

УДК 621.391

Теорема о своевременной передаче переменной нагрузки по каналу связи с памятью и отказами

Иванов С. А., Стародубцев Ю. И., Вершенник Е. В.

Постановка задачи. Современный этап развития общества характеризуется существенным влиянием на него реализующихся процессов цифровизации и информатизации. Это привело к экспоненциальному росту генерации нагрузки на инфокоммуникационные системы, ужесточению требований к качеству обслуживания и обусловило необходимость дальнейшего развития и совершенствования инфраструктуры связи, методов и способов эффективной передачи данных, подходов к обработке сигналов. Необходимым условием для выполнения этих задач является наличие математического аппарата, позволяющего оценить характеристики канала и передаваемых данных, а также определить требования к ним. Важнейшей ресурсной характеристикой канала связи является его пропускная способность. Исторически, в общей теории связи, фундаментальной для определения пропускной способности канала стала теорема Шеннона, которая получена применительно к условиям середины XX века. Данные условия существенно изменились по отношению к современным системам связи, что требует развития имеющихся решений. К принципиально новым условиям решения этой же научной задачи относятся интеграция разнотипных средств связи в инфокоммуникационную систему с памятью и вычислительной способностью, и передача по каналам связи с отказами переменной нагрузки, пиковые значения которой регулярно превосходят пропускную способность, что приводит к задержкам, снижению достоверности и частичной потере информации. **Целью** работы является обоснование требований к объему памяти канала по его характеристикам, характеру нагрузки и требованиям, предъявляемым к процессу ее передачи, для своевременной передачи данных по каналу связи. **Методы.** Представленные в статье соотношения направлены на развитие методов обеспечения функционирования сетей и систем связи путем управления их ресурсами. Основным отличием методов, разрабатываемых на основе полученного результата, является описание памяти элементов сетей и систем как их ресурсного свойства с вытекающими, из этого, подходами к передаче данных. **Результаты.** Сформулирована и доказана теорема, являющаяся развитием теоретических основ общей теории связи в части описания ресурсов инфокоммуникационных сетей и систем. Представленная теорема учитывает свойство памяти канала в условиях стохастической скорости ввода в него нагрузки и случайного потока отказов. Практическая значимость теоремы заключается в том, что она позволяет установить зависимость между временем восстановления канала и его характеристиками, включая параметры памяти. Это позволяет определить требования к подсистеме восстановления связи по характеристикам каналов, характеру нагрузки и требованиям, предъявляемым к процессу ее передачи, а также решать задачу определения требований к объему памяти каналов по его характеристикам, характеру нагрузки и требованиям, предъявляемым к процессу ее передачи.

Ключевые слова: канал с памятью, отказы, пропускная способность, теорема Шеннона.

Введение

Развитие науки, непрерывный технический прогресс привели к тому, что в настоящее время практически весь информационный обмен осуществляется с использованием цифровых методов обработки и передачи данных. Столь ши-

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов С. А., Стародубцев Ю. И., Вершенник Е. В. Теорема о своевременной передаче переменной нагрузки по каналу связи с памятью и отказами // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 5. С. 15-39. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-5-15-39

Reference for citation:

Ivanov S. A., Starodubtsev Yu. I., Vershennik Ye. V. Theorem on timely transmission of variable load via communication channel with memory and failures. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 5, pp. 15-39 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-5-15-39

рокое практическое применение современных цифровых технологий в телекоммуникационной отрасли, значительный рост объема передаваемых данных, а также необходимость выполнения жестких требований к качеству обслуживания вновь актуализируют вопрос о повышении пропускной способности каналов связи.

Основы теории оценивания пропускной способности каналов электросвязи были заложены Г. Найквистом (H. Nyquist) в 1924 – 1928 гг. В своих работах [1, 2] в качестве основных факторов, влияющих на максимальную скорость передачи сообщений, он рассматривает форму сигналов и выбор кодов. В [1] Найквист приводит и обосновывает формулу для «приблизительного» определения скорости передачи сообщений по телеграфной линии:

$$R = K \cdot \log m,$$

где R – скорость передачи сообщений, m – число уровней тока, K – константа. При этом в [2] он доказывает, что величина K не может превосходить величины $2F_H$, где F_H – частота среза телеграфного канала связи как фильтра нижних частот.

Исследования в этой области были продолжены такими выдающимися учеными, как R. Hartley [3], С. Shannon [4, 5], Д.Д. Кловский, В.А. Соيفер [6], В.А. Котельников [7, 8], А.Я. Хинчин [9], R. Fano [10], R. Hamming [11], А. Wyner [12], N. Wiener [13], W. Tuller [14], U. Bennet [15], D. Gabor [16], М.С. Пинскер, В.В. Прелов [17-19], Б.С. Цыбаков [20, 21], R. Gallager, E. Berlekamp [22-24], E. Gilbert [25], J. Pierce [26], S. Muroga [27], S. Arimoto [28], R. Vlahut [29], W. Oettli [30], J. Proakis [31], В. Sklar [32], Л.И. Хромов [33, 34], Г.И. Худяков [35-39], А.К. Цыцулин [40, 41], М.В. Литвин [42, 43] и др.

Фундаментальные работы этих ученых направлены на решение различных проблем и задач оценки и увеличения максимальной скорости передачи информации, в результате которых создана методическая база для оценивания информационной емкости статических и динамических каналов связи, введены понятия энтропии и остаточной неопределенности на выходе канала связи, позволяющие оценить информационные потери, сопровождающие передачу сообщений по каналам связи при наличии в них различного рода помех, разработаны методы вычисления скорости передачи информации для дискретного канала с помехами, а также нахождения области значений пропускной способности непрерывного гауссовского канала с аддитивным гауссовским шумом, симметричного бинарного канала связи, гауссовского векторного канала, векторного гауссовского канала без памяти, определена пропускная способность многолучевых каналов связи в условиях медленных замираний, проведены исследования асимптотического поведения пропускной способности при различном поведении тех или иных параметров, рассмотрены вопросы сокращения избыточности сообщений (кодирование источника) и передачи сообщений с минимальными искажениями по каналам связи с шумом (кодирование канала), оценено влияние вида модуляции (манипуляции) и количество уровней сигнала на пропускную способность канала связи, разработаны численные методы расчета пропускной способности каналов при наличии помех, при различных ограничениях в каналах электросвязи, для различных дискретных источников сообщений.

Однако основополагающей для оценивания пропускной способности цифровых каналов электросвязи до сих пор остается **теорема Шеннона** [4]:

Пусть P – средняя мощность передатчика и пусть помеха есть белый шум с мощностью N в полосе частот W . Применяя достаточно сложную систему кодирования, можно передавать двоичные символы со скоростью

$$C = W \log_2 \frac{P + N}{N}$$

со сколь угодно малой частотой ошибок. Никакой метод кодирования не допускает передачи с большей скоростью при произвольно малой частоте ошибок.

Теорема Шеннона сформулирована применительно к потребностям и в терминологии середины XX века.

В современной терминологии теорема звучит следующим образом: *если скорость передачи сообщений меньше пропускной способности канала связи $R < C$, то существуют коды и методы декодирования такие, что средняя и максимальная вероятность ошибки стремятся к нулю, когда длина блока стремится к бесконечности; если же $R > C$, то кода, на основе которого можно добиться сколь угодно малой вероятности ошибки, не существует.*

Развивая труды Уиттекера, Найквиста и Хартли в общей теории связи, Шеннон рассматривал простой канал без отказов с пропускной способностью C в условиях постоянной информационной нагрузки R .

Данная постановка задачи является упрощенной по отношению к современным системам связи. К принципиально новым условиям решения этой же научной задачи относятся:

- интеграция разнотипных средств связи в инфокоммуникационную систему с памятью и вычислительной способностью [44];
- передача по каналам связи с отказами переменной нагрузки, пиковые значения которой регулярно превосходят пропускную способность, что приводит к потере части информации.

Выдвигаемая авторами теорема является развитием теоремы Шеннона. В отличие от теоремы Шеннона, представленная теорема дополнительно описывает свойство памяти канала связи в условиях переменной нагрузки.

Под *памятью* инфокоммуникационной системы будем понимать способность системы и ее элементов записывать, хранить и извлекать определенный объем данных [44].

Под *вычислительной способностью* будем понимать способность инфокоммуникационной системы и ее элементов обрабатывать определенный объем данных в единицу времени. Скорость обработки данных современными телекоммуникационными устройствами многократно превышает скорость восприятия информации (данных) человеком, поэтому вносимые при обработке задержки, на практике, практически не заметны для человеческого восприятия [44].

В частном случае, когда нагрузка на канал постоянная и меньше его пропускной способности, а отказов нет, сформулированная авторами теорема сводится к теореме Шеннона.

Постановка и решение задачи

Для формальной постановки и решения задачи в статье использованы обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
R	– скорость передачи сообщений
m	– число уровней тока
K	– константа
F_n	– частота среза телеграфного канала связи как фильтра нижних частот
C	– пропускная способность канала связи
C'	– остаточная пропускная способность канала связи
P	– средняя мощность передатчика
N	– мощность шума
W	– полоса частот канала связи
$R_n(t)$	– переменная скорость ввода информационной нагрузки в канал связи
$R_{n \max}$	– пиковые значения скорости ввода информационной нагрузки в канал связи
$R_{n \min}$	– минимальные значения скорости ввода информационной нагрузки в канал связи
$t_{\text{тр}}$	– требуемое время передачи данных
$t_{\text{отказа}}$	– время отказа
$t_{\text{вост}}$	– время восстановления
$t'_{\text{вост}}$	– предельное время восстановления канала связи с памятью, при котором выполняются требования к своевременности передачи данных
$t_{\text{прев}}$	– длительность отказа вследствие превышения пиковых значений скорости ввода информационной нагрузки пропускной способности канала связи
$R_{\text{сч}}$	– скорость ввода в канал связи сохраненной информационной нагрузки из памяти
$M[R_n]$	– математическое ожидание скорости ввода информационной нагрузки
$M[C]$	– математическое ожидание пропускной способности
V	– объем памяти
J	– количество переданных блоков данных в течение одного отказа
K	– количество отказов
J_k	– количество переданных блоков в течение k отказов
$t_{\text{вост } k}$	– время восстановления k отказов
$V_{\text{с}k}$	– объем данных, который должен быть сохранен за время восстановления $t_{\text{вост } k}$
$t_{\text{доп } k}$	– дополнительное время передачи объема данных, сохраненных за время за время $t_{\text{вост } k}$

Пусть канал связи с памятью (рис. 1) характеризуется постоянной пропускной способностью C и переменной скоростью ввода нагрузки в канал $R_n(t)$, пиковые значения которой больше пропускной способности $R_{n \max} > C$; к времени передачи данных предъявляются требования $t_{\text{тр}}$. В процессе функционирования канала связи возникают отказы (характеризующиеся временем отказа $t_{\text{отказа}}$): сбои, устраняемые в течении времени $t_{\text{вост}}$, и отказы вследствие превышения пропускной способности канала пиковыми значениями скорости ввода в него

нагрузки ($R_{H \max} > C$) длительностью $t_{\text{прев}}$. Память характеризуется скоростью вывода из нее сохраненной нагрузки в канал связи $R_{\text{сч}}$.

Необходимо определить, при каких значениях объема памяти канала связи возможна своевременная и достоверная передача потока данных.

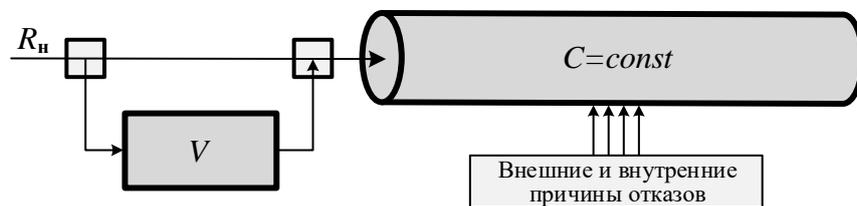


Рис. 1. Графическое представление канала связи с памятью

Теорема. Если пиковая скорость ввода нагрузки в канал связи с памятью и отказами больше его пропускной способности $R_{H \max} > C$, а математическое ожидание скорости ввода меньше математического ожидания пропускной способности $M[R_H] < M[C]$, то при выполнении условия

$$\int_{t_{H \text{ отказа } k}}^{t_{o \text{ отказа } k} + t_{\text{тр}}} R_H(t) dt \leq C \cdot t_{\text{тр}}$$

достаточно объема памяти $V = C \cdot t_{\text{тр}}$, скорость записи и считывания которой не менее C , для своевременной передачи двоичных символов со сколь угодно малой вероятностью битовых ошибок.

Для доказательства первого утверждения теоремы ($V \geq C \cdot t_{\text{тр}}$) необходимо последовательно рассмотреть две задачи:

- передача нагрузки постоянной скоростью, меньшей, чем пропускная способность канала;
- передача нагрузки с переменной скоростью, пиковые значения которой больше чем пропускная способность канала.

1. Постановка первой задачи

Пусть канал связи с памятью характеризуется постоянной пропускной способностью C и постоянной скоростью ввода нагрузки в канал $R_H < C$, к которой предъявляются требования к времени передачи данных $t_{\text{тр}}$. В процессе функционирования канала связи возникают сбои, устраняемые в течении времени $t_{\text{вост}}$.

Необходимо найти значение объема памяти V , достаточного для своевременной и достоверной передачи данных по каналу связи.

Для решения задачи сформулирована и доказана лемма 1.

Лемма 1. В канале связи с памятью, скорость ввода нагрузки в который постоянна и меньше его пропускной способности $R_H < C$, время восстановления канала при сбоях удовлетворяет условию $t_{\text{вост}} \leq t_{\text{тр}} \left(1 - \frac{R_H}{C} \right)$, достаточно объема памяти $V = R_H \cdot t_{\text{тр}}$ для устойчивой передачи данных с требуемой своевременностью.

Возникновение отказов в канале связи в агрессивной внешней среде имеет случайный характер, поэтому возможны различные варианты временных соотношений передаваемых блоков данных и возникающих отказов. Рассмотрим *три* варианта:

1. K отказов при передаче одного блока данных.
2. Один отказ при передаче J блоков данных в течение отказа.
3. K отказов при передаче J_k блоков данных в течение отказов.

1.1. K отказов при передаче одного блока данных

Графическое представление первого варианта процесса передачи данных по каналу связи с памятью представлено на рис. 2, где $t_{тр}$ указано для объема нагрузки, передаваемого в течение t_n .

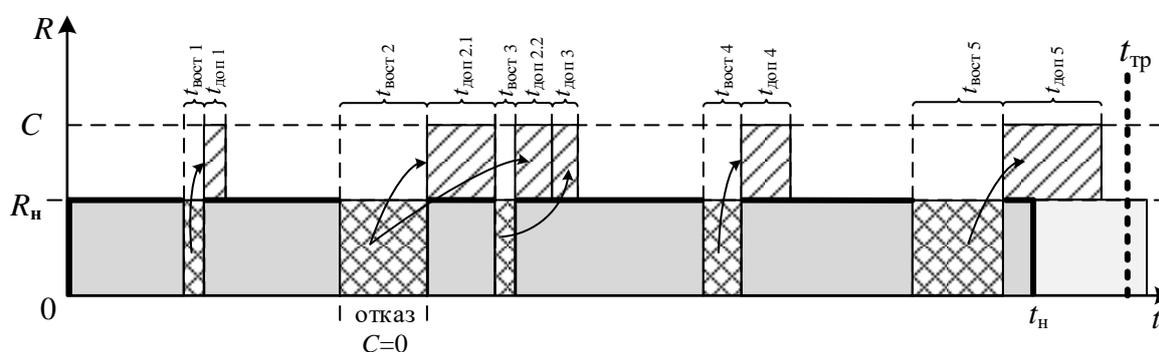


Рис. 2. Графическое представление передачи нагрузки с постоянной скоростью ввода в канал связи с памятью и K отказами (на рисунке представлено 5 отказов) при передаче одного блока данных

При постоянной нагрузке объем данных, который должен быть сохранен за время $t_{вост k}$, будет равен:

$$Vc_k = R_n \cdot t_{вост k} \quad (1)$$

При восстановлении работоспособности канала этот объем данных будет передаваться в течение дополнительного времени передачи $t_{доп k}$:

$$t_{доп k} = \frac{Vc_k}{C - R_n}$$

Итоговый объем сохраненных данных блока данных, передающегося по каналу в течении t_n , будет равен:

$$Vc = R_n \cdot \sum_{k=1}^K t_{вост k}$$

Предельный случай, для максимального использования объема памяти, будет один продолжительный отказ, возникающий с начала ввода блока данных в канал связи до некоторого предельного времени $t_{вост}$ (рис. 3), при котором остаточной пропускной способности канала $(C - R_n)$ в оставшийся временной интервал $(t_{тр} - t_{вост})$ достаточно для передачи сохраненных данных Vc при исправном канале.

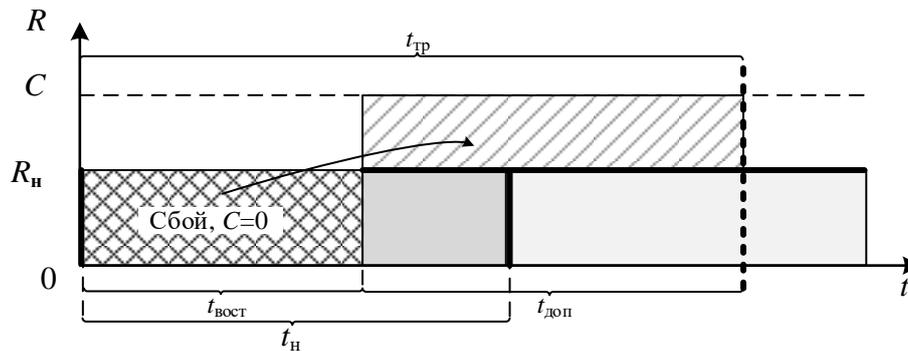


Рис. 3. Графическое представление передачи нагрузки с постоянной скоростью ввода в канал связи с памятью и отказом предельной продолжительности для передачи блока данных

Для этого должно выполняться условие:

$$Vc \leq (C - R_n) \cdot (t_{тр} - t_{вост}), \quad (2)$$

тогда, путем преобразований, для предельного времени восстановления $t_{вост}$ получим критерий:

$$t_{вост} \leq t_{тр} \left(1 - \frac{R_n}{C} \right), \quad (3)$$

следовательно, объем памяти канала V должен удовлетворять условию:

$$V \geq R_n \cdot t_{тр} \left(1 - \frac{R_n}{C} \right). \quad (4)$$

1.2. Один отказ при передаче J блоков данных в течение отказа

Графическое представление второго варианта процесса передачи данных по каналу связи с памятью представлено на рис. 4, где $t_{тр}$ указано для объема нагрузки j -го блока данных.

При постоянной нагрузке, объем данных, который должен быть сохранен за время $t_{вост k}$ (в данном случае $k = 1$), будет определяться выражением (1).

При восстановлении работоспособности канала этот объем данных будет передаваться в течение дополнительного времени передачи $t_{доп k}$:

$$t_{доп k} = \frac{Vc_k}{C - R_n}.$$

При передаче J блоков данных:

$$t_{вост k} = \sum_{j=1}^J t_{j н}, \quad t_{доп k} = \sum_{j=1}^J t_{j п},$$

где $t_{j н}$ – время поступления j -го блока данных в неисправный канал связи в общем потоке нагрузки; $t_{j п}$ – время передачи запомненного j -го блока данных после восстановления канала в остаточном ресурсе его пропускной способности.

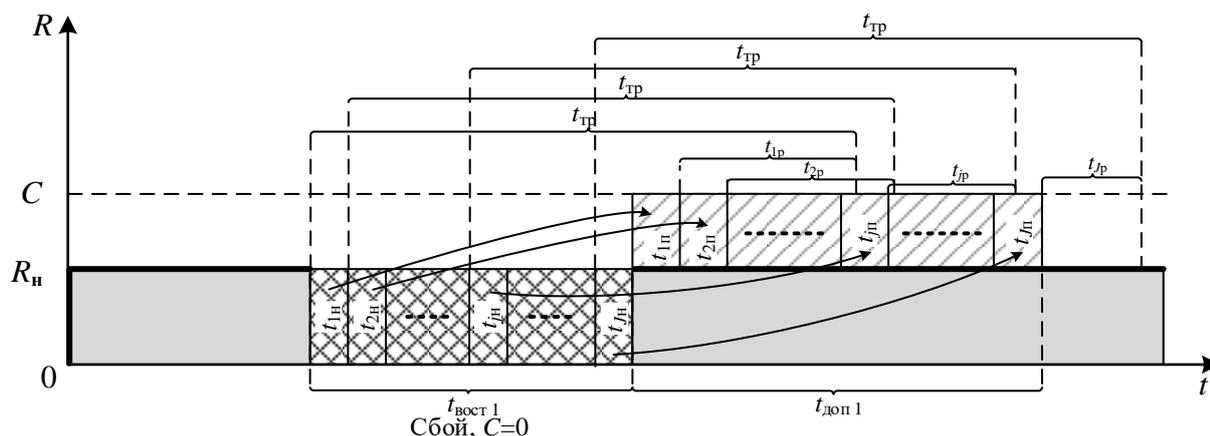


Рис. 4. Графическое представление передачи нагрузки с постоянной скоростью ввода в канал связи с памятью и одним отказом при передаче J блоков данных

Допустим, что поток данных однородный, тогда к передаче его блоков предъявляются одинаковые требования по своевременности (t_n), $t_{jн} = \text{const}$ и $t_{jп} = \text{const}$; каждый блок данных будет характеризоваться собственным предельным временем своевременной передачи на общей временной оси и собственным резервным временем передачи ($t_{jр}$).

Из рис. 4 видно, что если $R_n < (C - R_n)$, то при передаче каждого последующего блока данных после восстановления канала $t_{jр}$ будет расти; если $R_n > (C - R_n)$, то при передаче каждого последующего блока данных после восстановления канала $t_{jр}$ будет уменьшаться. Для выполнения требований по своевременности передачи данных необходимо рассмотреть второй случай, в котором, очевидно, все J запомненные блоки данных будут переданы своевременно, если будет своевременно передан последний блок ($j = J$). Для этого должно выполняться условие:

$$t_{\text{восст } k} \leq \frac{C - R_n}{R_n} (t_{\text{тр}} - t_{Jн}), t_{jр} \geq 0. \quad (5)$$

При $t_{\text{тр}} \gg t_{Jн}$ последним можно пренебречь, тогда для любого сбоя:

$$t_{\text{восст}} \leq t_{\text{тр}} \frac{C - R_n}{R_n}, \quad (6)$$

следовательно, объем памяти канала V должен удовлетворять условию:

$$V \geq t_{\text{тр}} (C - R_n). \quad (7)$$

1.3. K отказов при передаче J_k блоков данных в течение отказов

Графическое представление третьего варианта процесса передачи данных по каналу связи с памятью (с 3-мя отказами) представлено на рис. 5, где $t_{\text{тр}}$ указано для последнего J_k блока данных, записанных в память при k -ом сбое.

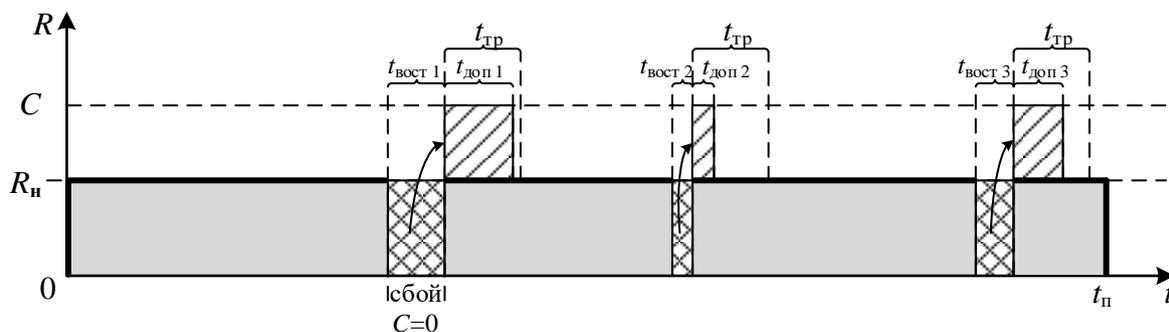


Рис. 5. Графическое представление передачи нагрузки с постоянной скоростью ввода в канал связи с памятью и K отказами (на рисунке представлено 3 отказа) при передаче J_k блоков данных в течении отказов

При постоянной нагрузке, объем данных, который должен быть сохранен за время $t_{\text{восст } i}$ будет определяться выражением (1).

При восстановлении работоспособности канала связи этот объем данных будет передаваться в течение дополнительного времени передачи $t_{\text{доп } k}$, при этом, для выполнения требований к своевременности передачи данных должно выполняться условие:

$$t_{\text{доп } i} \leq t_{\text{тр}} \cdot \tag{8}$$

Условие (8) справедливо при передаче записанных в память данных в том же порядке, в котором они передавались по каналу до сбоя. Дополнительное время передачи данных, накопленных в памяти канала за время $t_{\text{восст } k}$ можно вычислить по формуле:

$$t_{\text{доп } k} = \frac{R_n}{C - R_n} t_{\text{восст } k} \cdot \tag{9}$$

Из выражения (9) видно, что для выполнения требований по своевременности передачи данных необходимо предъявить к времени восстановления канала связи при постоянных C и R_n требование (5), которое при условии $t_{\text{тр}} \gg t_{J_k n}$ примет вид:

$$t_{\text{восст } k} \leq \frac{C - R_n}{R_n} t_{\text{тр}} \tag{10}$$

Примем выражение (2) в качестве допущения, тогда можно говорить, что при любом сбое данные будут переданы при достаточном объеме памяти канала связи.

Из рис. 5 видно, что хранение данных в памяти происходит циклически, где в цикл входит запись потока данных при сбое и передача записанных данных (освобождение памяти) при восстановлении канала связи. Поэтому, с учетом выполнения допущения (10), очевидно, что предельный объем памяти будет определяться выражением (7), а при $C \geq 2R_n$ он должен удовлетворять условию:

$$V \geq R_n \cdot t_{\text{тр}} \cdot \tag{11}$$

В таблице 2 представлено сравнение условий передачи данных при различных вариантах временных соотношений передаваемых блоков данных и возникающих отказов. Выражение (11) соответствует максимальному значению объема памяти по сравнению с (4) и (7), а выражение (3) минимальному значению времени восстановления по сравнению с (6) и (10). Поэтому получение условий (3) и (11) *доказывает* лемму 1.

Таблица 2 – Сравнение условий передачи данных при различных вариантах временных соотношений передаваемых блоков данных и возникающих отказов

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Соотношение скорости ввода нагрузки и пропускной способности	$R_H < C$		
Объем сохраняемых данных	$Vc = R_H \cdot \sum_{k=1}^K t_{\text{восст } k}$	$Vc = R_H \cdot t_{\text{восст}} = R_H \sum_{j=1}^J t_{j \text{ H}}$	$Vc_k = R_H \cdot t_{\text{восст } k}$
Состояние канала связи	неработоспособен		
Предельное значение памяти	$V \geq R_H \cdot t_{\text{тр}}$		
Условие выполнения требований по своевременности передачи данных	$t_{\text{восст}} \leq t_{\text{тр}} \left(1 - \frac{R_H}{C} \right)$	$t_{\text{восст}} \leq t_{\text{тр}} \frac{C - R_H}{R_H}$	$t_{\text{восст } k} \leq \frac{C - R_H}{R_H} t_{\text{тр}}$

Требования к памяти канала при ограниченной скорости считывания данных из нее.

Рассмотренные выше варианты были описаны в допущении того, что скорость считывания данных из памяти $R_{\text{сч}}$ не ограничена. Реальные показатели памяти могут уступать по своим предельным значениям показателям каналов связи и источников нагрузки на них, поэтому необходимо рассмотреть три ситуации:

1. $R_{\text{сч}} > (C - R_H)$. В данном случае скорость считывания данных из памяти превышает остаточный ресурс пропускной способности канала связи – необходима синхронизация процессов считывания и введения данных в канал. Здесь мы имеем резерв ресурса $R_{\text{сч}}$, который может быть использован при снижении R_H .

2. $R_{\text{сч}} = (C - R_H)$. В данном случае скорость считывания данных из памяти и остаточный ресурс пропускной способности канала связи синхронизированы. Этот случай отображен на рис. 2-5.

3. $R_{\text{сч}} < (C - R_H)$. Скорость считывания данных из памяти меньше остаточного ресурса пропускной способности канала связи, вследствие чего возникают задержки в передаче данных из памяти (рис. 6), на передачу данных потребуется больше времени ($t'_{\text{доп } 1}$), чем в первом и втором случаях ($t_{\text{доп } 1}$).

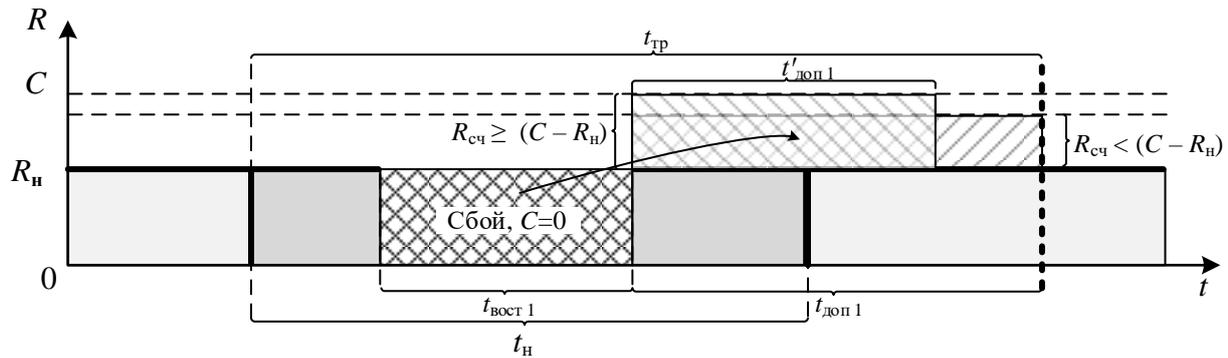


Рис. 6. Графическое представление передачи нагрузки с постоянной скоростью ввода в канал связи с памятью и отказами при $R_{сч} < (C - R_H)$

В этом случае, при получении выражений (4) и (7), остаточный ресурс пропускной способности канала связи $(C - R_H)$ заменяется на скорость считывания данных из памяти ($R_{сч}$). Тогда выражение (4) примет вид:

$$V \geq t_{тр} \frac{R_H \cdot R_{сч}}{R_H + R_{сч}},$$

а выражение (7) примет вид:

$$V \geq t_{тр} R_{сч}.$$

Доказательство леммы 1 указывает на принципиальную возможность своевременной передачи заданного объема данных по каналу связи с памятью при потоке множества отказов. Далее необходимо рассмотреть более сложную ситуацию, которая имеет практическое значение в современных системах связи: передача нагрузки со стохастической скоростью ее ввода в канал связи с потоком множества отказов.

2. Постановка второй задачи

Пусть канал связи с памятью характеризуется постоянной пропускной способностью C и случайной скоростью ввода нагрузки в канал в пределах от $R_{H \max}$ до $R_{H \min}$, пиковые значения которой могут превышать пропускную способность канала $R_{H \max} > C$. К нагрузке предъявляются требования по времени передачи данных $t_{тр}$. В процессе функционирования канала связи возникают отказы: сбои, устраняемые в течении времени $t_{восст}$, и отказы в следствии $R_{H \max} > C$ длительностью $t_{прев}$.

При прохождении потока данных через память имеются значения скорости ее ввода в канал на любом временном интервале, поэтому для анализа характеристика скорости ввода нагрузки во времени становится детерминированной, что позволяет получить ее функцию $R_H(t)$ с любой точностью аппроксимации.

Необходимо найти значение объема памяти V , достаточного для своевременной и достоверной передачи данных по каналу связи.

Для решения задачи сформулирована и доказана лемма 2.

Лемма 2. Для передачи с требуемой своевременностью $t_{тр}$ нагрузки в виде потока данных со скоростью ввода в канал $R_H(t)$, пиковые значения которой превышают пропускную способность канала связи C , а их математические

ожидания находятся в отношении $M[R_H] \leq M[C]$ при выполнении условия

$$\int_{t_{\text{н отказа } k}}^{t_{\text{о отказа } k} + t_{\text{тр}}} R_H(t) dt \leq C \cdot t_{\text{тр}}$$

достаточно объема памяти $V = C \cdot t_{\text{тр}}$.

В данном случае отказ в передаче данных по каналу связи может быть в двух случаях:

- сбой в канале, подобный сбоям, рассмотренным в лемме 1. В этом случае $C = 0$;
- превышение нагрузки $R_H(t)$ пропускной способности канала C .

Переменная во времени нагрузка характеризуется случайной функцией $R_H(t)$. Память канала связи позволяет вести статистику по нагрузке, накопление данных о которой за достаточно продолжительный период времени позволяет выводить статистические характеристики процесса передачи данных, к которым относится ее математическое ожидание $M[R_H]$ (рис. 7). На рис. 7 форма характеристики нагрузки на канал представляет собой обобщение статистических данных нагрузки в инфокоммуникационных системах, представленных, например, на официальных сайтах: крупнейшего Интернет-провайдера России MSK-IX с главным узлом в Москве, связанных с ним, крупнейших европейских Интернет-провайдеров Европы в Германии DE-CIX с главным узлом в Франкфурте, Нидерландах AMS-IX с главным узлом в Амстердаме и др.

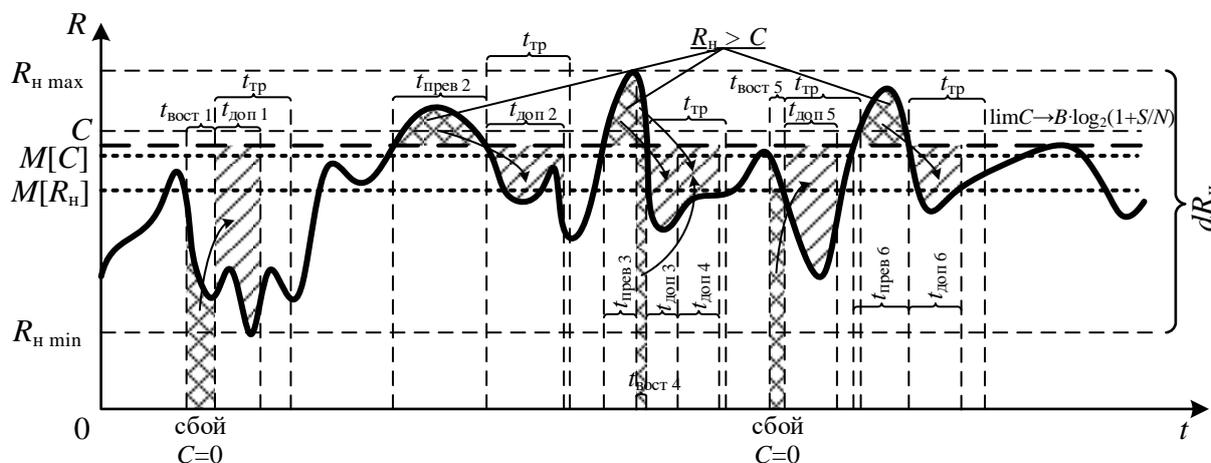


Рис. 7. Графическое представление передачи нагрузки со случайной скоростью ввода в канал связи с памятью и потоком отказов

Во время сбоев в канале связи $C = 0$, а время возникновения и продолжительность сбоев случайны. Это указывает о необходимости оценки пропускной способности канала с памятью не по его технической характеристике C , а по математическому ожиданию пропускной способности $M[C] < C$. При высоком уровне надежности телекоммуникационных средств на достаточно большом периоде времени суммарное время восстановления канала много меньше времени его исправной работы t_H :

$$\sum_{k=1}^K t_{\text{восст } k} \ll t_H. \tag{12}$$

В этом случае:

$$M[C] \rightarrow C,$$

а теоретический предел пропускной способности стремится к пределу Шеннона [4]:

$$\lim C \rightarrow W \cdot \log(1 + S / N).$$

Рассмотрим три варианта отказа:

1. Сбой канала при $R_H \leq C$ (отказы 1, 5; рис. 7).
2. Превышение скорости ввода нагрузки $R_H(t)$ пропускной способности канала $R_H > C$ (отказы 2, 3, 6; рис. 7).
3. Одновременный сбой канала и превышение скорости ввода нагрузки R_H пропускной способности C (отказ 4; рис. 7).

2.1. Сбой канала при $R_H \leq C$

Данный вариант эквивалентен постановке, рассмотренной в лемме 1. Отличительной чертой является характер нагрузки, которая в первом случае была постоянна, а во втором описывается некоторой функцией, из чего следует, что объем данных, накопленных за время сбоя, будет описываться формулой:

$$V_k = \int_{t_{H \text{ вост } k}}^{t_{O \text{ вост } k}} R_H(t) dt, \quad R_H(t) \leq C, \quad (13)$$

где $t_{H \text{ вост } k}$ – начало сбоя (восстановления) канала связи; $t_{O \text{ вост } k}$ – окончание сбоя (восстановления) канала связи.

По аналогии с леммой 1, для выполнения требований по своевременности передачи данных необходимо предъявить требование к времени восстановления канала связи, аналогичное допущению (10). С учетом объема накопленных данных (13), предельного объема передаваемых за $t_{\text{тр}}$ данных:

$$V_{\text{пр}} = C \cdot t_{\text{тр}},$$

и объема ресурса пропускной способности, который занят текущей нагрузкой при передаче запомненных ранее данных:

$$V_{\text{зан}} = \int_{t_{O \text{ вост } k}}^{t_{O \text{ вост } k} + t_{\text{тр}}} R_H(t) dt,$$

очевидно, что должно выполняться условие:

$$\int_{t_{H \text{ вост } k}}^{t_{O \text{ вост } k}} R_H(t) dt \leq \left(C \cdot t_{\text{тр}} - \int_{t_{O \text{ вост } k}}^{t_{O \text{ вост } k} + t_{\text{тр}}} R_H(t) dt \right). \quad (14)$$

Для определения объема памяти в канале необходимо рассматривать предельный случай, когда во время отказа нагрузка равна пропускной способности канала, а при ее последующей передаче из памяти нагрузки нет. Тогда

$$\int_{t_{O \text{ вост } k}}^{t_{O \text{ вост } k} + t_{\text{тр}}} R_H(t) dt = 0, \text{ а объем памяти, с учетом (12) должен удовлетворять условию:}$$

$$V \geq C \cdot t_{\text{тр}}, \quad (15)$$

что больше, чем (11).

2.2. Превышение скорости ввода нагрузки пропускной способности канала

Отличительной чертой в определении объема накопления данных при этом варианте отказа является сохранение только избыточной нагрузки. В этом случае объем сохраненных данных будет определяться выражением:

$$V_k = \int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k}} R_{\text{н}}(t)dt - C \cdot t_{\text{прев } k}, \quad R_{\text{н}}(t) > C,$$

Где $t_{\text{н прев } k}$ – начало превышения нагрузки в канале связи; $t_{\text{о прев } k}$ – окончание превышения нагрузки.

По аналогии с (14) должно выполняться условие:

$$\left(\int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k}} R_{\text{н}}(t)dt - C \cdot t_{\text{прев } k} \right) \leq \left(C \cdot t_{\text{тр}} - \int_{t_{\text{о прев } k}}^{t_{\text{о прев } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t)dt \right),$$

которое путем преобразования принимает вид:

$$\int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t)dt \leq C \cdot (t_{\text{тр}} + t_{\text{прев } k}). \quad (16)$$

В предельных случаях можно говорить о том, что максимальное превышение нагрузки на канал связи $R_{\text{н max}}$ может существенно превосходить его пропускную способность, однако для выполнения требований по своевременности необходимо выполнять условие (16), из чего следует, что при $R_{\text{н max}} \gg C$ время сбоя $t_{\text{прев } k} \ll t_{\text{тр}}$.

Для предельного случая, при $\int_{t_{\text{о прев } k}}^{t_{\text{о прев } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t)dt = 0$, объем памяти должен

удовлетворять условию (15).

Рассматривая требования законодательства РФ к качеству предоставления инфокоммуникационных услуг необходимо отметить, что в этих документах услуги должны соответствовать критерию минимального обслуживания 75 % соединений [45], т.е. на отказы, которые могут быть в форме превышения нагрузки пропускной способности, отведено не более 25 %. Поэтому для выполнения требований действующих стандартов обеспечения качества обслуживания можно допустить ограничение требования к объему памяти:

$$V \geq 0,25(C \cdot t_{\text{тр}}).$$

2.3. Одновременный сбой канала и превышение скорости ввода нагрузки его пропускной способности

В третьем варианте сочетаются сбой канала связи с превышением нагрузки на его пропускную способность. В этом случае объем сохраненных данных будет определяться выражением:

$$V_k = \int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k}} R_{\text{н}}(t)dt, \quad R_{\text{н}}(t) > C. \quad (17)$$

По аналогии с (14) и (16) должно выполняться условие:

$$\int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k}} R_{\text{н}}(t) dt \leq \left(C \cdot t_{\text{тр}} - \int_{t_{\text{о прев } k}}^{t_{\text{о прев } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t) dt \right),$$

которое путем преобразования принимает вид:

$$\int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t) dt \leq C \cdot t_{\text{тр}}. \quad (18)$$

Для предельного случая, при $\int_{t_{\text{о прев } k}}^{t_{\text{о прев } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t) dt = 0$, объем памяти должен

удовлетворять условию (15). При этом, с учетом (17), передавать весь объем данных, поступаемых в канал связи во время отказа можно только при выполнении условия:

$$t_{\text{прев } k} < \frac{C \cdot t_{\text{тр}}^2}{\int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k}} R_{\text{н}}(t) dt}.$$

Обобщая полученные результаты определения необходимого объема памяти для всех трех вариантов (таблица 3), следует отметить, что, несмотря на различия причин отказа и объема сохраняемых данных, предельный требуемый объем памяти определяется выражением (15). Это обусловлено ограничениями, накладываемыми требованиями по своевременности передачи данных. Кроме того, возможно передавать данные с пиковыми скоростями, превышающими предел Шеннона при выполнении условия:

$$M[R_{\text{н}}] \leq M[C].$$

Таблица 3 – Сравнение условий передачи данных при различных вариантах отказов

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Соотношение скорости ввода нагрузки и пропускной способности	$R_{\text{н}}(t) \leq C$	$R_{\text{н}}(t) > C$	$R_{\text{н}}(t) > C$
Объем сохраняемых данных	$V_k = \int_{t_{\text{н вост } k}}^{t_{\text{о вост } k}} R_{\text{н}}(t) dt$	$V_k = \int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k}} R_{\text{н}}(t) dt - C \cdot t_{\text{прев } k}$	$V_k = \int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k}} R_{\text{н}}(t) dt$
Состояние канала связи	неработоспособен	работоспособен	неработоспособен
Предельное значение памяти	$V \geq C \cdot t_{\text{тр}}$		
Условие выполнения требований по своевременности передачи данных	$\int_{t_{\text{н вост } k}}^{t_{\text{о вост } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t) dt \leq C \cdot t_{\text{тр}}$	$\int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t) dt \leq C \cdot (t_{\text{тр}} + t_{\text{прев } k})$	$\int_{t_{\text{н прев } k}}^{t_{\text{о прев } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t) dt \leq C \cdot t_{\text{тр}}$

Своевременная передача двоичных символов со сколь угодно малой вероятностью битовых ошибок возможна при выполнении условия

$$\int_{t_{\text{отказа } k}}^{t_{\text{отказа } k} + t_{\text{тр}}} R_{\text{н}}(t) dt \leq C \cdot t_{\text{тр}}, \quad (19)$$

полученного на основе условий (14) и (18) (где $t_{\text{отказа}}$ – время отказа: сбой, устраняемые в течении времени $t_{\text{вост}}$, и отказы вследствие превышения пропускной способности канала пиковыми значениями скорости ввода в него нагрузки ($R_{\text{н max}} > C$) длительностью $t_{\text{прев}}$) и позволяющего, при знании функции скорости ввода нагрузки, получить требование к времени восстановления канала. При превышении данного требования обеспечение своевременности передачи данных необходимо осуществлять на основе системных методов обеспечения устойчивости передачи данных в сетях связи.

Этим заканчивается *доказательство* леммы 2 и теоремы.

Оценка представленного решения

Для наглядного представления выигрыша при обеспечении своевременности передачи переменной нагрузки по каналу связи с памятью по сравнению с передачей по каналу без памяти необходимо оценить компенсирующую способность памяти при возникновении отказов.

Наличие в каналах связи памяти позволяет компенсировать часть, определяемую $t_{\text{тр}}$, последствий отказов путем записи в память данных поступающих в канал во время отказа с последующей их передачей после восстановления работоспособности канала. Очевидно, что за счет памяти нельзя компенсировать отказы любой продолжительности. Предельная продолжительность таких отказов (времени восстановления канала $t_{\text{вост}}$, превышения скорости ввода нагрузки $t_{\text{прев}}$) будет определяться скоростью накопления данных (скоростью входящей нагрузки $R_{\text{н}}(t)$), требованиями к времени передачи данных по каналу ($t_{\text{тр}}$), пропускной способностью восстановленного канала (C) и ее остаточными значениями ($C'(t) = C - R_{\text{н}}(t)$).

Выше было показано, что своевременная передача двоичных символов возможна при выполнении условия (19). С учетом того, что $\Delta t = t_{\text{вост}} + t_{\text{тр}}$ является приращением пределов интегрирования уравнения, данная задача, при известной за счет памяти канала функции $R_{\text{н}}(t)$, имеет несложное решение численными методами со сколь угодно малой погрешностью [46].

Нахождение предельного времени восстановления $t'_{\text{вост}}$ позволяет разделить отказы маршрута информационного направления на две категории:

- отказы в пределах интервала $t'_{\text{вост}}$, компенсируемые за счет памяти каналов связи;
- отказы превышающие $t'_{\text{вост}}$, компенсируемые системными методами путем перевода передачи данных в информационном направлении на другие – исправные маршруты. При этом, данные поступающие в канал во время переключения маршрута накапливаются в памяти для последующей передаче по новому маршруту, что исключает их потерю.

Отказы элемента сети связи описываются плотностью вероятности времени восстановления $\omega(t_{\text{вост}})$ которая характеризует общий поток отказов первой и второй категории (рис. 8). Наиболее часто, для описания времени восстановления элементов сложного объекта в теории надежности используют гамма-распределение [47], общий вид которого для плотности распределения определяется выражением:

$$\omega(t_{\text{вост}}) = \frac{t_{\text{вост}}^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{t_{\text{вост}}}{\beta}}.$$

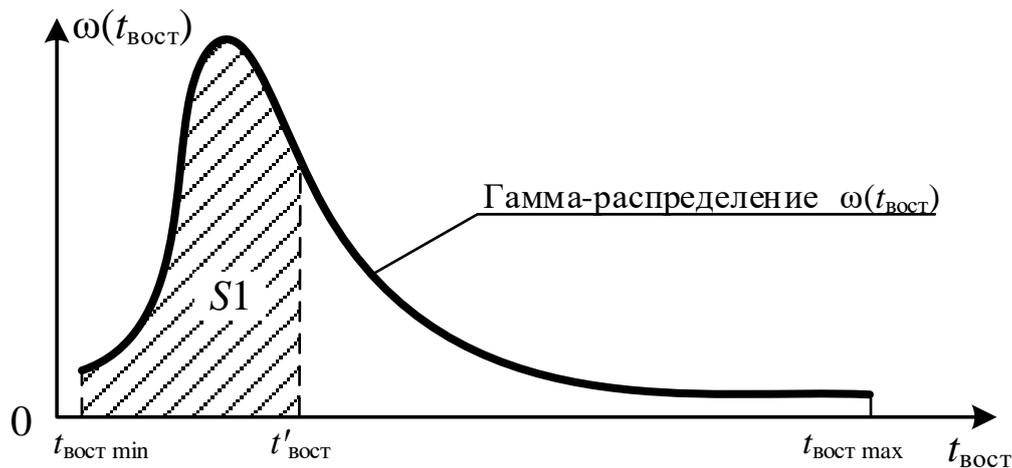


Рис. 8. Графическое представление эффективности представленного решения

Из рис. 8 видно, что площадь $S1$ под функцией на интервале от $t_{\text{вост min}}$ до $t'_{\text{вост}}$ соответствует вероятности попадания отказа в диапазон времени восстановления, компенсируемый памятью. Данная площадь характеризует *выигрыш* каналов с памятью в отказоустойчивости относительно каналов без памяти (эффективность представленного решения), который можно показать в виде условного снижения количества отказов канала связи с K до K' за время T :

$$K'(t, t+T) = K(t, t+T) \cdot \left(1 - \int_{t_{\text{вост min}}}^{t'_{\text{вост}}} \omega(t_{\text{вост}}) dt \right).$$

Выводы

Появление, в результате реализации процессов цифровизации, в каналах (средствах) связи памяти позволяет сохранять данные во время отказов, возникающих вследствие сбоев работы канала и/или превышении скорости ввода в него нагрузки пропускной способности канала. Это позволяет распределять накопленную нагрузку в свободном ресурсе канала после окончания сбоя в допустимых временных интервалах.

В отличии от условий работы каналов связи, описываемых в теоремах К. Шеннона в 40-е года XX века, современные условия позволяют обеспечить передачу по каналу переменной нагрузки с пиковыми значениями, превышаю-

щими пропускную способность канала и «Предел Шеннона» в допустимых временных интервалах.

Научная новизна представленного решения, по сравнению с традиционными, на примере теоремы Шеннона, заключается в обосновании взаимозависимости переменной скорости ввода нагрузки в канал связи с временем ее передачи с учетом памяти канала и возникающих отказов при ограничениях пропускной способности канала и требованиях к своевременности информационного обмена. Показано, что своевременная и достоверная передача данных возможна при превышении скорости ввода нагрузки «предела Шеннона».

Полученные в теореме требования к времени восстановления канала позволяют получать численные критерии при заданных характеристиках канала и требованиях к своевременности передаваемых по нему данных, что имеет значение для решения практических задач.

Полученные в теореме соотношения позволяют решать два типа практических задач:

- определение требований к подсистеме восстановления связи по характеристикам каналов, характеру нагрузки и требованиям, предъявляемым к процессу ее передачи;
- определение требований к объему памяти канала (образующего его оборудования) по его характеристикам, характеру нагрузки и требованиям, предъявляемым к процессу ее передачи.

Дооснащение существующих средств связи памятью с необходимыми характеристиками сложная и, в ряде случаев, невыполнимая задача, поэтому представленное решение, в первую очередь, необходимо реализовывать на этапе проектирования нового оборудования.

Для устойчивой передачи данных в условиях потока отказов, время восстановления которых превышает допустимые значения, рассматриваемую в теореме задачу необходимо решать по отношению к сети связи, построенной на множестве каналов с памятью, системными методами.

Литература

1. Nyquist H. Certain Factor Affecting Telegraph Speed // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1924. Vol. 43. pp. 412-422.
2. Nyquist H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1928. Vol. 47. № 2. pp. 617-644.
3. Hartley R.V.L. Transmission of information // Bell System Technical Journal. 1928. Vol. 7. № 3. pp. 535-563.
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 832 с.
5. Shannon C. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. 1948. vol. 27. № 3. pp. 379-423.
6. Кловский Д.Д., Сойфер В.А. Пропускная способность многолучевых каналов // Проблемы передачи информации. 1972. Т. 8. № 1. С. 10-16.
7. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки электросвязи // В сборнике. Всесоюзный энергетический комитет. Материалы к

I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. По радиосекции. – М.: Управление связи РККА, 1933. С. 1-19.

8. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. – Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1956. – 153 с.

9. Хинчин А.Я. Об основных теоремах теории информации // Успехи математических наук. 1956. Т. 11. № 1(67). С. 17-75.

10. Фано Р. Передача информации. Статистическая теория связи. – М.: Издательство Мир, 1965. – 437 с.

11. Хэмминг Р.В. Теория кодирования и теория информации. – М.: Радио и связь, 1983. – 176 с.

12. Wyner A. D. Recent Results in the Shannon Theory // IEEE Transactions on Information Theory. 1974. Vol. 20. № 1. pp. 2-10.

13. Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. – М.: Наука. 1983. – 214 с.

14. Tuller W.G. Theoretical Limitations on the Rate of Transmission of Information // Proceedings of the IRE. 1949. Vol. 37. № 5. pp. 468-478.

15. Беннет У. Основные понятия и методы теории шумов в радиотехнике. – М.: Советское радио, 1957. – 106 с.

16. Gabor D. Theory of communication // Journal of the Institution of Electrical Engineers. 1946. Vol. 93. pp. 429-457.

17. Пинскер М. С. Информация и информационная устойчивость случайных величин и процессов. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1960. – 203 с.

18. Пинскер М. С. Некоторые математические вопросы теории передачи информации // Проблемы передачи информации. 2007. Т. 43. № 4. С. 124-138.

19. Пинскер М. С., Прелов В.В., Ван Дер Мейлен Э. К. Скорость создания информации в каналах без памяти при передаче медленно меняющегося марковского сигнала // Проблемы передачи информации. 2000. Т. 36. № 3. С. 29-38.

20. Цыбаков Б. С. Пропускная способность векторного гауссовского канала без памяти // Проблемы передачи информации. 1965. Т. 1. № 1. С. 26-40.

21. Цыбаков Б. С. Иной подход к нахождению пропускной способности гауссовского векторного канала // Проблемы передачи информации. 2006. Т. 42. № 3. С. 21-36.

22. Shannon C.E., Gallager R.G., Berlekamp E. Lower bounds to error probability for coding on discrete memoryless channels. Part I // Information and Control. 1967. Vol. 10. № 1. pp. 65-103.

23. Shannon C.E., Gallager R.G., Berlekamp E. Lower bounds to error probability for coding on discrete memoryless channels. Part II // Information and Control. 1967. Vol. 10. № 5. pp. 522-552.

24. Берлекамп Э. Алгебраическая теория кодирования. – М. Мир, 1971. – 473 с.

25. Gilbert E.N. Information Theory after 18 Years // Science. 1966. Vol. 152. № 3720. pp. 320-326.

26. Пирс Дж. Символы, сигналы, шумы. Закономерности и процессы передачи информации. – М.: Мир, 1967. – 334 с.
27. Muroga S. On the Capacity of a Discrete Channel // Journal of the Physical Society of Japan. 1953. Vol. 8. № 4. pp. 484-494.
28. Arimoto S. An Algorithm for Computing the Capacity of Arbitrary Discrete Memoryless Channel // IEEE Transactions on Information Theory. 1972. Vol. 18. № 1. pp. 14-20.
29. Blahut R.E. Computation of channel capacity and rate-distortion function // IEEE Transactions on Information Theory. 1972. Vol. 18. № 4. pp. 460-473.
30. Oetli W. Capacity-Achieving Input Distributions for Some Amplitude-Limited Channel // IEEE Transactions on Information Theory. 1974. Vol. 20. № 3. pp. 372-374.
31. Прокис Дж. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
32. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практические применения. – М.: Издательство «Дом «Вильямс», 2016. – 1099 с.
33. Хромов Л.И., Ковригина А.Б., Мартынихина А. В. Принцип равновесного согласования в теории информации // Доклады Академии наук, 1995. Т. 344. № 1. С. 30-31.
34. Хромов Л.И. Информационная теория связи на пороге XXI века. – СПб.: Научно-исследовательский институт телевидения, 1996. – 87 с.
35. Худяков Г.И. Оценка пропускной способности каналов авиационной цифровой электросвязи // Электросвязь. 2009. № 5. С. 37-39.
36. Худяков Г.И. Пропускная способность цифровых каналов электросвязи с квадратурной амплитудной модуляцией // Электросвязь. 2010. № 6. С. 38-40.
37. Худяков Г.И. О пропускной способности современных цифровых каналов электросвязи // Компоненты и технологии. 2011. № 3. С. 116-117.
38. Худяков Г.И. Теорема отсчетов теории сигналов и ее создатели // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1157-1168.
39. Худяков Г., Осипов А. Развитие теории оценивания пропускной способности систем электро- и радиосвязи // Компоненты и технологии. 2011. № 7. С. 147-154.
40. Цыцулин А.К. Комментарии к книге о Клоде Шенноне // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. № 1. С. 105-113.
41. Цыцулин А.К. Развитие теории информации научной школой НИИ телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 3. С. 66-87.
42. Литвин М.В. Иная формулировка теоремы Шеннона для дискретного канала с помехами // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2007. Т. 64. № 11. С. 141-148.
43. Литвин М.В. О пропускной способности канала связи и его геометрическом представлении // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 1(1). С. 49-55.
44. Иванов С.А., Стародубцев Ю.И. Теорема о представлении непрерывного многопараметрического сигнала с ненулевой дисперсией

дискретными отсчетами // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 2. С. 12-36. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-12-36.

45. ГОСТ Р 56087.5-2014. Система национальных стандартов в области качества услуг связи. Качество услуг сотовой подвижной связи. Нормативные значения показателей качества. – М.: Стандартинформ, 2019. – 8 с.

46. Смирнов В.И. Курс высшей математики для техников и физиков. Том первый. – Москва-Ленинград: Государственное издательство, 1930. – 467 с.

47. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

References

1. Nyquist H. Certain Factor Affecting Telegraph Speed. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1924, vol. 43, pp. 412-422.

2. Nyquist H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1928, vol. 47, no. 2, pp. 617-644.

3. Hartley R.V.L. Transmission of information. *Bell System Technical Journal*, 1928, vol. 7, no. 3, pp. 535-563.

4. Shannon K. Raboty po teorii informatsii i kibernetike [Works of information theory and cybernetics]. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoy literatury Publ., 1963. 832 p. (in Russian).

5. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, no. 3, pp. 379-423.

6. Klovsij D.D., Sojfer V.A. Propusknaya sposobnost' mnogoluchevykh kanalov [Throughput of multipath channels]. *Problems of information transmission*, 1972, vol. 8, no. 1, pp. 10-16 (in Russian).

7. Kotel'nikov V.A. O propusknoy sposobnosti «efira» i provoloki elektrosvyazi [On the bandwidth of «ether» and telecommunication wire] *V sbornike. Vsesoyuznyy energeticheskiy komitet. Materialy k I Vsesoyuznomu s"yezdu po voprosam tekhnicheskoy rekonstruktsii dela svyazi i razvitiya slabotochnoy promyshlennosti. Po radioseksii.* [In the collection. All-Union Energy Committee. Materials for the 1st All-Union Congress on the technical reconstruction of communications and the development of low-current industry. By radio section.] Moscow, Upravleniye svyazi RKKA [Communications Directorate of the Workers 'and Peasants' Red Army], 1933, pp.1-19 (in Russian).

8. Kotel'nikov V.A. *Teoriya potencial'noj pomekhustojchivosti* [Theory of potential noise immunity]. Moscow-Leningrad, Gosudarstvennoye energeticheskoye izdatel'stvo Publ., 1956. 153 p. (in Russian).

9. Hinchin A.Ya. Ob osnovnyh teoremah teorii informacii [On the basic Theorems of Information Theory]. *Russian Mathematical Surveys*, 1956, vol. 11, no. 1 (67), pp. 17-75 (in Russian).

10. Fano. R. *Peredacha informatsii. Statisticheskaya teoriya svyazi.* [Transmission of information. A statistical theory of communications]. Moscow, Izdatel'stvo Mir Publ., 1965. 437 p. (in Russian).

11. Hamming R.W. *Teoriya kodirovaniya i teoriya informatsii*. [Coding and information theory]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983. 176 p. (in Russian).
12. Wyner A.D. Recent Results in the Shannon Theory. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, vol. 20, no. 1, pp. 2-10.
13. Wiener N. *Kibernetika, ili Upravleniye i svyaz' v zhitovnom i mashine* [Cybernetics, or Control and communication in the animal and the machine]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 214 p. (in Russian).
14. Tuller W. G. Theoretical limitations on the rate of transmission of information. *Proceedings of the IRE*, 1949, vol. 37, no 5, pp. 468-478.
15. Bennet U. *Osnovnye ponyatiya i metody teorii shumov v radiotekhnike* [Basic concepts and methods of noise theory in radio engineering]. Moscow, Soviet radio Publ., 1957. 106 p. (in Russian).
16. Gabor D. Theory of communication. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1945, vol. 93, pp. 429-457.
17. Pinsker M.S. *Informatsiya i informacionnaya ustojchivost' sluchajnykh velichin i processov* [Information and information stability of random variables and processes]. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences Publ., 1960. 203 p. (in Russian).
18. Pinsker M.S. Some mathematical questions of theory of information transmission. *Problems of Information Transmission*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 124-138 (in Russian).
19. Pinsker M.S., Prelov V.V., Van der Meulen E.K. Skorost' sozdaniya informatsii v kanalah bez pamyati pri peredache medlenno menyayushchegosya markovskogo signala [The speed of information creation in channels without memory during the transmission of a slowly changing Markov signal]. *Problems of Information Transmission*, 2000, vol. 36, no. 3, pp. 29-38 (in Russian).
20. Cybakov B.S. Propusknaya sposobnost' vektornogo gaussovskogo kanala bez pamyati [Throughput of a vector Gaussian channel without memory]. *Problems of Information Transmission*, 1965, vol. 1, no. 1, pp. 26-40 (in Russian).
21. Cybakov B.S. A different approach to finding the bandwidth of a Gaussian vector channel. *Problems of Information Transmission*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 21-36 (in Russian).
22. Shannon C.E., Gallager R.G., Berlekamp E. Lower bounds to error probability for coding on discrete memoryless channels. Part I. *Information and Control*, 1967, vol. 10, no. 1, pp. 65-103.
23. Shannon C.E., Gallager R.G., Berlekamp E. Lower bounds to error probability for coding on discrete memoryless channels. Part II. *Information and Control*, 1967, vol. 10, no. 5, pp. 522-552.
24. Berlekamp E. *Algebraicheskaya teoriya kodirovaniya* [Algebraic coding theory]. Moscow, Izdatel'stvo Mir Publ., 1971. 473 p. (in Russian).
25. Gilbert E.N. Information Theory after 18 Years. *Science*, 1966, vol. 152, no. 3720, pp. 320-326.
26. Pierce J. *Simvoly, signaly, shumy. Zakonomernosti i protsessy peredachi informatsii* [Symbols, signals and noise: the nature and process of communication]. Moscow, Izdatel'stvo Mir Publ., 1967. 334 p. (in Russian).

27. Muroga S. On the Capacity of a Discrete Channel. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1953, vol. 8, no. 4, pp. 484-494.

28. Arimoto S. An Algorithm for Computing the Capacity of Arbitrary Discrete Memoryless Channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1972, vol. 18, no. 1, pp. 14-20.

29. Blahut R.E. Computation of channel capacity and rate-distortion function. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1972, vol. 18, no. 4, pp. 460-473.

30. Oettli W. Capacity-Achieving Input Distributions for Some Amplitude-Limited Channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, vol. 20, no. 3, pp. 372-374.

31. Proakis J. *Tsifrovaya svyaz'* [Digital communications]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000. 800 p. (in Russian).

32. Sklar B. *Tsifrovaya svyaz'* [Digital communications]. Moscow, Izdatel'stvo «Dom «Vil'yams» Publ., 2016. 1099 p. (in Russian).

33. Hromov L.I., Kovrigina A.B., Martynihina A.V. Princip ravnovesnogo soglasovaniya v teorii informacii [The principle of equilibrium agreement in information theory]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 1995, vol. 344, no. 1, pp. 30-31 (in Russian).

34. Hromov L.I. *Informacionnaya teoriya svyazi na poroge XXI veka* [Information theory of communication on the threshold of the XXI century]. St. Petersburg, Scientific Research Institute of Television Publ., 1996. 87 p. (in Russian).

35. Khudyakov G.I. Assessing aeronautical digital communication channels' carrying capacity. *Electrosvyaz*, 2009, no. 5, pp. 37-39 (in Russian).

36. Khudyakov G.I. Quadrature-amplitude modulation digital communication channels' capacity. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2010, no. 5, pp. 38-40 (in Russian).

37. Khudyakov G.I. O propusknoj sposobnosti sovremennyh cifrovyyh kanalov elektrosvyazi [On the throughput of modern digital telecommunication channels]. *Components & Technologies*, 2011, no. 3, pp. 116-117 (in Russian).

38. Khudyakov G.I. Teorema otschetov teorii signalov i ee sozdateli [The theorem of counts of the theory of signals and its creators]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2008, vol. 53, no. 9, pp. 1157-1168 (in Russian).

39. Khudyakov G., Osipov A. Razvitie teorii otsenovaniya obrazovaniya posobnosti sistem elektro - i radiosvyazi [Development of the theory of estimating the throughput of electro-and radio-communication systems]. *Components & Technologies*, 2011, no. 7, pp. 147-154 (in Russian).

40. Tsitsulin A.K. Comments to the book about Claude Shannon. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika*, 2019, no. 1, pp. 105-113 (in Russian).

41. Tsitsulin A.K. The development of information theory by the scientific school of the television research institute. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya* [Questions of radio-electronics, the TV equipment series], 2015, no. 3, pp. 66-87 (in Russian).

42. Litvin M.V. Inaya formulirovka teoremy Shennona dlya diskretnogo kanala s pomexhami [A different formulation of the Shannon theorem for a discrete channel with interference]. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2007, vol. 64, no. 11. pp. 141-148 (in Russian).

43. Litvin M.V. On channel capacity and its geometric representation. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2012, no. 1(1), pp. 49-55 (in Russian).

44. Ivanov S.A., Starodubtsev Yu.I. Theorem of representation of continuous multivariable signal by non-zero dispersion by discrete samples. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 2, pp. 12-36. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-12-36 (in Russian).

45. State Standard 56087.5-2014. System of national standards in the field of quality of communication services. The quality of cellular mobile services. Standard values of quality indicators. – Moscow, Standartinform Publ., 2019. 8 p. (in Russian).

46. Smirnov V.I. *Kurs vysshey matematiki dlya tekhnikov i fizikov. Tom pervyy*. [A course in higher mathematics for technicians and physicists. Volume one.]. Moscow-Leningrad, Gosudarstvennoye izdatel'stvo Publ., 1930. 467 p. (in Russian).

47. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. St. Petersburg, BKHV-Peterburg Publ. 704 p. (in Russian).

Статья поступила 06 июля 2021 г.

Информация об авторах

Иванов Сергей Александрович – кандидат технических наук. Докторант. Военная академия связи. Область научных интересов: теория управления информационно-телекоммуникационными ресурсами. E-mail: sa-ivanov@inbox.ru

Стародубцев Юрий Иванович – доктор военных наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Профессор кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения. Военная академия связи. Область научных интересов: теория управления информационно-телекоммуникационными ресурсами; информационная безопасность. E-mail: prof.starodubtsev@gmail.com

Вершенник Елена Валерьевна – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения. Военная академия связи. Область научных интересов: теория управления информационно-телекоммуникационными ресурсами; информационная безопасность. E-mail: yelena.vershennik@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Theorem on timely transmission of variable load via communication channel with memory and failures

S. A. Ivanov, Yu. I. Starodubtsev, Ye. V. Vershennik

Setting the task. The current stage of development of society is characterized by a significant impact on it from the ongoing processes of digitalization and informatization. This led to an exponential growth in the generation of load on infocommunication systems, toughening of requirements for the quality of service and necessitated further development and improvement of the communication infrastructure, methods and methods of effective data transmission, approaches to signal processing. A prerequisite for performing these tasks is the presence of a mathematical apparatus that makes it possible to assess the characteristics of the channel and transmitted data, as well as to determine the requirements for them. The most important resource characteristic of a communication channel is its capacity. Historically, in the general theory of communication, the Shannon theorem, which was obtained in relation to the conditions of the middle of the 20th century, became fundamental for determining the channel capacity. These conditions have changed significantly in relation to modern communication systems, which requires the development of existing solutions. Fundamentally new conditions for solving the same scientific problem include the integration of different types of communication means into an infocommunication system with memory and computing ability, and transmission over communication channels with failures of variable load, the peak values of which regularly exceed the throughput, which leads to delays, reduced reliability and partial loss of information. **The purpose** of the work is to substantiate the requirements for the volume of the memory of the channel in terms of its characteristics, the nature of the load and the requirements for the process of its transmission, for the timely transmission of data over the communication channel. **Methods.** The ratios presented in the article are aimed at developing methods for ensuring the functioning of networks and communication systems by managing their resources. The main difference between the methods developed on the basis of the obtained result is the description of the memory of the elements of networks and systems as their resource property with the resulting approaches to data transmission. **Results.** A theorem is formulated and proved, which is the development of the theoretical foundations of the general theory of communication in terms of describing the resources of infocommunication networks and systems. The presented theorem takes into account the property of the memory of a channel under the conditions of a stochastic rate of load input into it and a random flow of failures. The practical significance of the theorem lies in the fact that it allows establishing the relationship between the channel recovery time and its characteristics, including memory parameters. This makes it possible to determine the requirements for the communication recovery subsystem according to the characteristics of the channels, the nature of the load and the requirements for the process of its transfer, as well as to solve the problem of determining the requirements for the volume of channel memory by its characteristics, the nature of the load and the requirements for the process of its transfer.

Keywords: channel with memory, failures, throughput, Shannon theorem.

Information about Authors

Sergey Aleksandrovich Ivanov – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral Candidate. Military Academy of Communications. Field of research: theory of information and telecommunication resources management. E-mail: sa-ivanov@inbox.ru

Yuri Ivanovich Starodubtsev – Dr. habil. of Military Sciences, Full Professor, Honored Scientist of Russia. Professor at the Department of Security of Infocommunication Systems for Special Ops. Military Academy of Communications. Field of research: theory of information and telecommunication resources management, information security. E-mail: prof.starodubtsev@gmail.com

Yelena Valeryevna Vershennik – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior Lecturer at the Department of Security of Infocommunication Systems for Special Ops. Military Academy of Communications. Field of research: theory of information and telecommunication resources management. E-mail: yelena.vershennik@mail.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiyy prospekt, 3.