежные потери. Операция вычитания выполняется суммированием положительной случайной величины и случайной ве-

личины, взятой со знаком «минус». Сети GERT как с положительными так и хотя бы с одной отрицательной случайной величиной будем называть «GERT-сетями с отрицательными величинами».

Для реализации механизма вычитания воспользуемся свойствами характеристических функций. Характеристическая функция $\chi_{a+b\xi}(\zeta)$ случайной величины $a+b\xi$ связана с характеристической функцией случайной величины ξ равенством:

$$\chi_{a+b\xi}(\zeta) = E \exp \{i\zeta(a+b\xi)\} = \exp \{i\zeta a\} E \exp \{i(\zeta b)\xi\} = \exp \{i\zeta a\} \chi(\zeta b).$$

Если $a = 0$ и $b = -1$, то имеем:

$$\chi_{-\xi}(\zeta) = \chi(-\zeta).$$

То есть при вычислении формулы обращения [13] в характеристической функции χ нужно взять величину ζ с обратным знаком [14].

Пример 1. Операция должна принести прибыль, описываемую нормальным распределением с $m_x = 20$ ед., $\sigma_x = 3$ ед. Наносятся потери, линейно зависящие от прибыли: $Y = 0,2X$. Какова будет норма прибыли с учетом потерь?

Мы получим плотность распределения вероятностей потерь с параметрами $m_y = km_x = 0,2 \cdot 20$ ед. = 4 ед., $\sigma_y = |k|\sigma_x = 0,2 \cdot 3 = 0,6$ ед.

Сеть GERT для данного примера изображена на рисунке 1, а плотности нормы прибыли до и после учета потерь показаны на рисунке 2.

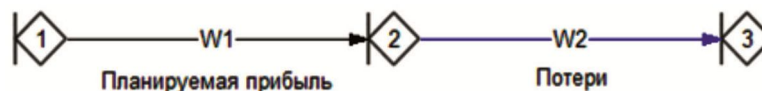


Рисунок 1 – GERT-сеть с одной отрицательной величиной
Figure 1 – GERT-network with one negative value

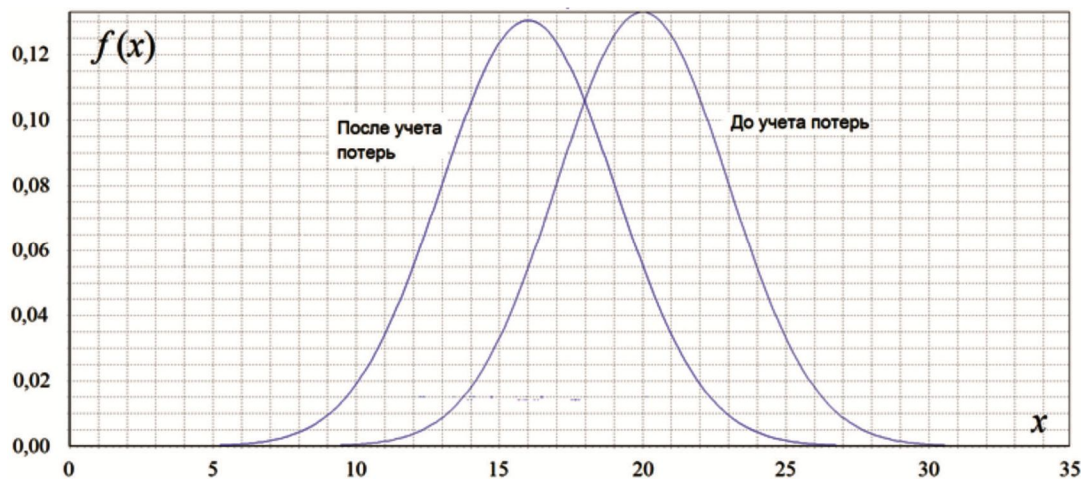


Рисунок 2 – Плотности нормы прибыли до и после учета потерь
Figure 2 – Densities of the rate of profit before and after accounting for losses

Результат можно представить одной эквивалентной дугой с положительной случайной величиной.

Преобразования структуры GERT-сетей с положительными и отрицательными случайными величинами

1. Последовательные преобразования с положительными и отрицательными случайными величинами

Последовательное соединение дуг с положительными и отрицательными случайными величинами показано на рисунке 3.

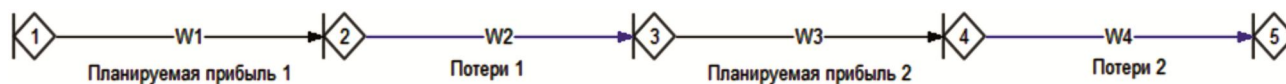


Рисунок 3 – Последовательное соединение дуг с положительными и отрицательными случайными величинами

Figure 3 – Series connection of arcs with positive and negative random variables

Эквивалентная W -функция $W_{E+-} = M_1(s)M_2(s)M_3(s)M_4(s)$.

Если надо последовательно соединить большее количество дуг с положительными и отрицательными случайными величинами, то мы шаг за шагом последовательно увеличиваем их число.

Эквивалентная схема дуг с положительными случайными величинами изображена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Эквивалентная схема последовательно соединенных дуг с положительными случайными величинами

Figure 4 – Equivalent circuit of series-connected arcs with positive random variables

Остается найти единственную плотность эквивалентной дуги для GERT-сети с обычными положительными величинами. Эквивалентная W -функция $W_{E+} = M_1(s)M_2(s)$. Операция обратима по определению.

2. Преобразования параллельных дуг с положительными и отрицательными случайными величинами

Сеть GERT с параллельными положительными и отрицательными случайными величинами показана на рисунке 5.

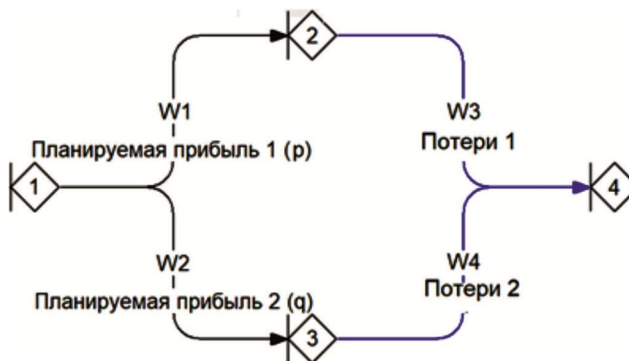


Рисунок 5 – Схема параллельно соединенных дуг с положительными и отрицательными случайными величинами

Figure 5 – Diagram of parallel-connected arcs with positive and negative random variables

Эквивалентная W -функция $W_{E+-} = pM_1(s)M_3(s) + qM_2(s)M_4(s)$.

Если надо параллельно соединить большее количество дуг с положительными и отрицательными случайными величинами, то мы шаг за шагом последовательно увеличиваем их число.

Вычисляется смесь распределений после определения прибылей с учетом Потерь 1 и Потерь 2. Необходимо учитывать, что $p + q = 1$. Тогда получим эквивалентную схему только с положительными дугами в GERT-сети (рисунок 6).



Рисунок 6 – Эквивалентная схема параллельно соединенных дуг с положительными случайными величинами

Figure 6 – Equivalent circuit of parallel connected arcs with positive random variables

Эквивалентная W -функция $W_{E+} = pM_1(s) + qM_2(s)$. Операция обратима. Зная эквивалентную W -функцию, задавая p и q , можно определить W -функции исходных дуг.

3. Преобразования «дуга-петля» с положительными и отрицательными случайными величинами

Соединение «дуга-петля» с положительными и отрицательными случайными величинами показано на рисунке 7.

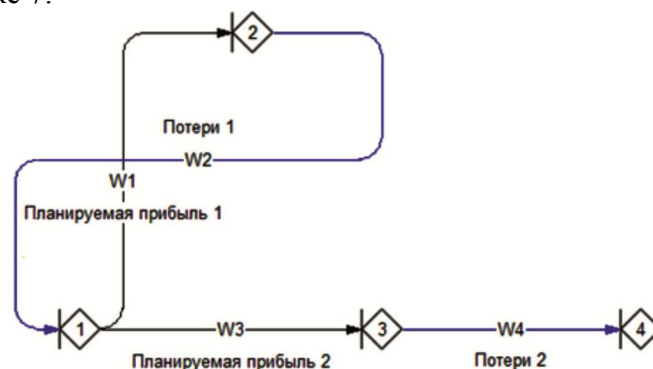


Рисунок 7 – Схема соединения «дуга-петля» с положительными и отрицательными случайными величинами

Figure 7 – Connection diagram «arc-loop» with positive and negative random variables

$$\text{Эквивалентная } W\text{-функция } W_{E+-} = \frac{pM_1(s)M_2(s)}{1 - qM_3(s)M_4(s)}.$$

Данное соединение может быть представлено в ациклическом виде (рисунок 8).

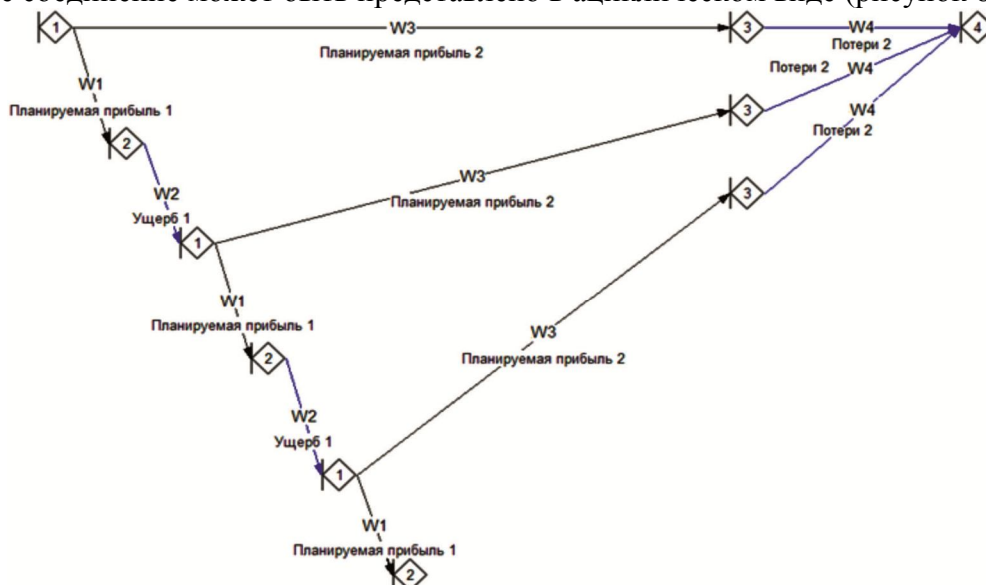


Рисунок 8 – Схема соединения «дуга-петля» в ациклическом представлении с положительными и отрицательными дугами

Figure 8 – Connection diagram «arc-loop» in acyclic representation with positive and negative arcs

Получаем комбинацию последовательно и параллельно соединенных дуг.

Данная формула получена как бесконечная убывающая геометрическая прогрессия со знаменателем $qM_3(s)M_4(s)$.

Если надо использовать большее количество фрагментов «дуга-петля», последовательно или параллельно соединенных между собой, с положительными и отрицательными случайными величинами, то мы шаг за шагом последовательно увеличиваем число таких фрагментов.

Перемножения W -функций дуг выполняется по формуле Мейсона.

Схема соединения «дуга-петля» в ациклическом представлении с учетом ущерба изображена на рисунке 9.

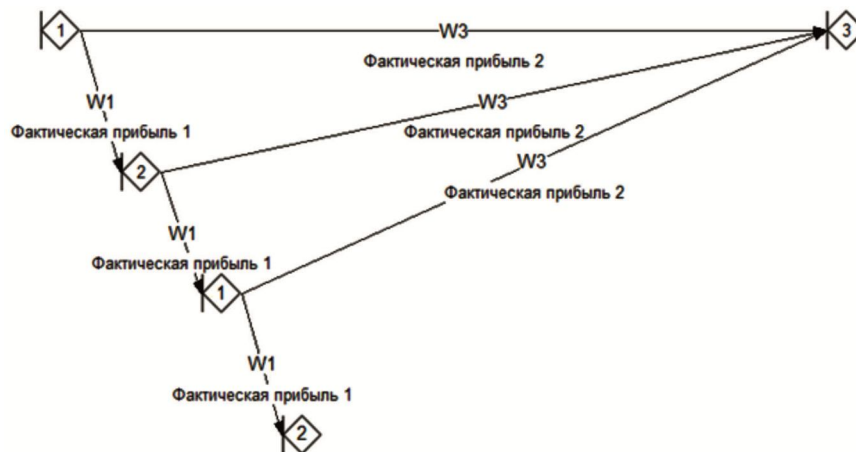


Рисунок 9 – Схема соединения «дуга-петля» в ациклическом представлении без потерь

Figure 9 – Connection diagram «arc-loop» in the acyclic representation without losses

Тогда $W_{E+}(s) = \frac{pM_2(s)}{1 - qM_1(s)}$, где p – вероятность выполнения петли.

Поскольку преобразование «дуга-петля» является комбинацией преобразований последовательных и параллельных дуг, то они являются обратимыми.

4. Эквивалентные преобразования GERT-сетей с положительными и отрицательными случайными величинами

В работе [4] рассмотрен метод эквивалентных преобразований, в котором структура GERT-сети пошагово упрощается за счет исключения какого-либо узла. В выбранный узел входят дуги из других узлов $j1, j2, \dots, jx$ и выходят дуги в другие узлы $m1, m2, \dots, my$. Кроме того, выбранный узел k образует промежуточный фрагмент «дуга» (рисунок 10).

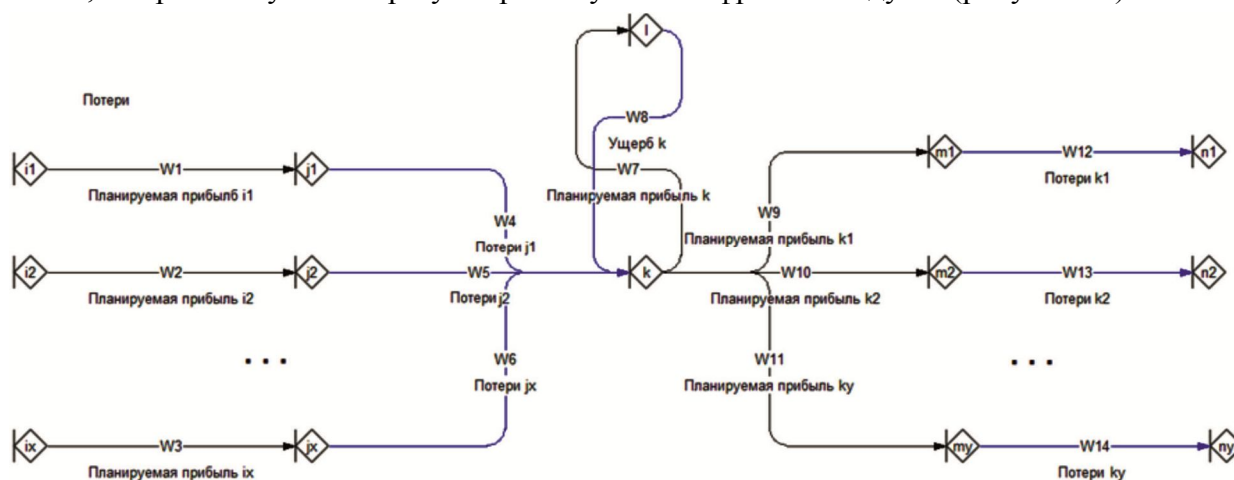


Рисунок 10 – Часть GERT-сети с входными, выходными дугами и фрагментом «дуга-петля» с положительными и отрицательными случайными величинами

Figure 10 – Part of the GERT-network with input, output arcs and a fragment of the «arc-loop» with positive and negative random variables

Предварительно вычисляется фактическая прибыль во всей сети (рисунок 11).

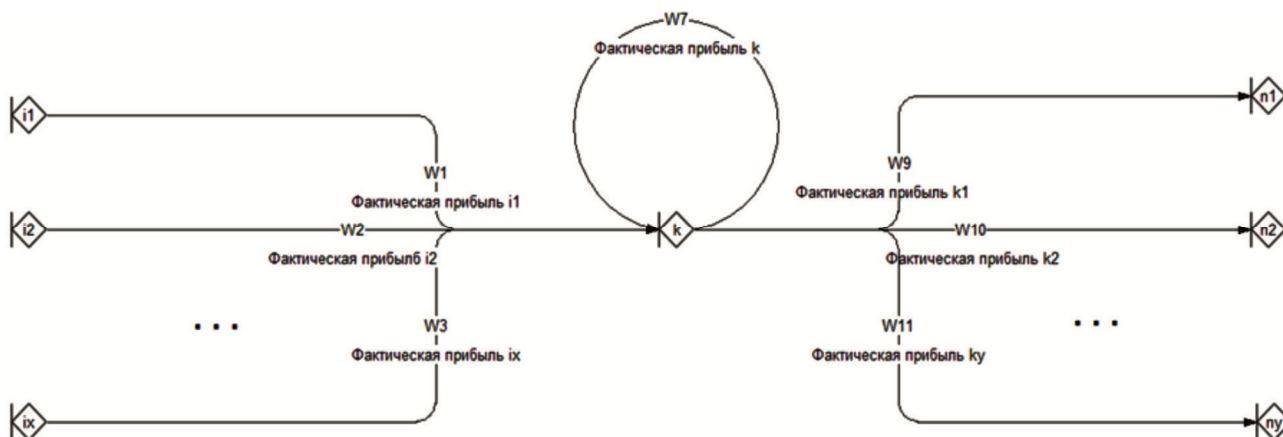


Рисунок 11 – Часть GERT-сети с входными, выходными дугами и фрагментом «дуга-петля» с положительными случайными величинами

Figure 11 – Part of the GERT-network with input, output arcs and a fragment of the «arc-loop» with positive random variables

В процессе преобразований дублированием узла k ликвидируются «дуги» в этом узле (пусть даже эквивалентные – преобразованные из нескольких других дуг) путем пересчета W -функций

$$W9_E = \frac{p1W9}{1-(1-p1)W7}, W10_E = \frac{p2W10}{1-(1-p2)W7}, W11_E = \frac{pyW11}{1-(1-py)W7},$$

где $p1, p2, \dots, py$ – вероятности выбора дуг $W9, W10, W11$.

После исключения узла k образуется фрагмент GERT-сети, изображенный на рисунке 12.

Последовательно исключаются все узлы, кроме узла-истока и узла-стока, образующих единственную эквивалентную дугу всей сети.

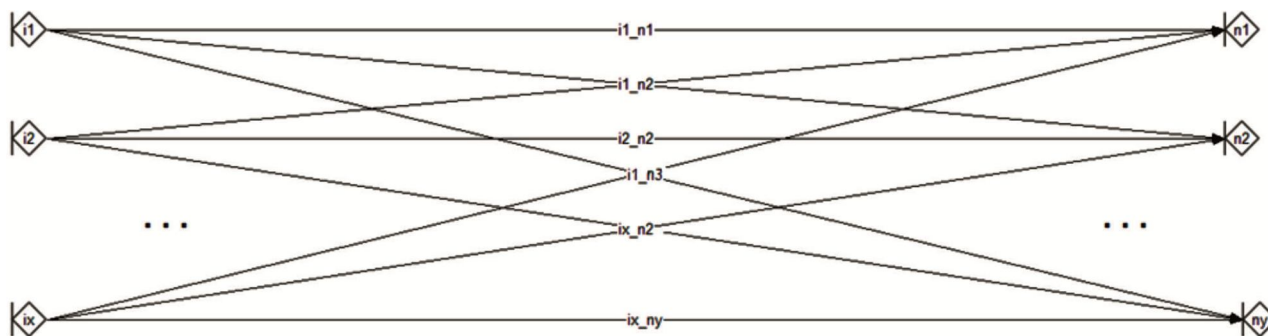


Рисунок 12 – Часть GERT-сети с исключенным узлом k

Figure 12 – Part of a GERT network with excluded node k

Поскольку после исключения ущерба все элементарные преобразования (последовательно соединенные дуги, смеси распределений) обратимы, то из эквивалентной дуги GERT-сети можно восстановить всю сеть.

Пример 2. Рассмотрим простую GERT-сеть проектирования и внешних испытаний опытных образцов аппаратуры (рисунок 13). Стадии разработки технического задания, эскизного проекта, технического проекта, рабочего проекта, внутренних испытаний приносят основную планируемую прибыль от разработки, обозначаемую на схеме сети как «Прибыль от разработки». Разработка может проводиться коммерческой организацией. В процессе разработки организация-исполнитель работ несет незапланированные потери, условно обозначаемые как «Ущерб от разработки». Сюда относятся все негативные процессы, допускаемые на разработке: устаревшее оборудование, несовершенные технологии, брак на производстве

вследствие плохой его организации, недостаточное использование систем автоматизированного проектирования, срыв сроков проведения работ и т.д.

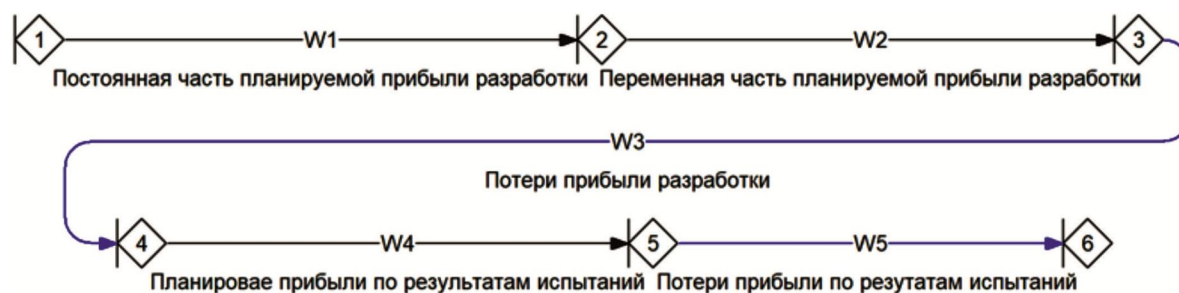


Рисунок 13 – Модель GERT-сети проектирования и испытаний с устранением ошибок

Figure 13 – Model of GERT-network design and testing with elimination of errors

После окончания разработки опытный образец подвергается межведомственным (государственным) испытаниям. В процессе испытаний подвергаются проверке все пункты технического задания (ТЗ). На проверку каждого пункта ТЗ назначается комиссия, состоящая из нескольких квалифицированных в данной области специалистов. Комиссии проверяют множество подсистем опытного образца. Результаты работы комиссий составляют основу акта испытаний. В акте испытаний отражаются замеченные недоработки, которые, как правило, бывают, и их необходимо устранить. Это может производиться как за счет исполнителя, так и за счет заказчика. Кроме того, даются рекомендации по дальнейшему совершенствованию опытного образца по частному ТЗ.

Организацией-заказчиком, как правило, выделяются средства на проведение работ по устранению замечаний по результатам испытаний. Организацией-исполнителем по выделении средств планируется «Прибыль от устранения ошибок испытаний». В процессе проведения дальнейших работ по вышеописанным причинам фиксируется «Ущерб от устранения ошибок испытаний».

В данном примере ущерб определяется не как функция от некоторой случайной величины, а как независимая случайная величина.

Характеристики дуг модели приведены в таблице.

Характеристики дуг модели

Characteristics of the model arcs

Номер п/п	Дуга	Распределение	Параметры
1	$W1$	Нормальное	$m = 10; \sigma = 0$
2	$W2$	Эрланга	$r = 2; \lambda = 0,2$
3	$W3$	Нормальное	$m = -1; \sigma = 0,1$
4	$W4$	Эрланга	$r = 2; \lambda = 0,5$
5	$W5$	Нормальное	$m = -1; \sigma = 0,1$

В процессе разработки прибыль делится на фиксированную часть (которую можно вычислить относительно точно) и переменную, которая выражается случайной величиной.

Плотность распределения вероятностей процесса разработки и устранения недостатков по результатам испытаний представлена на рисунке 14.

Если оценивать полученную прибыль по интервалу «трех сигм» (по оптимистической оценке), то она равна 44,76 ед.

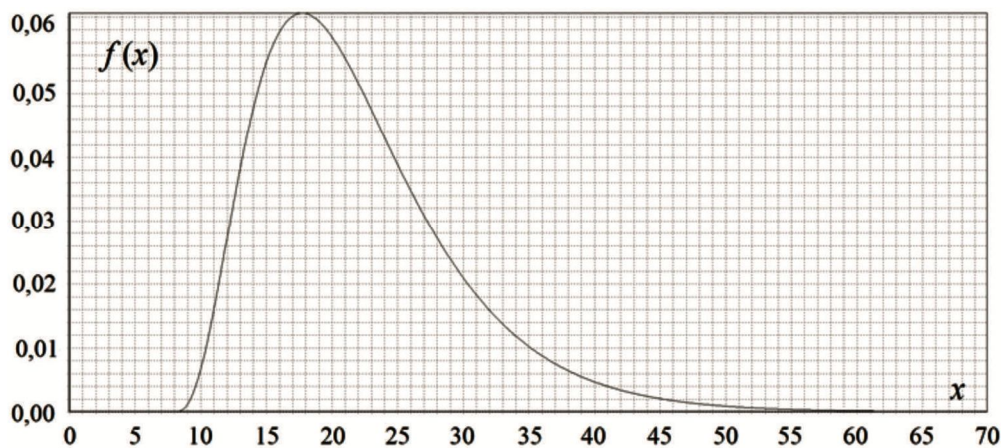


Рисунок 14 – Плотность распределения вероятностей процессов разработки и совершенствования опытного образца
Figure 14 – The probability distribution density of development processes and improving the prototype

Заключение

Потери относительно планируемой прибыли связываются либо функциональной зависимостью одной случайной величины от другой, либо определяются независимо. Последнее бывает, например, в случае, если известна статистическая зависимость планируемой прибыли от величины потерь.

Величина ущерба определяется не только нормальным распределением, но и любой случайной величиной, имеющей характеристическую функцию. В частности, это могут быть биномиальное, геометрическое, отрицательное биномиальное, равномерное, пуассоновское, экспоненциальное, гамма-распределения. Для этого в положительной случайной величине надо изменить знак действительной переменной ζ на обратный.

Использование планируемой прибыли и учет понесенной части ее потери возможен при любой структуре GERT-сети, которая приводится к единственной эквивалентной дуге. Предварительно преобразовываются (исключаются с пересчетом на реально получаемую прибыль) все дуги, определяющие наносимый ущерб.

Библиографический список

1. **Pritsker A. A.** Graphical Evaluation and review technique. MEMORANDUM RM-4973-NASA APREL 1966.
2. **Aleksandr Shibanov, Vladimir Shibanov, Aleksey Saprykin.** Issues of integration of the inversion formula while calculating the distribution of output values of the GERT network. 2018 ELEKTRO, Mikulov, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398260.
3. **Aleksandr Shibanov, Aleksey Saprykin.** Calculation of the output value distribution of the GERT network with exponentially and evenly distributed random values. 2018 ELEKTRO, Mikulov, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398255.
4. **Aleksandr Shibanov, Vladimir Shibanov, Aleksey Saprykin.** Calculation of the discrete random output value distribution in GERT networks. 2018 ELEKTRO, Mikulov, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398254.
5. **Koryachko V. P., Shibanov A. P., Shibanov B. A.** Hierarchic GERT Networks for Simulating Systems with Checkpoints. 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 – Proceeding, pp. 342-345.
6. **Корячко В. П., Шибанов А. П., Шибанов В. А., Сапрыкин А. Н., Фам Х. Л.** Проектирование сети передачи данных оптико-электронных средств при испытаниях летательных аппаратов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 106-111.
7. **Корячко В. П., Шибанов А. П., Шибанов В. А., Нгуен А. З.** Процедуры поиска объектов на основе использования GERT-сетей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 62. С. 58-63.

8. **Корячко В. П., Скворцов С. В., Шибанов А. П., Перепелкин Д. А.** Методы и технологии автоматизации проектирования высокопроизводительных систем и компьютерных сетей. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 94-104.

9. **Корячко В. П., Шибанов А. П., Фам Х. Л.** Модель канала передачи данных с обнаружением отказов и восстановлением работоспособности // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2018. № 58. С. 37-40.

10. **Shibanov A., Saprykin A., Shibanov V., Bakuleva M.** Transfer of Streaming Measuring Information with Aging in the Channels of a Testing Ground SDN for Testing of Aircrafts. 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019 – Proceedings.

11. **Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.

12. **Шибанов А. П., Нгуен. А. З.** Использование стохастических сетей при планировании сборочных операций с функциями от случайных величин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2019. № 69. С. 86-92.

13. **Феллер В.** Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Т. 2: пер. с англ. М.: Мир, 1984.

14. **Shibanov A. P.** Finding the distribution density of the time taken to fulfill the GERT network on the basis of equivalent simplifying transformation. Automation and Remote Control. Plenum Press New York, NY, USA. February 2003, vol. 64, no. 2, pp. 279-287.

UDC 004.724

STOCHASTIC NETWORKS USAGE WHEN PLANNING PROFIT TAKING INTO ACCOUNT POSSIBLE LOSSES

A. P. Shibanov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-9438-8338, e-mail: apshibanov@yandex.ru

A. D. Nguyen, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-3695-4557, e-mail: nguyendunganh1306@yandex.ru

A. M. Pham, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-3055-3568, e-mail: phamanhminh231@gmail.com

The aim of the work is to use GERT-networks to solve the problems of calculating the real profit of the enterprise taking into account negative factors. For each operation of GERT-network, the planned optimal profit value is determined. The profit of individual operations is summarized. For each operation, a random value of profit losses is determined by the imperfection of simulated process. Losses are determined either by a functional relationship between random variables or independently on the basis of statistical data. The planned profit is specified taking into account its losses using positive and negative random values of GERT-network. Elementary basic transformations in GERT-network with positive and negative random variables are analyzed. The possibility of converting GERT-network with positive and negative random variables to a single equivalent arc obtaining probability distribution density of its output value is proved.

Key words: GERT-networks, random variable, inversion formula, probability density, characteristic function, functional dependence of distributions, inverse function, normal distribution, planned profit, loss of profit.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-60-70

References

1. **Pritsker A. A.** Graphical Evaluation and review technique. MEMORANDUM RM-4973-NASA APREL 1966.

2. **Aleksandr Shibanov, Vladimir Shibanov, Aleksey Saprykin.** Issues of integration of the inversion formula while calculating the distribution of output values of the GERT network. 2018 ELEKTRO, Mikulov, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398260.

3. **Aleksandr Shibarov, Aleksey Saprykin.** Calculation of the output value distribution of the GERT network with exponentially and evenly distributed random values. *2018 ELEKTRO*, Mikulov, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398255.
4. **Aleksandr Shibarov, Vladimir Shibarov, Aleksey Saprykin.** Calculation of the discrete random output value distribution in GERT networks. *2018 ELEKTRO*, Mikulov, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398254.
5. **Koryachko V. P., Shibarov A. P., Shibarov B. A.** Hierarchic GERT Networks for Simulating Systems with Checkpoints. *2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 – Proceeding*, pp. 342-345.
6. **Koryachko V. P., Shibarov A. P., Shibarov V. A., Saprykin A. N., Fam H. L.** Proektirovanie seti peredachi dannyh optiko-elektronnyh sredstv pri ispytaniyah letatel'nyh apparatov *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017. no. 60, pp. 106-111 (in Russian).
7. **Koryachko V. P., Shibarov A. P., Shibarov V. A., Nguen A. Z.** Procedury poiska ob"ektov na osnove ispol'zovaniya GERT-setej. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017. no. 62, pp. 58-63 (in Russian).
8. **Koryachko V. P., Skvortsov S. V., Shibarov A. P., Perepelkin D. A.** Metody i tekhnologii avtomatizatsii proektirovaniya vysokoproizvoditel'nyh sistem i komp'yuternykh setej. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017, no. 60, pp. 94-104 (in Russian).
9. **Koryachko V. P., Shibarov A. P., Fam H. L.** Model' kanala peredachi dannyh s obnaruzheniem otkazov i vosstanovleniem rabotosposobnosti. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2018. no. 58, pp. 37-40 (in Russian).
10. **Shibarov A., Saprykin A., Shibarov V., Bakuleva M.** Transfer of Streaming Measuring Information with Aging in the Channels of a Testing Ground SDN for Testing of Aircrafts. *2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019 – Proceedings*.
11. **Ventcel' E. S., Ovcharov L. A.** Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya (Probability Theory and Its Engineering Applications). *M.: Vysshaya shkola*, 2000. 480 p. (in Russian).
12. **Shibarov A. P., Nguen. A. Z.** Ispol'zovanie stokhasticheskikh setej pri planirovanii sbo-rochnykh operatsij s funktsiyami ot sluchajnykh velichin. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2019. no. 69, pp. 86-92 (in Russian).
13. **Feller V.** Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i ee prilozheniya (Introduction to Probability Theory and Its Applications). V 2-h tomah. T. 2. Per. s angl. M.: Mir, 1984 (in Russian).
14. **Shibarov A. P.** Finding the distribution density of the time taken to fulfill the GERT network on the basis of equivalent simplifying transformation. *Automation and Remote Control. Plenum Press New York, NY, USA*. February 2003, vol. 64, no. 2, pp. 279-287.