

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.725.7

В.П. Корячко, А.П. Шибанов, А.Н. Сапрыкин, Х.Л. Фам

НАХОЖДЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГИРОВАННОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается задача нахождения характеристик агрегированного канала передачи измерительной информации. Находятся математическое ожидание и дисперсия времени передачи кадров через канал при различных параметрах вероятностного распределения времени его передачи. Определяются наиболее важные характеристики канала измерительной информации с использованием системы массового обслуживания M/G/1.

Ключевые слова: сеть передачи данных, опτικο-электронные средства, измерительная информация, система массового обслуживания M/G/1, плотность распределения вероятностей.

Введение. Канал сети передачи данных (СПД) полигонного измерительного комплекса (ПИК) производит прием, группирование и передачу информации от нескольких измерительных систем. Это антенные комплексы приема телеметрической информации, внешнетракторные радиотехнические и опτικο-электронные станции, лазерные дальномеры, тепловизионные инфракрасные приборы, фототеодолитные станции, звукометрические батареи и т. п. Значительный объем трафика составляют данные, передаваемые от опτικο-электронных средств. Информация от различных систем группируется и представляет собой кадры определенной длины, с маркерами окончания строки и кадра. Кадр измерительной информации делится на две равные части (пакеты), передаваемые одновременно в параллельном режиме. Это позволяет сократить время передачи, уменьшить его вариацию, а при необходимости использовать один из параллельных каналов в случае отказа другого. В формате пакета имеются типовые служебные поля бит, содержащие заголовок пакета, конец пакета, управляющую информацию и т. п., необходимые для работы протокола передачи канала связи. Длительность передачи пакета зависит от особенностей работы протокола передачи, наличия сбоев и помех. В общем случае она является случайной величиной. После успешного приема обоих пакетов на приемной

стороне канала они снова формируются в кадр для передачи в центр обработки информации. Вопросам передачи измерительной информации по агрегированному каналу посвящены, в частности, работы [1-4].

На основании статистического анализа можно сделать вывод о том, что моменты прихода кадров измерительной информации хорошо описываются пуассоновским случайным процессом с совокупной интенсивностью λ .

Для планирования работы СПД ПИК важно оценивать среднее значение интервала времени, называемого интервалом занятости, в течение которого канал непрерывно передает пакеты. Естественно определяется и период простоя. Это период времени, когда система свободна и может переключиться на выполнение других задач [5]. Для использования этих периодов на практике необходимо обеспечить достаточно высокую точность оценки длины указанных интервалов и их среднеквадратических отклонений. Отклонения от среднего значения можно характеризовать значением интервала «трех сигм». При этом можно рассчитывать на то, что большинство случайных исходов с вероятностью 0,95 – 0,98 будет попадать в этот интервал. Однако период простоя прерывается, если на входе канала появляется заявка на обслуживание основного потока требований.

Для обеспечения гарантии окончания теку-

щей фоновой задачи часто вводится режим работы системы с перерывами. В этом режиме фоновая задача длительностью V должна завершиться, и только тогда управление передается алгоритмам передачи основного потока с интенсивностью Λ .

Исходная статистическая информация о работе канала передачи измерительной информации представляется в виде гистограмм, которые отражаются гипотетическим распределением – нормированным распределением Эрланга. Форма плотности распределения задается двумя параметрами: параметром масштаба λ и порядком распределения k . Переход от гистограммы к непрерывной кривой плотности распределения вероятностей осуществляется посредством использования критерия согласия, например χ^2 . При этом, чем больше доступные интервалы изменения параметров в паре (λ, k) , тем лучше получается аппроксимация. Однако в указанных выше работах учитывалось только одно значение порядка распределения $k = 2$, что ограничивает возможности рассматриваемой методики.

Целью работы является нахождение основных характеристик канала передачи измерительной информации при подтверждении гипотезы о том, что случайное время передачи кадра распределено по нормированному закону Эрланга второго, третьего и четвертого порядков.

Задачей исследований является нахождение первого и второго моментов распределения времени передачи кадра по агрегированному каналу передачи измерительной информации. Это необходимо для определения основных вероятностно-временных характеристик канала, когда на его вход подается простейший совокупный поток сообщений с общей интенсивностью Λ .

Должны быть получены:

- 1) среднее значение \bar{N} – числа кадров в системе (в канале);
- 2) среднее значение \bar{N}_Q – числа кадров в очереди канала;
- 3) среднее значение \bar{T} – времени пребывания кадра в системе;
- 4) среднее значение \bar{W} – времени пребывания кадра в очереди;
- 5) среднее значение интервала занятости канала;
- 6) среднее значение интервала простоя канала;
- 7) характеристики канала в режиме с перерывами на выполнение фоновых задач.

Теоретическая часть. Рассмотрим сравнительные характеристики канала передачи изме-

рительной информации при значениях параметра $k = 2, k = 3$ и $k = 4$.

1. В работе [6] получены среднее время передачи кадра и дисперсия агрегированного канала для случая, когда параметр вероятностного распределения $k = 2$:

$$\bar{X} = \frac{T}{2} + \frac{11}{16\alpha},$$

где T – постоянная составляющая задержки в канале, α – параметр интенсивности распределения Эрланга;

$$\sigma^2 = \bar{X}^2 - (\bar{X})^2 = \frac{35}{256\alpha^2}.$$

Здесь \bar{X} и \bar{X}^2 – первый и второй моменты времени передачи измерительного кадра по каналу передачи.

Рассмотрим работу канала в типичном случае, когда на его вход подается простейший совокупный поток с общей интенсивностью Λ .

Квадрат коэффициента вариации времени передачи кадра через агрегированный канал определяется выражением:

$$C^2 = \frac{\sigma^2}{(\bar{X})^2} = \frac{0,548}{(T\alpha + 1,375)^2}.$$

Согласно формулам Поллачека – Хинчина [5, 7] среднее число кадров \bar{N} , проходящих через систему массового обслуживания $M/G/1$, которой может быть описан данный канал передачи измерительной информации, определяется выражением:

$$\bar{N} = \rho + \frac{\rho^2 \left[1 + \sigma^2 / (\bar{X})^2 \right]}{2(1 - \rho)},$$

где $\rho = \Lambda / \bar{X} = \frac{2\Lambda\alpha}{T\alpha + 1,375}$. После выполнения преобразований получаем:

$$\begin{aligned} \bar{N} = & \frac{4\Lambda\alpha(T\alpha + 1,375)^2 (T\alpha - \Lambda\alpha + 1,375)}{2(T\alpha + 1,375)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,375)} + \\ & + \frac{2,192\Lambda^2\alpha^2}{2(T\alpha + 1,375)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,375)}. \end{aligned}$$

Среднее число кадров, находящихся в очереди:

$$\begin{aligned} \bar{Q} = \bar{N} - \rho = & \frac{\rho^2 \left[1 + \sigma^2 / (\bar{X})^2 \right]}{2(1 - \rho)} = \\ = & \frac{4\Lambda^2\alpha^2(T\alpha + 1,375)^2 + 2,192\Lambda^2\alpha^2}{2(T\alpha + 1,375)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,375)}. \end{aligned}$$

Среднее время передачи кадра через канал:

$$\bar{T} = \bar{X} + \frac{\Lambda \left[1 + \sigma^2 / (\bar{X})^2 \right]}{2(1 - \Lambda / \bar{X})} =$$

$$= \frac{(T\alpha + 1,375)^2 (T\alpha - \Lambda\alpha + 1,375) + 0,548\Lambda\alpha}{2\alpha(T\alpha + 1,375)(T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,375)}.$$

Среднее время нахождения кадра в очереди:

$$\bar{W} = \frac{\Lambda(T\alpha + 1,375)^2 + 0,548\Lambda}{2(T\alpha + 1,375)(T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,375)}.$$

II. Параметр вероятностного распределения $k = 3$.

При передаче кадра по двум параллельным путям функция распределения времени передачи пакета:

$$F(t) = \left\{ 1 - e^{-3\alpha(2t-T)} \left[\frac{9}{2} \alpha^2 (2t-T)^2 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + 3\alpha(2t-T) + 1 \right] \right\}^2, t - \frac{T}{2} \geq 0.$$

Из этого выражения получена эквивалентная производящая функция моментов времени передачи кадра по двум параллельным путям:

$$M_E(s) = 432 \alpha^3 e^{\frac{sT}{2}} \left[\frac{1}{(6\alpha - s)^3} - \frac{1}{(12\alpha - s)^3} - \right.$$

$$\left. - \frac{18\alpha}{(12\alpha - s)^4} - \frac{216\alpha^2}{(12\alpha - s)^5} \right].$$

Из последнего выражения найдены математическое ожидание \bar{X} и дисперсия σ^2 времени передачи кадра по параллельному каналу:

$$\bar{X} = \frac{T}{2} + 0,656 \alpha^{-1}; \quad \sigma^2 = 0,086 \alpha^{-2}.$$

Квадрат коэффициента вариации для агрегированного канала находится по формуле:

$$C^2 = \frac{0,344}{(T\alpha + 1,312)^2}.$$

Среднее число кадров, проходящих через канал:

$$\bar{N} = \frac{4\Lambda\alpha(T\alpha + 1,312)^2 (T\alpha - \Lambda\alpha + 1,312)}{2(T\alpha + 1,312)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,312)} +$$

$$+ \frac{1,376\Lambda^2\alpha^2}{2(T\alpha + 1,312)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,312)}.$$

Среднее число кадров, находящихся в очереди:

$$\bar{Q} = \frac{4\Lambda^2\alpha^2(T\alpha + 1,312)^2 + 1,376\Lambda^2\alpha^2}{2(T\alpha + 1,312)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,312)}.$$

Среднее время передачи кадра через канал:

$$\bar{T} = \frac{(T\alpha + 1,312)^2 (T\alpha - \Lambda\alpha + 1,312) + 0,344\Lambda\alpha}{2\alpha(T\alpha + 1,312)(T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,312)}.$$

Среднее время нахождения кадра в очереди:

$$\bar{W} = \frac{\Lambda(T\alpha + 1,312)^2 + 0,344\Lambda}{2(T\alpha + 1,312)(T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,312)}.$$

III. Параметр вероятностного распределения $k = 4$.

Функция распределения времени передачи кадра:

$$F(t) = \left\{ 1 - e^{-4\alpha(2t-T)} \left[\frac{32}{3} \alpha^3 (2t-T)^3 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + 8\alpha^2 (2t-T)^2 + 4\alpha(2t-T) + 1 \right] \right\}^2, t - \frac{T}{2} \geq 0.$$

Из этого выражения получена эквивалентная производящая функция моментов времени передачи кадра

$$M_E(s) = 8192 \alpha^4 e^{\frac{sT}{2}} \left[\frac{1}{(8\alpha - s)^4} - \frac{1}{(16\alpha - s)^4} - \right.$$

$$\left. - \frac{32\alpha}{(16\alpha - s)^5} - \frac{640\alpha^2}{(16\alpha - s)^6} - \frac{10240\alpha^3}{(16\alpha - s)^7} \right].$$

Математическое ожидание и дисперсия времени передачи кадра по агрегированному каналу определяются выражениями:

$$\bar{X} = \frac{T}{2} + 0,637 \alpha^{-1}; \quad \sigma^2 = 0,06 \alpha^{-2}.$$

Квадрат коэффициента вариации времени передачи кадра определяется выражением:

$$C^2 = \frac{0,24}{(T\alpha + 1,274)^2}.$$

Среднее число кадров, проходящих через канал:

$$\bar{N} = \frac{4\Lambda\alpha(T\alpha + 1,274)^2 (T\alpha - \Lambda\alpha + 1,274)}{2(T\alpha + 1,274)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,274)} +$$

$$+ \frac{0,96\Lambda^2\alpha^2}{2(T\alpha + 1,274)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,274)}.$$

Среднее число кадров, находящихся в очереди:

$$\bar{Q} = \frac{4\Lambda^2\alpha^2(T\alpha + 1,274)^2 + 0,96\Lambda^2\alpha^2}{2(T\alpha + 1,274)^3 (T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,274)}.$$

Среднее время передачи кадра через канал:

$$\bar{T} = \frac{(T\alpha + 1,274)^2 (T\alpha - \Lambda\alpha + 1,274) + 0,24\Lambda\alpha}{2\alpha(T\alpha + 1,274)(T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,274)}.$$

Среднее время нахождения кадра в очереди:

$$\bar{W} = \frac{\Lambda(T\alpha + 1,274)^2 + 0,24\Lambda}{2(T\alpha + 1,274)(T\alpha - 2\Lambda\alpha + 1,274)}.$$

Сравним математические ожидания и дисперсии времени передачи кадра по каналу при различных значениях параметра k . Постоянную

составляющую задержки в канале прием равной 10 мс.

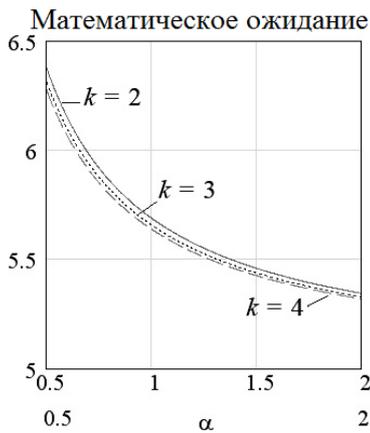


Рисунок 1 – Математические ожидания времени передачи кадра по каналу при $k = 2, 3$ и 4

Из рисунка 1 видно, что при изменении параметра интенсивности распределения Эрланга от 0,5 до 2 средние задержки при разных параметрах k примерно равны. Например, при $\alpha = 0,5$ средние задержки принимают значения: 6,375 мс, 6,312 мс и 6,274 мс при $k = 2, 3$ и 4 соответственно. При увеличении параметра α до 2 математическое ожидание уменьшается с 6,375 мс до 5,344 мс при $k = 2$ и с 6,274 мс до 5,319 мс при $k = 4$.

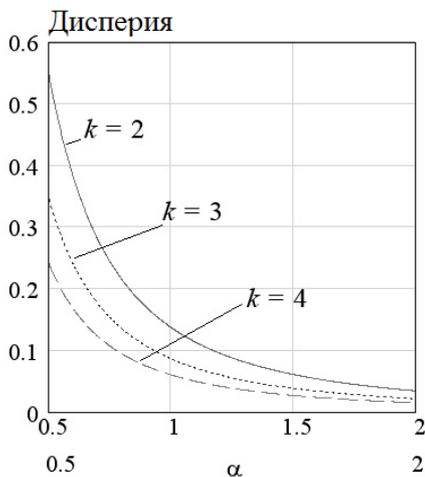


Рисунок 2 – Дисперсии времени передачи кадра по каналу при $k = 2, 3$ и 4

Из рисунка 2 мы видим, что среднеквадратические отклонения при указанных параметрах k и $\alpha = 0,5$ принимают значения от 0,547 мс до 0,24 мс, а при увеличении параметра интенсивности распределения Эрланга до 2 принимают значения от 0,034 мс до 0,015 мс. При этом, чем большие значения принимает параметр интенсивности распределения Эрланга, тем более близкие значения принимают дисперсии времени передачи кадра по каналу при различных значениях параметра k .

Таким образом, параметр k влияет на математическое ожидание времени передачи кадра по каналу в меньшей степени, чем на ее дисперсию.

Оценим характеристики стационарного режима работы канала в случае, когда на его вход подается простейший поток с интенсивностью $\lambda = 1$. Передача кадров производится в порядке их поступления. Постоянную составляющую задержки в канале прием равной 10 мс, а параметр интенсивности распределения Эрланга будем менять от 0,5 до 2, что хорошо согласуется со значениями изменения задержек в реальных каналах.

Таблица 1 – Значения основных характеристик канала при $\lambda = 1$ и $k = 2$

Наименование характеристики	Параметр интенсивности распределения Эрланга		
	0,5	1	2
Среднее число кадров, проходящих через канал	0,172	0,195	0,209
Среднее число кадров, находящихся в очереди	0,015	0,019	0,022
Среднее время передачи кадра через канал	6,976	6,297	5,96
Среднее время нахождения кадра в очереди	0,601	0,609	0,616

Таблица 2 – Значения основных характеристик канала при $\lambda = 1$ $k = 4$

Наименование характеристики	Параметр интенсивности распределения Эрланга		
	0,5	1	2
Среднее число кадров, проходящих через канал	0,175	0,197	0,21
Среднее число кадров, находящихся в очереди	0,015	0,019	0,022
Среднее время передачи кадра через канал	6,872	6,246	5,935
Среднее время нахождения кадра в очереди	0,598	0,609	0,616

При изменении параметра интенсивности распределения Эрланга от 0,5 до 2 при $k = 2$ (таблица 1) увеличивается среднее число кадров, проходящих через канал с 0,172 до 0,209. Среднее число кадров, находящихся в очереди, и среднее время нахождения кадра в очереди

остаются практически неизменными. В то же время среднее время передачи кадра через канал уменьшается с 6,976 мс до 5,96 мс, т. е. примерно на 1 мс. При $k = 4$ (таблица 2) мы наблюдаем похожие результаты. Среднее число кадров, находящихся в очереди, и среднее время нахождения кадра в очереди остаются практически неизменными, а среднее время передачи кадра через канал уменьшается с 6,872 мс до 5,935 мс.

Таким образом, изменяя параметр вероятностного распределения k , мы расширяем возможности представления модельных характеристик канала ПИК.

IV. Определение длительностей периодов занятости и простоя. Для нахождения периодов занятости и простоя канала ПИК используем известные формулы из теории массового обслуживания для системы $M/G/1$ [7].

Определение периода простоя. Пусть $A(t) = P[t_n \leq t] = 1 - e^{-\Lambda t}$, $t \geq 0$ есть функция распределения периода следования кадров, а $B(x) = P[x_n \leq x]$ – функция распределения времени обслуживания кадра. Нас интересуют $F(y) = P[I_n \leq y]$ – функция распределения периода простоя и $G(y) = P[Y_n \leq y]$ – функция распределения периода занятости, где через I и Y обозначены длительности периодов простоя и занятости. Когда система выходит из периода занятости, начинается новый период простоя, который длится до поступления следующего кадра. Так как процесс поступления новых кадров не имеет последствия, то время до следующего кадра распределено по пуассоновскому закону, и поэтому $F(y) = 1 - e^{-\Lambda y}$, $y \geq 0$. Тогда средняя длина периода простоя равна $1/\Lambda$, а его дисперсия $1/\Lambda^2$.

Период занятости. Условием стационарности режима работы канала является $\Lambda < 1/\bar{X}$. Нагрузка определяется как $\rho = \Lambda \bar{X}$. Средняя длина периода занятости системы $M/G/1$ [5] определяется выражением:

$$\bar{g} = \frac{\bar{X}}{1 - \rho} = \frac{\bar{X}}{1 - \Lambda \bar{X}}.$$

Дисперсия σ_g^2 периода занятости находится по формуле:

$$\sigma_g^2 = \frac{\sigma_{\text{кан}}^2 + \rho(\bar{X})^2}{(1 - \rho)^3} = \frac{\sigma_{\text{кан}}^2 + \Lambda(\bar{X})^3}{(1 - \Lambda \bar{X})^3},$$

где $\sigma_{\text{кан}}^2$ – дисперсия времени передачи кадра через канал связи. Тогда средние длины перио-

дов занятости канала для рассмотренных трех случаев определяется выражениями:

$$\bar{g} = \frac{2\alpha}{\alpha(T - 2\Lambda) + 1,375} \text{ для } k = 2,$$

$$\bar{g} = \frac{2\alpha}{\alpha(T - 2\Lambda) + 1,312} \text{ для } k = 3,$$

$$\bar{g} = \frac{2\alpha}{\alpha(T - 2\Lambda) + 1,274} \text{ для } k = 4.$$

Дисперсии периодов занятости для трех рассматриваемых случаев равны соответственно:

$$\sigma_g^2 = \frac{0,137(T\alpha + 1,375)^3 + 8\alpha^5\Lambda}{\alpha^2[\alpha(T - 2\Lambda) + 1,375]^3} \text{ для } k = 2,$$

$$\sigma_g^2 = \frac{0,086(T\alpha + 1,312)^3 + 8\alpha^5\Lambda}{\alpha^2[\alpha(T - 2\Lambda) + 1,312]^3} \text{ для } k = 3,$$

$$\sigma_g^2 = \frac{0,06(T\alpha + 1,274)^3 + 8\alpha^5\Lambda}{\alpha^2[\alpha(T - 2\Lambda) + 1,274]^3} \text{ для } k = 4.$$

V. Режим работы с перерывами. В конце периода занятости канал делает перерыв на время V , которое имеет первый и второй моменты, равные \bar{V} и \bar{V}^2 . Если канал не имеет кадров в момент окончания перерыва, то канал делает новый перерыв в обслуживании измерительных кадров. Измерительный кадр, поступивший в «пустой» канал для того, чтобы попасть на обслуживание, должен ждать до тех пор, пока не кончится перерыв.

Среднее время ожидания кадра в очереди [5]:

$$\bar{W} = \frac{\Lambda \bar{X}^2}{2(1 - \rho)} + \frac{\bar{V}^2}{2\bar{V}}.$$

После преобразований получаем:

$$\bar{W} = \frac{\Lambda(T^2\alpha^2 + 2,75T\alpha + 2,4375)}{8\alpha^2(1 - \rho)} + \frac{\bar{V}^2}{2\bar{V}}$$

для $k = 2$,

$$\bar{W} = \frac{\Lambda(T^2\alpha^2 + 2,624T\alpha + 2,065)}{8\alpha^2(1 - \rho)} + \frac{\bar{V}^2}{2\bar{V}}$$

для $k = 3$,

$$\bar{W} = \frac{\Lambda(T^2\alpha^2 + 2,548T\alpha + 1,863)}{8\alpha^2(1 - \rho)} + \frac{\bar{V}^2}{2\bar{V}}$$

для $k = 4$.

Согласно формуле Литтла среднее число кадров в очереди в режиме с перерывами:

$$\begin{aligned} N_Q &= (1/\Lambda)\bar{W} = \\ &= \frac{T^2\alpha^2 + 2,548T\alpha + 1,863}{8\alpha^2(1 - \rho)} + \frac{\bar{V}^2}{2\Lambda\bar{V}} \end{aligned}$$

для $k = 2$,

$$N_Q = \frac{(T^2\alpha^2 + 2,75T\alpha + 2,4375)}{8\alpha^2(1-\rho)} + \frac{\bar{V}^2}{2L\bar{V}}$$

для $k = 3$,

$$\bar{N}_Q = \frac{(T^2\alpha^2 + 2,624T\alpha + 2,065)}{8\alpha^2(1-\rho)} + \frac{\bar{V}^2}{2L\bar{V}}$$

для $k = 4$.

Заключение. Предложена методика расчета характеристик канала передачи данных полигонного измерительного комплекса, которая в отличие от аналогов обладает большей функциональностью в представлении в модели характеристик канала.

Полученные выражения для среднего времени передачи и его дисперсии для агрегированного канала, передающего измерительную информацию, можно использовать при проектировании различных базовых опорных сетей: цепи, кольца, дерева или ячеистой сети. При этом величины \bar{X} и σ^2 могут являться ограничениями в задаче оптимизации либо использоваться для конструирования целевой функции. Данная тематика рассматривалась в работах, посвященных проектированию сетей с двухфазовой маршрутизацией [8-10] и сетей с маршрутизацией с парными переходами [11-13].

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

Работа проведена в рамках выполнения госзадания № 9-14Г (№ госрегистрации НИР: 115011560084).

Библиографический список

1. 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. № 43. С. 67-74.
2. 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.

3. 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.

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

5. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. 544 с.

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

7. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

8. 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.

9. 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.

10. Ижванов Ю.Л., Корячко В.П., Шибанов А.П., Сапрыкин А.Н., Лукьянов О.В. Оптимизация сети с дозированной балансировкой нагрузки // Научно-технический журнал «Системы управления и информационные технологии». Москва-Воронеж, 2012. № 3(49). С. 37-42.

11. Перепелкин Д.А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом добавлении элементов корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 34. С. 65-71.

12. Перепелкин Д.А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом отказе элементов корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 37. С. 53-58.

13. 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.