

УДК 004.725.7

В.П. Корячко, А.П. Шибанов, О.В. Лукьянов**ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ**

Рассматриваются вопросы определения производительности каналов передачи данных при проведении летных испытаний на полигонах. Определяются вероятностно-временные характеристики трактов передачи информации при смене матриц трафика.

Ключевые слова: измерительная информация, полоса пропускания, особые точки.

Введение. При проведении летных испытаний изделий авиационной и ракетно-космической техники актуальной является задача обеспечения своевременной передачи измерительной информации (ИИ) реального времени. Определяющим фактором при этом является обеспечение достаточной величины полосы пропускания каналов связи. Задача усложняется тем, что летательные аппараты (ЛА) в процессе движения переходят из зоны слежения одних измерительных пунктов (ИП) в зоны сопровождения других ИП. Поэтому трафик в канальной инфраструктуре динамически меняется. Неполучение ИИ центрами управления и анализа из-за потерь кадров вследствие переполнения буферов коммуникационного оборудования (коммутаторов, маршрутизаторов) является весьма нежелательным и даже может привести к срыву испытаний.

Целью исследований является:

- 1) нахождение вероятностных распределений времени передачи кадров от источников информации до центров управления испытаниями или до центров анализа хода испытаний, обобщенно – центров сбора (ЦС) информации;
- 2) нахождение вероятностных распределений величин полос пропускания предполагаемых «узких» мест тактов передачи. Иными словами задача заключается в предварительном расчете их допустимых значений при различных матрицах трафика.

Постановка задачи. Обобщенная структура сети передачи измерительной информации приведена на рисунке 1. В общем виде это ячеистая структура со сложной динамической маршрутизацией [1-3]. Однако при передаче кадров ИИ пути в виде контуров должны быть исключены. Если исключить связи, показанные пунктиром, то мы получаем древообразную структуру сети ПИК. С течением времени меняются географиче-

ческие координаты испытуемых объектов.

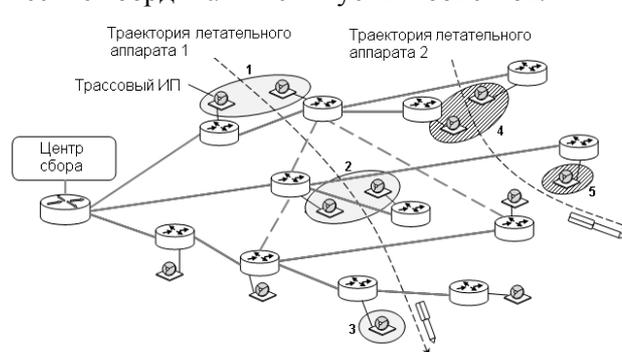


Рисунок 1 – Обобщенная структура сети передачи ПИК

На рисунке 1 показано, что ЛА1 сначала сопровождается двумя трассовыми ИП-ами (зона 1), затем двумя ИП-ами зоны 2, а затем ИП-ом, расположенным в зоне 3. К зоне относятся те ИП-ы, которые осуществляют сопровождение ЛА и выполняют передачу ИИ в ЦС. В зонах 4 и 5 находятся ИП-ы, сопровождающие ЛА2.

Изменение трафика реального времени в сети ПИК обуславливает необходимость оперативного пересчета задержки передачи ИИ и ее вариации по каждому пути от ИП-а до ЦС. Предварительный расчет нужных характеристик для всех путей передачи от ИП-ов до ЦС проблематичен из-за большого числа вариантов при древообразной структуре сети. Если это и удастся сделать, то возникает задача хранения больших объемов данных, что на практике не всегда возможно. Кроме того, если расчеты ведутся заранее, то сложно прогнозировать изменение структуры сети при отказе ее элементов в процессе испытаний.

Если известна программа испытаний, то объем предварительных расчетов можно уменьшить, зная зоны с ИП-ами, сопровождающими ЛА по трассе полета. Однако возникновение отказов и нештатных ситуаций непосредственно

перед испытаниями и в процессе их проведения обуславливает необходимость выполнения дополнительных расчетов в реальном масштабе времени. Одной из нештатных ситуаций является срыв сопровождения каким-либо штатным ИП-ом (от полной потери цели до срыва ее сопровождения по какой-либо координате, например по углу места или дальности). В этом случае сопровождение данного ЛА может быть передано резервным измерительным средствам.

Изменение положения ЛА в процессе полета или возникновение нештатных ситуаций приводит к изменению матриц трафика сети. Если рассматривать трафик в одном виртуальном соединении «из конца в конец», то при этом становится необходимым решение одной из следующих задач.

Задача I. Полный расчет распределения времени передачи кадра ИИ на пути от маршрутизатора зоны до ЦС.

Задача II. Объект испытаний удалился в направлении от ЦС. Путь передачи ИИ удлинился за счет добавления одного или нескольких последовательно соединенных каналов. Выполняется частичная корректировка расчетов с сохранением данных предварительных вычислений.

Задача III. Объект испытаний приблизился к ЦС. Путь передачи ИИ сократился за счет исключения одного или нескольких последовательно соединенных каналов. Выполняется частичная корректировка расчетов с сохранением данных предварительных вычислений.

В течение длительного времени в филиале ОАО «РКЦ «Прогресс» – ОКБ «Спектр», г. Рязань, проводилась работа по определению вероятностно-временных характеристик специализированных каналов передачи кадров телеметрической и траекторной информации, а также кадров от измерительных систем, работающих в инфракрасном диапазоне [4-9]. Далее для отражения характеристик данных, передаваемых во всех трех типах кадров, будем использовать термин «измерительная информация». Установлено, что в соответствии с критерием согласия χ^2 эмпирические распределения, получаемые из гистограмм времени передачи, могут быть аппроксимированы нормированным распределением Эрланга с учетом постоянной составляющей длительности передачи. Задержка прохождения ИИ по каналу сети t может быть представлена как $t = T + \xi$, где T – постоянная составляющая, а величина ξ имеет плотность распределения вероятностей

$$f_k(\xi) = \frac{k\mu(k\mu\xi)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-k\mu\xi}.$$

Для отражения изменения задержки кадров в небольших пределах целесообразно использовать значения $k=2$ и μ в интервале $(0, 1-2)$, выражаемые в миллисекундах, что хорошо согласуется с измерениями задержек в реальных каналах. Как показывает практика, такой набор данных μ и k достаточен для аппроксимации нормированным распределением Эрланга по критерию χ^2 гистограмм, получающихся в результате передачи кадра ИИ через канал связи.

Передача кадра по одному каналу. Производящая функция моментов нормированного распределения Эрланга $M(s) = [2\mu/(2\mu - s)]^2$. На рисунке 2 изображена модель GERT [10-12], отражающая среднюю задержку T и ее колебания при передаче пакета через канал связи.

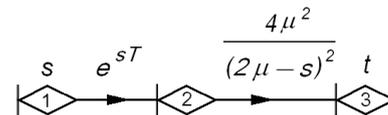


Рисунок 2 – Модель передачи пакета по каналу связи

Эквивалентная производящая функция моментов $M_{iE}(s) = M_{i1}(s)M_{i2}(s) = e^{sT_i} (2\mu_i)^2 / (2\mu_i - s)^2$. Выполним комплексное преобразование $z = -s$. Если функция $\Phi_i(z) = e^{-zT_i} (2\mu_i)^2 / (2\mu_i + z)^2$ в полуплоскости $\text{Re } z < 0$ удовлетворяет условиям леммы Жордана, то интеграл, взятый вдоль контура Бромвича, равен сумме вычетов функции $\Phi_i(z)$ относительно всех ее особенностей [13,14]. Тогда плотность распределения вероятностей времени передачи кадра по каналу

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zt} \Phi_i(z) dz = \text{Res}_{z=-2\mu_i} [e^{zt} \Phi_i(z)].$$

Условия леммы Жордана выполняются, так как функция $\Phi_i(z) = e^{-zT_i} (2\mu_i)^2 / (2\mu_i + z)^2$ равномерно сходится к нулю относительно $\text{arg } z$ при $|z| \rightarrow \infty$. Если имеется полюс 2-й кратности в точке $z = -2\mu_i$, то плотность распределения вероятностей времени передачи кадра ИИ через канал связи

$$\begin{aligned} f_i(t) &= 4\mu_i^2 \lim_{z \rightarrow -2\mu_i} \frac{d[e^{z(t-T_i)}]}{dz} = \\ &= 4\mu_i^2 \left[(t-T_i) e^{-2\mu_i(t-T_i)} \right], t \geq T_i. \end{aligned}$$

Передача кадра по N последовательно соединенным каналам. В этом случае имеем

$$\Phi(z) = \prod_{i=1}^N \Phi_i(z) = 4^N \prod_{i=1}^N \frac{e^{-zT_i} \mu_i^2}{(2\mu_i + z)^2} \quad \text{и} \quad (1)$$

$$f(t) = \sum_{i=1}^N \text{Res}_{z=-2\mu_i} \left[4^N e^{zt} \prod_{\forall i} \frac{e^{-zT_i} \mu_i^2}{(2\mu_i + z)^2} \right]. \quad (2)$$

Пример. Путь передачи кадра ИИ состоит из трех каналов связи, переменные составляющие времени передачи которых характеризуются соответственно нормированными распределениями Эрланга второго порядка с параметрами $\mu_1 = 1, \mu_2 = 2, \mu_3 = 3$. Постоянные составляющие времени передачи одинаковы и равны 5 мс. Тогда

$$\begin{aligned} \Phi_1(z) &= e^{-5z} \left(\frac{2}{2+z} \right)^2, \quad \Phi_2(t) = e^{-5z} \left(\frac{4}{4+z} \right)^2, \\ \Phi_3(t) &= e^{-zT_3} \left(\frac{6}{6+z} \right)^2, \\ \Phi(z) &= \frac{2304 e^{-15z}}{(2+z)^2 (4+z)^2 (6+z)^2}. \end{aligned}$$

Функция $\Phi(z)$ имеет полюсы второго порядка в точках $z = -2, -4, -6$. Тогда

$$f(t) = 18 \left[e^{-2(t-15)} (2t-33) + 8e^{-4(t-15)} (t-15) + e^{-6(t-15)} (2t-27) \right].$$

Плотность распределения времени передачи $f(t)$ изображена на рисунке 3.

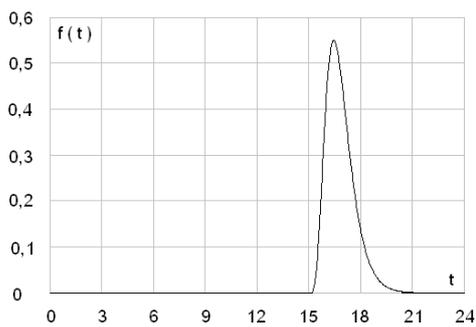


Рисунок 3 – Плотность распределения времени передачи $f(t)$

Математическое ожидание и дисперсия времени прохождения всего пути находятся как суммы математических ожиданий и дисперсий длительности прохождения отдельных звеньев пути, которые являются независимыми случайными величинами.

Для обеспечения необходимых показателей качества сети передачи ИИ в реальном масштабе

времени необходимо найти эффективные вычислительные процедуры нахождения функции и плотности распределения вероятностей времени прохождения кадра ИИ от ИП-ов до ЦС. Они будут решаться по-разному в зависимости от изменения траектории полета ЛА.

Вторичный расчет распределений времени передачи кадра ИИ. При решении задачи I изначально выполняются расчеты для всего множества N виртуальных каналов соединения «из конца в конец» по формуле (2). Достаточно часто приходится решать задачу II. Предполагается, что сохранены расчеты для некоторого множества последовательно соединенных каналов, которые будут использоваться для передачи ИИ повторно. Корректировка расчетов заключается в том, что должны быть учтены параметры вновь подключаемых каналов связи.

Для последовательности N каналов функция $\Phi(z)$ выражается формулой (1), а $f(t)$ – соответствующая плотность распределения времени передачи кадра ИИ – задается выражением (2). Обозначим через N^+ число каналов с учетом добавленных. Рассмотрим, как изменяются выражения для вычетов от некоторого выбранного полюса второго порядка при последовательном увеличении числа каналов.

Пусть для $N = 2$ в выражении для $\Phi(z)$ есть особые точки при $z_1 = -2\mu_1$ и $z_2 = -2\mu_2$. Тогда имеем

$$e^{zt} \Phi^{(2)}(z) = 4^2 \mu_1^2 \mu_2^2 \frac{e^{z[t-(T_1+T_2)]}}{(2\mu_1+z)^2 (2\mu_2+z)^2},$$

а вычет от точки z_1 определяется выражением:

$$\begin{aligned} \text{Res}_{z_1=-2\mu_1} &= \lim_{z \rightarrow -2\mu_1} 4^2 \mu_1^2 \mu_2^2 e^{z[t-(T_1+T_2)]} \times \\ &\times \frac{[t-(T_1+T_2)] - \frac{2}{2\mu_2+z}}{(2\mu_2+z)^2} = \\ &= 4\mu_1^2 \mu_2^2 e^{-2\mu_1[t-(T_1+T_2)]} \frac{[t-(T_1+T_2)] - \frac{1}{\mu_2-\mu_1}}{(\mu_2-\mu_1)^2}. \end{aligned}$$

Если $N = 3$ и имеются особые точки $z_1 = -2\mu_1, z_2 = -2\mu_2$ и $z_3 = -2\mu_3$, то

$$e^{zt} \Phi^{(3)}(z) = 4^3 \mu_1^2 \mu_2^2 \mu_3^2 \times \frac{e^{z[t-(T_1+T_2+T_3)]}}{(2\mu_1+z)^2 (2\mu_2+z)^2 (2\mu_3+z)^2}$$

и

$$\begin{aligned} \text{Res}_{z=-2\mu_1} &= 4\mu_1^2 \mu_2^2 \mu_3^2 e^{-2\mu_1[t-(T_1+T_2+T_3)]} \times \\ &\left[t-(T_1+T_2+T_3) \right] - \frac{1}{\mu_2-\mu_1} - \frac{1}{\mu_3-\mu_1} \\ &\times \frac{1}{(\mu_2-\mu_1)^2(\mu_3-\mu_1)^2}. \end{aligned}$$

Для N^+ каналов по индукции получаем:

$$\begin{aligned} \text{Res}_{z=-2\mu_i} &= 4 \prod_{k=1}^{N^+} \mu_k^2 e^{-2\mu_i \left(t - \sum_{k=1}^{N^+} T_k \right)} \times \\ &\times \left\{ \left[\left(t - \sum_k^{N^+} T_k \right) - A \right] / B \right\}, i = \overline{1, N^+}. \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь $A = \sum_{\forall j, j \neq i}^{N^+} 1/(\mu_j - \mu_i)$. В выражении для A содержится $N^+ - 1$ слагаемых. Разности $\mu_j - \mu_i$ формируются так, что индекс j пробегает все значения от 1 до N^+ кроме $j=i$; при этом значение i постоянно и равно номеру особой точки.

Введем обозначение $B = \prod_{\forall j, j \neq i}^{N^+} (\mu_j - \mu_i)$. В выражении для B содержится $N^+ - 1$ произведений. Разности $\mu_j - \mu_i$ формируются аналогично тому, как это выполняется для определения A . Значение i также постоянно и равно номеру особой точки. Для получения выражения $\prod_{k=1}^{N^+} \mu_k^2 \exp \left[-2\mu_i \left(t - \sum_{k=1}^{N^+} T_k \right) \right]$ в него должны последовательно добавляться сомножители μ_k^2 и T_k .

Часто приходится решать и задачу III. Пусть N^- есть число последовательно соединенных каналов в пути «из конца в конец», если один или несколько каналов оказываются незадействованными. После того, как выполнены действия по корректировке выражения (3), получаем:

$$\begin{aligned} \text{Res}_{z=-2\mu_i} &= 4 \prod_{k=1}^{N^-} \mu_k^2 e^{-2\mu_i \left(t - \sum_{k=1}^{N^-} T_k \right)} \times \\ &\times \left\{ \left[\left(t - \sum_k^{N^-} T_k \right) - A \right] / B \right\}, i = \overline{1, N^-}. \end{aligned} \tag{4}$$

В выражении для $\prod_{\forall j, j \neq i}^{N^-} 1/(\mu_j - \mu_i)$ содержится $N^- - 1$ слагаемых. Разности $\mu_j - \mu_i$ формируются так, что индекс j пробегает все значения

от 1 до N^- кроме $j=i$; при этом значение i равно номеру особой точки. В выражении для $B = \prod_{\forall j, j \neq i}^{N^-} (\mu_j - \mu_i)$ содержится $N^- - 1$ произведений. Разности $\mu_j - \mu_i$ формируются аналогично тому, как это выполняется для определения A . Значение i равно номеру особой точки.

Для вычисления $\prod_{k=1}^{N^-} \mu_k^2 \exp \left[-2\mu_i \left(t - \sum_{k=1}^{N^-} T_k \right) \right]$ по $\prod_{k=1}^{N^+} \mu_k^2 \exp \left[-2\mu_i \left(t - \sum_{k=1}^{N^+} T_k \right) \right]$ должны последовательно исключаться сомножители μ_k^2 и T_k для тех каналов k , которые не задействованы в передаче кадров ИИ.

Решение задач I, II, III целесообразно выполнять по единой методике и использованием стековой организации вычислений. В первой и второй из них в вершину стека записываются промежуточные вычисления, выполненные по формулам (2) и (3) (операция *push*). При решении задачи III ставшие ненужными вследствие исключения каналов данные из вершины стека просто извлекаются без проведения каких-либо вычислений (операция *pop*).

Определение полосы пропускания каналов. Для множества виртуальных путей от источников ИИ до ЦС, проложенных в общем физическом канале, необходимо определить суммарную полосу пропускания канала. При этом должен быть определен резерв полосы пропускания, необходимый для решения различных задач. Например, для обработки пульсаций, прокладки резервных виртуальных каналов в случае отказов оборудования, реализации явных обратных связей, для обеспечения каналов управления и т. п.

Время передачи кадра ИИ в канале характеризуется плотностью распределения вероятностей. Полоса пропускания в современных сетях измеряется в единицах скорости передачи, например в Мбит/с. Для каждой точки плотности распределения вероятностей времени передачи кадра однозначно определяется скорость передачи в выбранных единицах. Направление оси скорости передачи противоположно направлению оси времени передачи кадра. Наименьшим значениям времени передачи соответствуют наибольшие значения скорости передачи кадра ИИ. Постоянные составляющие времени передачи кадра ИИ порождают со сменой направления постоянные составляющие величины полосы пропускания любого канала. Они суммируются с

«джиттером» – переменной составляющей полосы пропускания физического канала.

Выполняемые преобразования распределения Эрланга 2-го порядка показаны на рисунке 4.

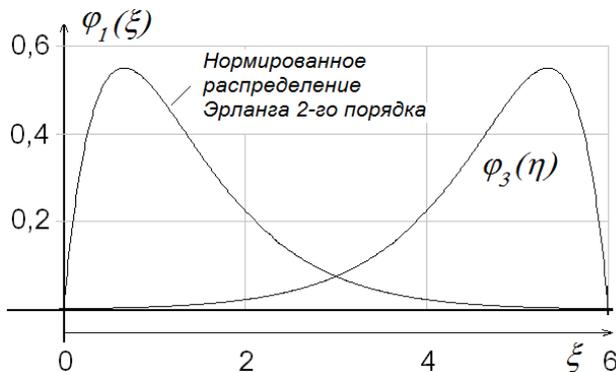


Рисунок 4 – Трансформация распределений

Плотность $\varphi_3(\eta)$ получается из плотности $\varphi_1(\xi)$ разворотом на 180 градусов. Это равносильно изменению положительных значений аргумента на отрицательные, в результате чего мы получаем плотность $\varphi_2(\pi)$. Выполняя сдвиг вправо, мы получаем плотность $\varphi_3(\eta)$.

Характеристическая функция (х. ф.) нормированного распределения Эрланга второго порядка $\chi(\zeta) = 4\lambda^2 / (2\lambda - i\zeta)^2$. Х. ф. случайной величины $\theta = a\xi$ выражается формулой $\chi_\theta(\zeta) = \chi_\xi(a\zeta)$, где $\chi_\xi(\zeta)$ – х. ф. случайной величины ξ . В нашем случае $a = -1$. Тогда $\chi_\eta(\zeta) = 4\lambda^2 / (2\lambda + i\zeta)^2$. Действительные и мнимые части х. ф. $\chi_\eta(\zeta)$ равны:

$$\operatorname{Re} \chi_\eta(\zeta) = \frac{4\lambda^2(4\lambda^2 - \zeta^2)}{4\lambda^2 + \zeta^2}, \quad \operatorname{Im} \chi_\eta(\zeta) = -\frac{16\lambda^3\zeta}{4\lambda^2 + \zeta^2}.$$

Эти функции используются в численном методе нахождения плотности распределения вероятностей величины полосы пропускания, который описан в работе [11]. Используется формула обращения с интерполяцией многочленом Лагранжа действительной и мнимой частей эквивалентной х. ф. композиции случайных величин, каждая из которых определяет случайную величину полосы пропускания одного из виртуальных каналов.

Необходимую суммарную полосу пропускания физического канала можно определить, например, по величине интервала «трех сигм». Можно использовать и другие факторы, такие как возможность прокладки резервных виртуальных каналов, организации явных обратных связей и каналов управления. Кроме того, важно

учитывать и характер трафика. Например, для IP-телефонии допускается потеря пакетов (1-2 %). Еще большей избыточность может быть для видеoinформации или медленно изменяющихся параметров телеметрии, таких как давление или температура. Таким образом, реальная полоса пропускания может даже превышать физически доступную полосу канала.

Заключение. Предлагаемый метод расчета характеристик сети передачи измерительной информации можно применить при большом числе объектов испытаний. На практике их число может составить несколько десятков. Может возникнуть необходимость задействовать для передачи информации значительное число виртуальных каналов. Простота алгоритмов расчета математического распределения, дисперсии и плотности распределения вероятностей времени передачи кадра ИИ от ИС до ЦС позволяет использовать для расчетов в реальном времени технологии параллельных вычислений, в частности применяемых на многоядерных процессорах.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант 14-07-00106-а.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания № 9-14Г (№ государственной регистрации НИР: 115011560084).

Библиографический список

1. Перепелкин Д.А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом подключении узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-1 (46). С. 67-75.
2. Перепелкин Д.А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 84-91.
3. Перепелкин Д.А. Динамическое формирование структуры и параметров линий связи корпоративной сети на основе данных о парных перестановках маршрутов // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 52-60.
4. Лукьянов О.В. Математическое обеспечение автоматизированного проектирования сети передачи данных опто-электронных средств полигонного измерительного комплекса: канд. дисс. Рязань. 2014. С. 42-43.
5. Ижванов Ю.Л., Корячко В.П., Шибанов А.П., Сапрыкин А.Н., Лукьянов О.В. Оптимизация сетей с дозированной балансировкой нагрузки и пиринговыми каналами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 1(43). С. 67-74.
6. Ижванов Ю.Л., Корячко В.П., Шибанов А.П.,

Сапрыкин А.Н., Лукьянов О.В. Оптимизация сети с дозированной балансировкой нагрузки // Системы управления и информационные технологии. № 3(49). 2012. С. 37-42.

7. Корячко В.П., Лукьянов О.В., Шибанов А.П. Нахождение периода занятости сети передачи данных полигонного измерительного комплекса // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 8-16.

8. Корячко В.П., Шибанов А.П., Сапрыкин А.Н., Лукьянов О.В. Планирование потоков в сети передачи данных оптико-электронных средств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-1. С. 55-59.

9. Корячко В.П., Ижванов Ю.Л., Шибанов А.П. Моделирование агрегированного телекоммуникационного канала с технологией открытых потоков // Радиотехника, 2012. № 3. С. 109-112.

10. Pritsker. A.A.B. GERT" Graphical evaluation and review technique. Memorandum RM-4973-NASA. 1966. 138 p.

11. 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. Volume 64. Issue 2. P. 279-287.

12. Шибанов А.П., Шибанов В.А. Вычисление распределения выходной величины GERT-сети с экспоненциально и равномерно распределенными случайными величинами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 7. С. 1-9.

13. Привалов И.И. Введение в теорию функций комплексного переменного. М.: Наука, 1984. 432 с.

14. Корячко В.П., Шибанов А.П., Сапрыкин А.Н. Расчет вариации времени передачи пакетов в сети с двухфазной маршрутизацией [Электронный ресурс]: Труды XII всероссийского совещания по проблемам управления. Электрон. дан. М.: ИПУ РАН, 2014.