

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНЕЧНОЙ МАРКОВСКОЙ ЦЕПИ,
ОПИСЫВАЮЩЕЙ ДОВЕДЕНИЕ МНОГОПАКЕТНОГО СООБЩЕНИЯ В СОЕДИНЕНИИ «ТОЧКА-
ТОЧКА» СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ОПЕРАТИВНОСТИ**

Цимбал Владимир Анатольевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого.

E-mail: tsimbalva@mail.ru.

Тоискин Василий Евгеньевич

кандидат технических наук, преподаватель кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого.

E-mail: vetoiskin@mail.ru.

Потапов Сергей Евгеньевич

кандидат технических наук, докторант кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого.

E-mail: 41kaf_rabota@mail.ru.

Сорокин Олег Игоревич

адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого.

E-mail: sorokin_oleg89@mail.ru.

Лягин Максим Артурович

адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого.

E-mail: lma.mil@yandex.ru.

Бережной Андрей Александрович

адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого.

E-mail: aaberezhnoy@mail.ru.

Крючков Никита Викторович

адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого.

E-mail: nixon07.19@yandex.ru.

Адрес: 142210, Московская область, г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17.

Хоптар Виталий Владимирович

начальник ВП МО РФ АО НПП «Полёт».

E-mail: vhoptar@mail.ru

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, пл. Комсомольская, д.1.

Аннотация: В статье рассматривается применение объектно-временных графов поглощающих конечных марковских цепей для корректного отображения процесса доведения многопакетного сообщения с произвольным числом пакетов и произвольном числе повторов каждого пакета в логических соединениях «точка-точка», информационный обмен в которых осуществляется по протоколу канального уровня типа X.25. Сформирован обобщенный объектно-временной граф поглощающей конечной марковской цепи, инвариантный к емкости многопакетного сообщения и к числу повторов каждого пакета, содержащий помимо переходных состояний два поглощающих состояния - состояние доведения сообщения и состояние недоведения сообщения. Разработаны правила для автоматизированного синтеза матрицы переходных вероятностей и матрицы шагов переходов, необходимых для исследования оперативности (по вероятностно-временным характеристикам) доставки многопакетных сообщений в системах передачи

данных с различными параметрами.

Ключевые слова: поглощающая конечная марковская цепь, многопакетное сообщение, система передачи данных, вероятностно-временные характеристики, радиоканал, объектно-временной граф.

Формирование информационного пространства между рассредоточенными объектами на значительных территориях, как правило, реализуется с помощью соответствующих радиоканалов, в качестве которых выступают либо радиоканалы декаметрового диапазона, либо метрового диапазона. Отличительной особенностью таких каналов является то, что скорости передачи в них невысоки и находятся в пределах от 0,3 до 32 кбит/с, при этом качество канала связи, определяемое вероятностью битовой ошибки, невысокое: она в таких каналах лежит в пределах $10^{-2} - 10^{-4}$ [1].

Формирование логического соединения типа «точка – точка» в системах передачи данных (СПД), реализованных на таких каналах, как правило, осуществляется с помощью протокола X.25, который сравнительно давно стандартизирован и широко применяется на практике. Особенностью этого протокола является использование решающей обратной связи для обеспечения требуемой достоверности доставки сообщений, что реализуется в СПД способом квитирования переданного кадра (кадров) [2].

На практике по указанным каналам приходится доставлять значительные объемы информации, что требует её передачи в виде многопакетных сообщений (МПС). Вопросам оценки характеристик доставки однопакетных сообщений по протоколу X.25 уделено достаточное внимание в различных работах [3,7,8,9]. Однако вопросы оценки оперативности доставки МПС в СПД с данным протоколом рассмотрены недостаточно полно.

При анализе доставки МПС по протоколу X.25 возникает задача корректного описания данного процесса в виде адекватной математической модели с целью нахождения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) оперативности доставки МПС. Наиболее приемлемым математическим аппаратом для полу-

чения соответствующих моделей является теория поглощающих конечных марковских цепей (ПКМЦ) [4]. При использовании теории ПКМЦ основным этапом является синтез матрицы переходных вероятностей (МПВ), которая входит в уравнение Колмогорова-Чепмена (УКЧ), и, в свою очередь, базируется на синтезе графа состояний и переходов (ГСП) [4,5,6].

Традиционно доставка однопакетного сообщения по протоколу X.25 моделируется ПКМЦ, ГСП которой представлен на рис. 1.

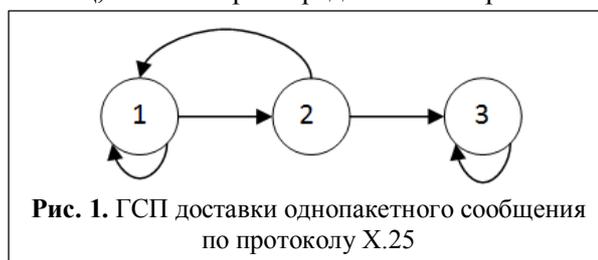


Рис. 1. ГСП доставки однопакетного сообщения по протоколу X.25

Семантика представленного ГСП такова:

1 - звено передачи данных (ЗПД) - отправитель выдало очередной повтор кадра (пакета), но кадр на ЗПД-получателе не принят;

2 - ЗПД-получатель приняло повтор кадра и выдало в ответ квитанцию;

3 - ЗПД-отправитель квитанцию получило.

Недостатком такого подхода является то, что в этом графе имеется только одно поглощающее состояние, соответствующее доставке сообщения. Из физики процесса доставки следует, что поглощающих состояний в ПКМЦ должно быть два: одно - «сообщение доставлено», другое - «сообщение не доставлено». Кроме того, при передаче МПС в реальной системе связи всегда имеется конечное число возможных передач (повторов) пакетов (кадров) от источника.

ГСП ПКМЦ, описывающие доведение МПС в логическом соединении «точка-точка», содержащие два поглощающих состояния и учитывающие конечное заданное число повторов каждого пакета при передаче МПС, будем называть объектно-временными графами [3].

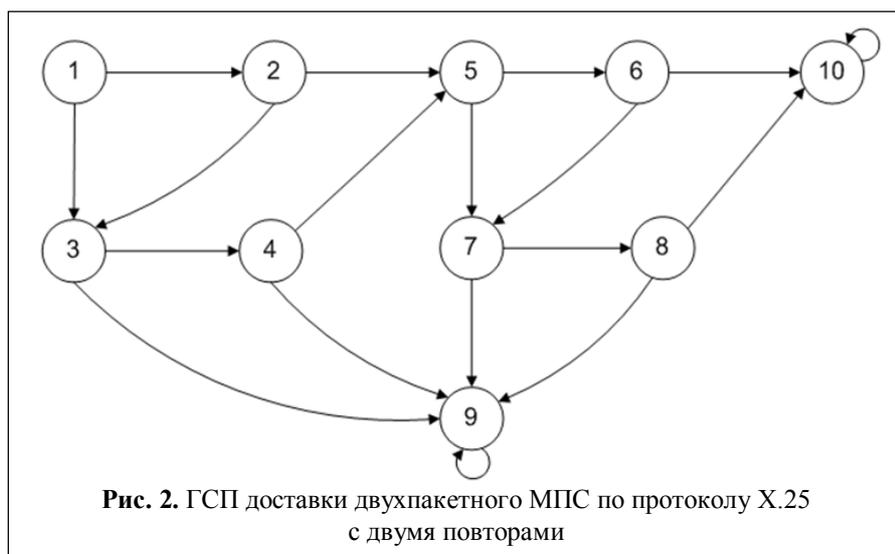


Рис. 2. ГСП доставки двухпакетного МПС по протоколу Х.25 с двумя повторами

Рассмотрим процесс доставки МПС с двумя пакетами, каждый из которых при передаче допускает два повтора. ГСП ПКМЦ такого процесса будет иметь следующий вид [3]:

Семантика ГСП ПКМЦ, представленного на рис. 2 такова:

1 - ЗПД-отправитель выдало первый повтор первого кадра (пакета), но кадр на ЗПД-получателе не принят;

2 - ЗПД-получатель приняло повтор первого кадра и выдало в ответ квитанцию;

3 - после первого повтора первый кадр на ЗПД-получателе не принят, ЗПД - отправитель выдало второй повтор первого кадра, но кадр на ЗПД-получателе не принят;

4 - ЗПД-получатель приняло повтор первого кадра и выдало в ответ квитанцию;

5 - ЗПД-отправитель получило квитанцию о доставке первого кадра и выдало второй кадр;

6 - ЗПД-получатель приняло повтор второго кадра и выдало в ответ квитанцию;

7 - после первого повтора второй кадр на ЗПД-получателе не принят, ЗПД - отправитель выдало второй повтор кадра, но кадр на ЗПД-получателе не принят;

8 - ЗПД-получатель приняло повтор второго кадра и выдало в ответ квитанцию;

9 - после второго повтора кадр или квитанция о доставке кадра на ЗПД-получателе не приняты;

10 - ЗПД-отправитель квитанцию получило.

Анализ этого ГСП показывает, что с увеличением числа пакетов в МПС и количества допустимых повторов передачи одного пакета такой граф, с одной стороны, существенно усложняется. Однако, с другой стороны, в нем имеются некие инварианты – сегменты графа, которые неизменны (ядро) (на рис. 2 ядро - это совокупность взаимосвязанных состояний

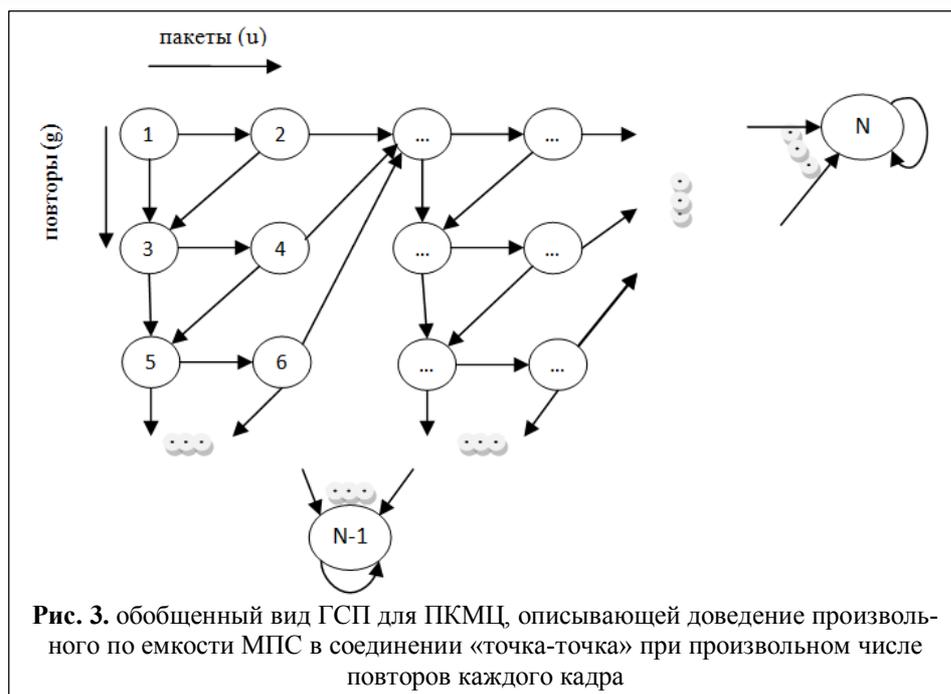
1-2-3 или 5-6-7). Этот факт в потенциале позволяет создать некий алгоритм автоматического синтеза таких МПВ, а соответственно, и УКЧ, которое описывает исследуемый процесс информационного обмена и позволяет найти искомые ВВХ. Данные правила были составлены на базе метода математической индукции при анализе обобщенного ГСП, описывающего доставку произвольного МПС при произвольном числе повторов каждого кадра.

На рис. 3 представлен обобщенный вид ГСП для такой ПКМЦ. Семантика его состояний соответствует семантике ГСП на рис. 2.

В обобщенном ГСП выделяются уровни и блоки. Под уровнем понимается совокупность состояний ПКМЦ, находящихся на одной линии графа. Под блоком понимается совокупность ядер, структурированных в вертикальную конструкцию.

Номера состояний графа и их взаимосвязи отображаются переходными вероятностями, а последние, в свою очередь, определяются своими индексами. Исходя из изложенного, задача автоматизированного нахождения (синтеза) элементов МПВ выливается в задачу нахождения соответствующих им индексов.

Обозначим p_k , p_{kv} , q_k , q_{kv} - вероятности доведения за один повтор кадра и квитанции соответственно, а также недovedения за один повтор кадра и квитанции соответственно. От-



следнего номера за поглощающим состоянием «сообщение доставлено», занимающим крайнее правое место на 1-ом уровне. Предпоследний номер ГСП ПКМЦ присваивается поглощающему состоянию, соответствующему состоянию «сообщение не доставлено», находящемуся на самом нижнем уровне. При этом количество блоков определяется

метим, что помехоустойчивое кодирование, используемое в протоколе X.25, здесь не учитывается. При этом

$$p_k = (1 - p_0)^{L_k}; \quad (1)$$

$$p_{kv} = (1 - p_0)^{L_{kv}}; \quad (2)$$

$$q_k = 1 - p_k; \quad (3)$$

$$q_{kv} = 1 - p_{kv}; \quad (4)$$

где L_k – длина передаваемого кадра в битах, L_{kv} – длина передаваемой квитанции в битах, p_0 – вероятность битовой ошибки в каналах связи СПД.

Учитывая возможность СПД осуществлять передачу u пакетов с g повторами каждого пакета (кадра), количество состояний графа переходов будет равно

$$N = 2(ug + 1); \quad (5)$$

При этом нумерацию состояний графа будем вести с цифры 1. Тогда номер предпоследнего поглощающего состояния равен $[2(ug + 1) - 1]$.

Правило 1. Состояния искомого процесса, отображаемого ГСП ПКМЦ, нумеруются «слева-направо» и «сверху-вниз» по вертикальным блокам, описывающим заданное количество повторов для одного пакета с оставлением по-

количеством пакетов в МПС, а количество горизонтальных уровней определяется количеством повторов одного пакета (кадра), предусмотренных протоколом X.25 в конкретной СПД.

Для заполнения МПВ введем параметры i и j . Параметр i показывает номер строки МПВ, а параметр j показывает номер столбца.

Алгоритм этого синтеза следующий: пусть g – число повторов передачи одного пакета, а u – количество передаваемых пакетов, тогда:

Правило 2. $p_{i+2,j+2} = p_k$ при

$$1 \leq i \leq N - 3, 2 \leq j \leq N - 2;$$

Правило 3. $p_{i+2,j+2} = q_k$ при $1 \leq i \leq N - 3;$

$$3 \leq j \leq 2(ug + 1) - 1, \text{ при } 1 \leq q \leq g;$$

Правило 4. $p_{i+2,j} = p_{kv}$ при $1 \leq i \leq N - 3;$

$$2(ug + 1) \leq j \leq 2(ug + 1) - 1, \text{ при } 1 \leq q \leq g;$$

Правило 5. $p_{i+2,j+2} = q_{kv}$ при $2 \leq i \leq N - 2,$

$$3 \leq j \leq 2(ug + 1) - 1, \text{ при } 1 \leq q \leq g;$$

Правило 6. $p_{i,j} = 1$ при $i = j = N - 1;$

Правило 7. $p_{i,j} = 1$ при $i = j = N.$

Остальные элементы матрицы равны нулю.

Стоит заметить, что при увеличении количества повторов в СПД увеличивается размер-

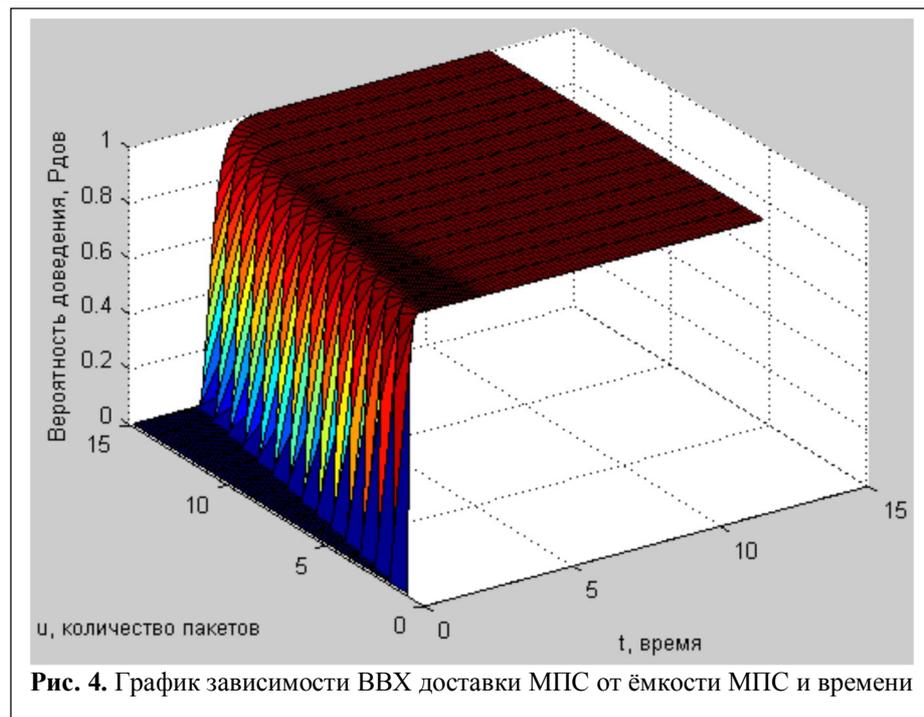


Рис. 4. График зависимости ВВХ доставки МПС от ёмкости МПС и времени

ность МПВ и, соответственно, количество ненулевых элементов в ней.

Общее число ненулевых элементов МПВ равно

$$G_0 = 2(gu + 1) + 2ug. \quad (6)$$

Для решения задачи определения ВВХ по КМЦ при произвольной длине шага переходов с привязкой к реальному времени согласно методу «среднего шага переходов» ПКМЦ [4] строится матрица шагов переходов (МШП). Для автоматизации синтеза МШП будем использовать вышеперечисленные правила 1-7, при этом будем учитывать соответствие между вероятностями и шагами переходов: $p_k \rightarrow \tau_k$, $q_k \rightarrow \tau_k + \tau_{kv}$, $p_{kv} = q_{kv} \rightarrow \tau_{kv}$, где знак \rightarrow есть символ соответствия. Ненулевой элемент предпоследней строки, обозначающий состояние неуспеха, а также ненулевой элемент последней строки – состояние успеха будут равны длительности тайм-аута, т.е. $z = \tau_k + \tau_{kv}$ [4].

При этом

$$\tau_k = L_k / V_{III}; \quad (7)$$

$$\tau_{kv} = L_{kv} / V_{III}; \quad (8)$$

где V_{III} – скорость передачи информации в СПД.

На базе указанных правил исследовалась оперативность (по ВВХ) доставки МПС в СПД со следующими параметрами: длина кадра $L_k = 128$ бит, длина квитанции $L_{kv} = 56$ бит, скорость передачи информации как в прямом так и в обратном каналах равна $V_{III} = 1200$ бит/с, вероятность ошибки $p_0 = 10^{-3}$. МПС содержит от 1 до 15 пакетов, максимально допустимое число повторов на

каждый пакет равно 5. Отметим, что под ВВХ доставки МПС понимается вероятность его доведения (доставки) от времени. Трёхмерные графики ВВХ представлены на рис. 4.

Из графика рис. 4 можно сделать следующие выводы.

1. График подтверждает физику процесса доведения МПС:

- с течением времени вероятность доведения МПС увеличивается;
- чем больше пакетная ёмкость МПС, тем больше количество времени требуется для достижения той же вероятности его доведения.

2. Вероятность доведения не превышает значения, равного 1.

Таким образом, сформированные правила автоматизированного синтеза конечной марковской цепи, описывающей доведение МПС в соединении «точка-точка» являются конструктивными и представляют собой научно-методический аппарат анализа ВВХ доставки МПС произвольной пакетной емкости при произвольном числе повторов каждого пакета в СПД различного назначения.

Литература

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Основы сетей передачи данных. М.: ИНТУИТ.РУ «Интернет-Университет Информационных Технологий», 2003. 248 с.
2. ГОСТ Р 34.950-92 (ИСО 8208-87) Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Передача данных. Протокол пакетного уровня X.25 для оконечного оборудования данных. М.: «Ордена «Знак почета» Издательство стандартов», 1993.
3. Сорокин О.И., Лягин М.А., Бережной А.А., Хоптар В.В., Иванов С.Н. Особенности построения объектно-ориентированных графов поглощающих конечных марковских цепей, адекватно описывающих процесс доведения многопакетных сообщений на канальном уровне с протоколом типа X.25 при фиксированном числе повторов // Междун. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS-2016); Доклады; Серия: науч. конф. посвящ. Дню радио / Рос.науч.-техн. общ. радиотехн., электрон. и связи им. А.С. Попова. М.: ООО «БРИС-М», 2016. – Вып. LXXI. – С. 497–501.
4. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: Монография. М.: «Вузовская книга», 2014. – 143 с.
5. Кемени Джон Дж., Снелл Дж. Ларк. Конечные цепи Маркова // Пер. с англ. М.: Наука, 1970. – 272 с.
6. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Сандулов Н.В., Хоптар В.В. Оперативность информационного обмена в иерархической радиосети автоматических систем управления военного назначения с протоколом типа X.25 // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 1. С. 26-31.
7. Тоискин В.Е. Моделирование механизма «скользящее окно» в протоколах информационного обмена абонентов современных сетей // В сборнике: Технологии информационного общества X Международная отраслевая научно-техническая конференция: сборник трудов. 2016. С. 71.
8. Цимбал В.А., Шиманов С.Н., Тоискин В.Е. Нахождение характеристик конечных марковских цепей при произвольных шагах переходов // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 9-2 (40). С. 110-113.
9. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Потапов С.Е., Шуточкин Е.А., Бонкин И.Д. Концепция применения программно-конфигурируемых сетей для управления мобильными объектами // Известия Института инженерной физики. 2016. Т. 1. № 39. С. 25-30.

Поступила 08 августа 2016 г.

English

The automated synthesis of the absorbing finite Markov chain describing delivery of the multi-packet message in point-to-point line of data transmission system, and investigation of its operational efficiency

Vladimir Anatolyevich Tsimbal – Doctor of Engineering, Professor Department of Automated Control Systems Branch of Military Academy of Strategic Missile Troops named after Peter the Great.

E-mail: tsimbalva@mail.ru.

Vasily Evgenyevich Toiskin – Candidate of Technical Sciences, Instructor Department of Automated Control Systems Branch of Military Academy of Strategic Missile Troops named after Peter the Great.

E-mail: vetoiskin@mail.ru.

Sergey Evgenievich Potapov – Candidate of Technical Sciences, doctoral of chair Department of Automated Control Systems Branch of Military Academy of Strategic Missile Troops named after Peter the Great.

E-mail: 41kaf_rabota@mail.ru.

Oleg Igorevich Sorokin – Post-graduate, Department of Automated Control Systems Branch of Military Academy of Strategic Missile Troops named after Peter the Great.

E-mail: sorokin_oleg89@mail.ru.

Maxim Arturovich Lyagin – Post-graduate, Department of Automated Control Systems Branch of Military Academy of Strategic Missile Troops named after Peter the Great.

E-mail: lma.mil@yandex.ru.

Andrey Aleksandrovich Berezhnoy – Post-graduate, Department of Automated Control Systems Branch of Military Academy of Strategic Missile Troops named after Peter the Great.

E-mail: aaberezhnoy@mail.ru.

Nikita Viktorovich Kryuchkov – Post-graduate, Department of Automated Control Systems Branch of Military Academy of Strategic Missile Troops named after Peter the Great.

E-mail: nixon07.19@yandex.ru.

Address: 142210, Moscow Region, Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

Vitaly Vladimirovich Hoptar – RF DMA Chief in JSC NPP Polyot.

E-mail: vhohtar@mail.ru.

Address: 603950, Nizhny Novgorod, Komsomolskaya Square, 1.

Abstract: The low-rate channel based data transmission systems (data transmission rate 0,3 ... 32 kbps) having substantial error probability (10^{-2} ... 10^{-4}) operate, as a rule, according to X.25 standard protocol. Generally such systems and data communication networks are decimeter and meter wave range based and they are intended for delivery one - and multipacket messages in automated control systems for various purpose objects that are geographically distributed. Thus the most popular type of logical connection of customers in such a network is point-to-point connection. The main mechanism providing required accuracy and reliability of delivery of the multipacket message via X.25 protocol is the decision feed-back implemented through handshaking the forward packets (frames). Data exchange quality in such data transmission systems is estimated via probabilistic and time response characteristics which are understood as delivery probability of the time multipacket message. Process of the multipacket message delivery is discrete in time, accidental, contains a finite number of statuses, performs the fixed number of repetitions of each packet and has two outcomes: the message is delivered or not delivered. To describe this process the theory of the absorbing finite Markov chains, which requires synthesis of the corresponding states and transitions graph and, and also the matrix of transitional probabilities and the step transition matrix is used. The target probabilistic time response characteristics are defined via Kolmogorov-Chapman equation using average step transition method. Basing on mathematical induction method the synthesis rules for states and transitions graph, and also for transitional probability and step transition matrixes, invariant to number of packets of the transferred message and number of repetitions of each packet are suggested. These rules enable to automate equation Kolmogorov-Chapman synthesis process and consequently, to find target probabilistic time response characteristics. The calculation example of probabilistic time response characteristics for message delivery containing to 15 packets with X.25 protocol standard parameters in logical point-to-point connection is given on the basis of the developed approach.

Key words: absorbing finite Markov chain, multipacket message, data transmission system, probabilistic time response characteristics, radio channel, object and time graph.

References

1. Olifer V.G., Olifer N.A. Data transmission network fundamentals. M.: INTUIT.RU “Internet Universitet Informatsionnykh Tekhnology”, 2003. 248 p.
2. GOST R 34.950-92 (ISO 8208-87) Information technology. Open systems Interrelation. Data transmission. X.25 packet level protocol for the terminal equipment. M.: “Ordena “Znak pocheta” Izdatelstvo standartov”, 1993.
3. Sorokin O.I., Lyagin M.A., Berezhnoy A.A., Hoptar V.V., Ivanov S.N. Development features of object-oriented graphs of the absorbing finite Markov chains adequately describing process of delivery link-by-link multipacket messages with X.25 protocol with the fixed number of repetitions. - Internat. confer. "Radio-electronic devices and systems for infocommunication technologies" (REDS-2016); Reports; Series: scient. conf. dedic. To the Day of Radio. - Rus.scient. - techn. Soc. of radiotech., electron. and communication after A.S. Popov. M.: OOO BRIS-M, 2016. - Iss. LXXI. – P. 497-501.
4. Tsimbal V.A. Information exchange in data communication networks. Markov approach: Monograph. M.: Vuzovskaya kniga, 2014. - 143 p.
5. Kemény J., Snell J. Lark. Finite Markov chains. - Trasl. From Engl. M.: Nauka, 1970. - 272 p.
6. Tsimbal V.A., Toiskin V.E., Sandulov N.V., Hoptar V.V. Information exchange operational efficiency in a hierarchical radio network of military automatic control systems with X.25 protocol type. - High-end technologies in Earth space exploration. 2016. V. 8. No. 1. P. 26-31.
7. Toiskin V.E. Modeling of the “sliding window” mechanism in data exchange protocols of today’s network subscribers. - In collection: Technologies of information society. X International industry scientific and technical conference: collection of works. 2016. P. 71.
8. Tsimbal V.A., Shimanov S.N., Toiskin V.E. Finding finite Markov chain characteristics in random transition steps. - International scientific&research journal. 2015. No. 9-2 (40). P. 110-113.
9. Tsimbal V.A. The concept of the software-defined network application for mobile object management of / Tsimbal V.A., Toiskin V. E., Potapov S.E., Shutochkin E.A., Bonkin I.D.// Engineering Physics Institute News. 2016. T. 1. No. 39. P. 25-30