

УДК 654.16, 623.618, 004.031.2

ПРАВИЛА СИНТЕЗА ПОГЛОЩАЮЩИХ КОНЕЧНЫХ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ПРОЦЕСС ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В РАМКАХ ПРОТОКОЛОВ ТИПА X.25 В СОЕДИНЕНИИ «ТОЧКА – ТОЧКА» ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ЧИСЛЕ ПОВТОРОВ ПАКЕТОВ И КВИТАНЦИЙ И ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЗАДЕРЖКЕ В ПЕТЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

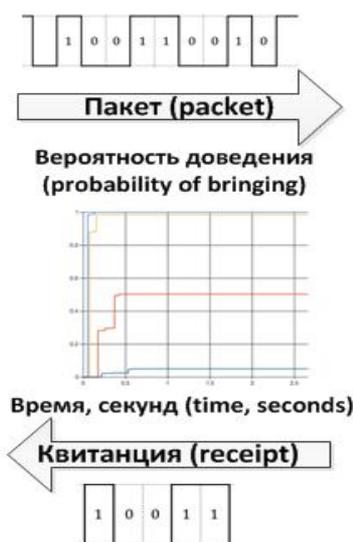
Статья поступила в редакцию 10.04.2018, в окончательном варианте – 07.05.2018.

Москвин Александр Анатольевич, АО «Корпорация «Комета», 115280, Российская Федерация, г. Москва, ул. Велозаводская, 5, начальник отдела, e-mail: moskvin375@rambler.ru

Обеспечение надежного обмена информацией при наличии помех в каналах связи является ключевым условием обеспечения успешного функционирования автоматизированных систем управления. Передача сообщений в сетях передачи данных обычно осуществляется в виде «порций информации» – пакетов. Для выявления успешного прохождения каждого пакета традиционно используют включение в каждый передаваемый пакет контрольной суммы, вычисляемой по определенным правилам. При обработке информации на приемной стороне проверяют совпадение переданной контрольной суммы и контрольной суммы для фактически принятого пакета. При наличии такого совпадения отправителю передают квитанцию об успешном приеме пакета. Традиционно информационный обмен в системах управления и сетях передачи данных моделируют на основе поглощающих конечных марковских цепей. В статье приведены правила построения матрицы переходных вероятностей уравнения Колмогорова – Чепмена поглощающей конечной марковской цепи, описывающей процесс доведения пакетов сообщений в системе передачи данных, ведущей информационный обмен по протоколу канального уровня типа X.25. Особенностью исследования является описание процесса доставки каждого пакета при произвольных числах повторов передачи пакетов и квитанций. Кроме того, различная длина пакетов, квитанций и тайм-аутов в протоколе X.25 приводит к разной длине шагов переходов в уравнении Колмогорова – Чепмена. Это требует для получения характеристик доставки сообщения синтезировать и матрицу шагов перехода. В работе на основе использования методов системного анализа выявлены закономерности построения матриц переходных вероятностей и шагов перехода. На основе этих закономерностей сформулированы правила синтеза для этих двух видов матриц. Рассмотрено использование предложенных правил для нахождения вероятностно-временных характеристик различных вариантов организации информационного обмена между звеньями системы передачи данных с использованием математического аппарата поглощающих конечных марковских цепей. Показано, что эти правила позволяют формировать матрицы переходных вероятностей и шагов перехода без построения графа цепи, что упрощает процесс расчета.

Ключевые слова: система передачи данных, информационный обмен, системный анализ, звено управления, качество канала связи, пакет, квитанция, вероятность битовой ошибки, требуемое время доведения, вероятностно-временная характеристика, поглощающая конечная марковская цепь, уравнение Колмогорова – Чепмена, синтез матриц переходных вероятностей, синтез матриц шагов перехода, правила формирования матриц

Графическая аннотация (Graphical annotation)



RULES OF SYNTHESIS OF FINITE MARKER CIRCUITS DESCRIBING THE PROCESS OF INFORMATION EXCHANGE WITHIN THE FRAMEWORK OF PROTOCOLS OF TYPE X.25 IN CONNECTION "POINT – POINT" WITH AN INDIRECT NUMBER OF REPETITIONS OF PACKAGES AND QUITATIONS AND AN INDIRECT DELAY IN THE FEEDBACK LOOP

The article was received by editorial board on 10.04.2018, in the final version – 07.01.2018.

Moskvin Alexander A., JSC "Corporation" Kometa ", 5 Velozavodskaya St., Moscow, 115280, Russian Federation,
Head of department, e-mail moskvin375@rambler.ru

Providing reliable information exchange at presence of interferences in communication channels is a key factor of ensuring successful functioning of automated control systems. Message transmission in data networks is usually done in the form of "pieces of information", i.e. packages. To identify successful passing of each package one usually includes a checksum into each transmitted package, which is calculated according to certain rules. While processing information at the receiving side coincidence of the transmitted checksum and the checksum of the received package is checked. If there is such a coincidence an acknowledgment on successful reception of the package is transmitted to the sender. Traditionally, information exchange in control systems and data transmission networks is modeled based on absorbing finite Markov chains. The article presents the rules for constructing matrix of transition probabilities of Kolmogorov-Chapman equation of absorbing finite Markov chain describing the process of transmitting message packages in the data transmission system, providing information exchange by the protocol of data link layer of X.25 type. Description of a process of transmitting each package with arbitrary number of repetitions of packages and acknowledgments transmissions is a feature of the research. In addition, different length of packages, acknowledgments and timeouts in X.25 protocol results in varying length of step-transition in Kolmogorov-Chapman equation. That is why to obtain characteristics of message transmission it is necessary to synthesize step-transition matrix as well. In the research patterns of forming matrixes of transition probabilities and step-transition are revealed on the base of using methods of system analysis. Rules of synthesis for these two types of matrices are formulated on the base of these patterns. We considered using proposed rules for indicating probabilistic and temporal characteristics of different variants of organizing information exchange between links of data transmission system using mathematical tool of absorbing finite Markov chains. It is shown that these rule let form matrixes of transition probabilities and step-transition without constructing graph network, what makes the process easier.

Keywords: data transmission system, information exchange, system analysis, control link, connection channel quality, package, acknowledgment, probability of bit error, required time for transmission, probabilistic and temporal characteristic, absorbing finite Markov chain, Kolmogorov-Chapman equation, synthesis of transition probability matrix, synthesis of step-transition matrix, rules of forming matrix

Перечень используемых в статье сокращений

АСУ	–	автоматизированные системы управления
ВВХ	–	вероятностно-временная характеристика
ЗУ	–	звенья управления
ЗвО	–	звено-отправитель
ЗвП	–	звено-получатель
ИД	–	исходные данные
ИО	–	информационный обмен
КМЦ	–	конечная марковская цепь
КС	–	канал связи
МПВ	–	матрица переходных вероятностей
МШП	–	матрица шагов перехода
ПКМЦ	–	поглощающая конечная марковская цепь
СПД	–	сеть передачи данных
УКЧ	–	уравнение Колмогорова – Чепмена
ЭВМ	–	электронно-вычислительная машина
ЭМВОС	–	эталонная модель взаимодействия открытых систем

Введение. Автоматизированные системы управления (АСУ) территориально распределенными объектами различного назначения состоят, как правило, из звеньев управления (ЗУ), выполняющих при формировании, выдаче и обработке информации те или иные целевые процессы согласно заданной иерархии, и некоторой сети передачи данных (СПД), обеспечивающей информационное взаимодействие ЗУ между собой. Качество функционирования АСУ во многом зависит от качества информационного обмена (ИО) ЗУ сообщениями в СПД. В свою очередь качество ИО характеризуется вероятностью доставки сообщения за заданное время. В СПД с каналами связи невысокого качества доставка сообщения обычно обеспечивается многократным повторением отправки: на передающем ЗУ пакетов; на принимающем ЗУ – квитанций об их получении. Количество таких повторов определяется алгоритмом ИО и зависит от конкретных условий функционирования СПД. При этом нужно знать, какое именно количество повторов необходимо выполнять для достижения требуемой вероятности доведения сообщения до его потребителя. Поэтому актуальным является математическое моделирование процесса ИО при произвольном числе повторов пакета и квитанции для нахождения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) доставки сообщений.

Целью работы является нахождение ВВХ информационного обмена в СПД на базе использования математического аппарата поглощающих конечных марковских цепей (ПКМЦ); разработка правил синтеза матриц переходных вероятностей и шагов перехода, упрощающих проведение расчетов на ЭВМ.

Общая характеристика проблематики работы. Основными свойствами СПД, определяющими их качество, являются оперативность и достоверность передачи данных. При этом оба эти свойства оцениваются одним показателем – вероятностно-временной характеристикой (ВВХ). Под ней понимается вероятность доставки сообщения за время, не превышающее допустимое [22].

$$BBX = P_{\text{дос}}(t_{\text{дос}} \leq T_{\text{дос}}^{\text{доп}}), \quad (1)$$

где $T_{\text{дос}}^{\text{доп}}$ – допустимое время доведения сообщения до потребителя.

Современные СПД, в том числе и СПД АСУ, реализуются по технологии коммутации пакетов. При этом методологической основой их построения является модель OSI – эталонная модель взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). В СПД, каналы связи (КС) которой обладают невысоким качеством по вероятности ошибки в расчете на один элементарный символ, реализуют, как правило, протокол OSI канального уровня X.25 [8, 10, 11, 15, 20, 22]. Его особенностью является использование решающей обратной связи. При этом факт успешного приема пакета подтверждается приемной стороной путем отправки соответствующей квитанции передающей стороне. При недоставлении до приемной стороны передача пакета может повторяться через интервал тайм-аута (длительность пакета и квитанции) конечное число раз. Передача квитанции о приеме пакета также допускает (при необходимости) несколько повторов. Кроме того, тайм-аут может включать дополнительные временные интервалы [1].

Помехи и замирания снижают достоверность передачи информации, передаваемой по КС [4, 9]. Повысить достоверность можно различными способами. Например, в СПД, использующей радиоканалы, увеличивают мощности передатчиков, улучшают чувствительность приемников, увеличивают мощности выходных сигналов на приемных антеннах за счет изменения их размеров и / или ориентации. Реализация таких способов обычно требует значительных материальных затрат и не обеспечивает повышения достоверности циркулирующей информации при частотно-селективных замираниях в КС.

Еще одним способом обеспечения достоверности ИО является применение помехоустойчивого кодирования. В процессе кодирования происходит преобразование последовательности данных в новую последовательность, имеющую избыточные символы. Такие символы применяются для выявления и исправления (в определенных пределах) ошибок [5, 17–19].

Доставка отдельного пакета в СПД, реализующей протокол типа X.25, представляет собой процесс со следующими свойствами:

- процесс случаен, так как пакет при повторе может быть доставлен или не доставлен вследствие помех по КС;
- при конечном числе повторов пакетов и квитанций процесс имеет конечное число состояний;
- переход процесса доставки отдельного пакета из одного состояния в другое происходит в дискретные моменты времени, определяемые передачей пакета и квитанции;
- переход процесса из одного состояния в другое зависит только от этого состояния и не зависит от того, как он в это состояние пришел (марковское свойство), т.е. не зависит от предыстории.

Процесс с такими свойствами является конечной марковской цепью (КМЦ) [2, 3, 22].

В рассматриваемом процессе доставки пакета в СПД имеется множество переходных состояний и два поглощающих. Одно из двух последних соответствует факту доведения пакета (состояние успеха), другое – факту недоставления пакета за допустимое число повторов (состояние неуспеха), тогда такая КМЦ является (считается) поглощающей КМЦ (ПКМЦ).

Динамика вероятностей состояний ПКМЦ описывается уравнением Колмогорова – Чепмена (УКЧ) [22]:

$$P_{\langle n \rangle}^{(i)} = P_{\langle n \rangle}^{(0)} \times P_{[n, n]}^{(i)} = P_{\langle n \rangle}^{(i-1)} \times P_{[n, n]}, \quad (2)$$

где $P_{\langle n \rangle}^{(i)}$, $P_{\langle n \rangle}^{(i-1)}$ – векторы вероятностей состояния процесса на i -ом и $(i-1)$ -ом шагах, $P_{[n, n]}$ – матрица переходных вероятностей (МПВ).

ВВХ представляют собой динамику изменения во времени вероятности состояния успеха. Следовательно, чтобы найти ВВХ доставки пакета, необходимо синтезировать МПВ УКЧ.

Спецификой применения таких ПКМЦ является то, что длительности пакета, квитанции, а также тайм-аута разные. В этом случае переход к реальному времени от числа шагов в УКЧ необходимо осуществлять по методу среднего шага переходов, введенному профессором В.А. Цимбалом [22]. Для этого необходимо использовать наряду с МПВ матрицу шагов перехода (МШП).

Далее в статье последовательно рассматриваются следующие вопросы.

1. Синтез ПКМЦ, описывающих процесс ИО на основе использования передачи пакетов по протоколу типа X.25 в СПД с соединением «точка – точка» при произвольном числе повторов пакета и квитанции.

2. Формализация процесса информационного обмена в СПД.

3. Синтез графа ПКМЦ и МПВ.

4. Анализ закономерностей синтеза МПВ.

5. Обоснование и формулировка правил синтеза МПВ и МШП для любого количества повторов пакета и квитанции для соединения типа «точка – точка»;

6. Построение с использованием сформулированного в работе подхода графика зависимости вероятности доведения пакета от времени.

Синтез поглощающих конечных марковских цепей, описывающих процесс информационного обмена по протоколу типа X.25 в СПД с соединением «точка – точка» при произвольном числе повторов пакета и квитанции. Процесс доведения сообщений в СПД происходит путем передачи пакетов. При этом, как правило, доставляемые сообщения являются многопакетными, поскольку размеры сообщений обычно больше размера одного пакета. Поэтому оценка оперативности доставки многопакетного сообщения базируется на результатах оценки оперативности доставки одного пакета.

Для повышения вероятности доведения пакета в СПД, использующих КС невысокого качества, используют метод увеличения числа повторов передаваемых пакетов и квитанций об их получении. Поэтому для конкретных условий функционирования СПД, имеющих ограничения по ВВХ, необходимо определять оптимальное количество повторов пакета и квитанции, формируемых звеньями СПД в процессе ИО. Такие сведения кроме расчета времени и вероятности доведения сообщения позволят регулировать мощности сигналов в зависимости от требуемого количества повторов пакетов и квитанций, либо принимать решение о смене КС при их сильной зашумленности [12–14]. Именно поэтому в СПД, использующих протоколы канального уровня типа X.25, является актуальным математическое моделирование процесса ИО для нахождения ВВХ обмена пакетами [3, 6, 7, 27–29].

Задача расчета ВВХ ИО сводится к нахождению вероятности доведения пакета (однопакетного сообщения):

$$P_{\text{дов}}(t \leq T_{\text{дов}}^{\text{дон}}) \geq P_{\text{дов}}^{\text{треб}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{дов}}^{\text{треб}}$ – требуемая вероятность доведения пакета.

Исходными данными для вычисления ВВХ доставки сообщения в СПД являются следующие:

– длина передаваемого пакета (однопакетного сообщения) и квитанции в битах ($L_c, L_{\text{кв}}$);

– вероятность битовой ошибки в КС (p_0);

– требуемая вероятность доведения пакета (однопакетного сообщения) до звеньев-получателей ($P_{\text{дов}}^{\text{треб}}$).

Порядок (алгоритм) нахождения ВВХ ИО таков [22]:

1) найти вероятности доведения (недоведения) пакета (однопакетного сообщения) и квитанции на него за один повтор ($p_c, p_{\text{кв}}, q_c, q_{\text{кв}}$);

2) используя найденные вероятности, сформировать МПВ ПКМЦ;

3) по синтезированной МПВ сформировать МШП ПКМЦ;

4) затем для полученной ПКМЦ пошагово решать УКЧ по формуле (2). При этом на каждом l -м шаге решения УКЧ необходимо находить продолжительность среднего шага перехода $\bar{\tau}_l$ и общую продолжительность всех шагов $\tau_l = \sum_{l=1}^L \bar{\tau}_l$, где L – общее число шагов;

5) при достижении выполнения условия (3) построить график зависимости вероятности доведения пакета до получателя от времени.

Как показано в [16, 22–26], ключевым элементом при нахождении ВВХ ИО на основе аппарата ПКМЦ является синтез МПВ, выполняющийся на основе графа ПКМЦ. Анализ полученных для алгоритмов ИО в соединении «точка – точка» при произвольном числе повторов пакетов и квитанций МПВ и МШП позволил выявить ряд закономерностей в их формировании [25, 26]. Это делает возможным синтез всех элементов этих матриц.

В качестве примера для иллюстрации этих закономерностей рассмотрим синтез МПВ и МШП для ИО в СПД с соединением типа «точка – точка» (рис. 1) на примере алгоритма ИО для двух повторов пакета (максимально), передаваемых звеном-отправителем (ЗвО) и трех повторов квитанции на каждый пакет (максимально), передаваемых звеном-получателем (ЗвП).

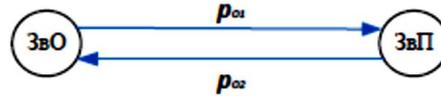


Рисунок 1 – Информационное взаимодействие в СПД с соединением типа «точка – точка»

Порядок реализации информационного обмена в СПД. На основе аппарата ПКМЦ для соединения типа «точка – точка» в СПД [16, 22–26] проводилось математическое моделирование процесса ИО для нахождения ВВХ в рамках протоколов типа Х.25 при разном числе повторов пакетов и квитанций. Технологии приема-передачи предполагаются следующие (рис. 2):

1. При выдаче пакета (повтора пакета) в КС ЗвО одновременно с окончанием передачи запускается таймер на ожидание квитанции от ЗвП. Выдача квитанции (повтора квитанции) в КС ЗвП происходит не более чем заданное количество раз с заранее определенным интервалом $t_{зад\ кв}$.

2. При получении квитанции от ЗвП о положительном результате приема пакета таймер на ЗвО сбрасывается, процедура передачи пакета ЗвО заканчивается.

3. Если после окончания выдачи пакета в течение тайм-аута не будет получена квитанция от ЗвП о положительном результате приема, то ЗвО выдает пакет повторно через время $t_{зад\ с}$. Таймер ожидания квитанции перезапускается на то же время. Общее время передачи квитанций и интервалов между ними $t_{зад\ кв}$ не должно превышать $t_{зад\ с}$.

4. Процедура передачи пакета может быть повторена заданное количество раз. Если после этого не будет получена квитанция-подтверждение на пакет, то пакет считается непереданным.

Далее на основе использования методов системного анализа рассмотрен порядок нахождения ВВХ ИО на базе математического аппарата ПКМЦ [22].

Синтез графа ПКМЦ и матрицы переходных вероятностей. Состояния графа ПКМЦ для исследуемого ИО в СПД при заданном алгоритме ИО приведены в таблице 1.



Рисунок 2 – Вариант алгоритма ИО в СПД между ЗвО и ЗвП

Переходы $S_2 \rightarrow S_3$, $S_4 \rightarrow S_5$, $S_6 \rightarrow S_7$, $S_7 \rightarrow S_8$, $S_{10} \rightarrow S_{11}$, $S_{12} \rightarrow S_{13}$, $S_{14} \rightarrow S_{15}$, $S_{15} \rightarrow S_{16}$ происходят автоматически через заданное время с вероятностью, равной 1. Состояния S_{16} и S_{17} являются поглощающими или невозвратными.

Граф ПКМЦ для соединения типа «точка – точка» в СПД при рассматриваемом алгоритме ИО приведен ниже (рис. 3).

Таблица 1. Состояния ПКМЦ для соединения типа «точка-точка» в СПД при 2-х повторах пакета (сообщения), передаваемых ЗвО и 3-х повторах в квитанции на каждое сообщение, передаваемых ЗвП

S ₀	ЗвО выдало 1-й повтор сообщения
S ₁	ЗвП получило 1-й повтор сообщения и выдало 1-й повтор квитанции
S ₂	Квитанция не доведена до ЗвО после 1-го повтора квитанции на 1-й повтор сообщения
S ₃	ЗвП получило 1-й повтор сообщения и выдало 2-й повтор квитанции
S ₄	Квитанция не доведена до ЗвО после 2-го повтора квитанции на 1-й повтор сообщения
S ₅	ЗвП получило 1-й повтор сообщения и выдало 3-й повтор квитанции
S ₆	Сообщение не доведено до ЗвП после 1-го повтора
S ₇	Квитанция не доведена до ЗвО после 3-го повтора квитанции на 1-й повтор сообщения
S ₈	ЗвО выдало 2-й повтор сообщения
S ₉	ЗвП получило 2-й повтор сообщения и выдало 1-й повтор квитанции
S ₁₀	Квитанция не доведена до ЗвО после 1-го повтора квитанции на 2-й повтор сообщения
S ₁₁	ЗвП получило 2-й повтор сообщения и выдало 2-й повтор квитанции
S ₁₂	Квитанция не доведена до ЗвО после 2-го повтора квитанции на 2-й повтор сообщения
S ₁₃	ЗвП получило 2-й повтор сообщения и выдало 3-й повтор квитанции
S ₁₄	Сообщение не доведено до ЗвП после 2-го повтора
S ₁₅	Квитанция не доведена до ЗвО после 3-го повтора квитанции на 2-й повтор сообщения
S ₁₆	Сообщение не доведено до ЗвП
S ₁₇	ЗвП довело квитанцию до ЗвО, сообщение доведено

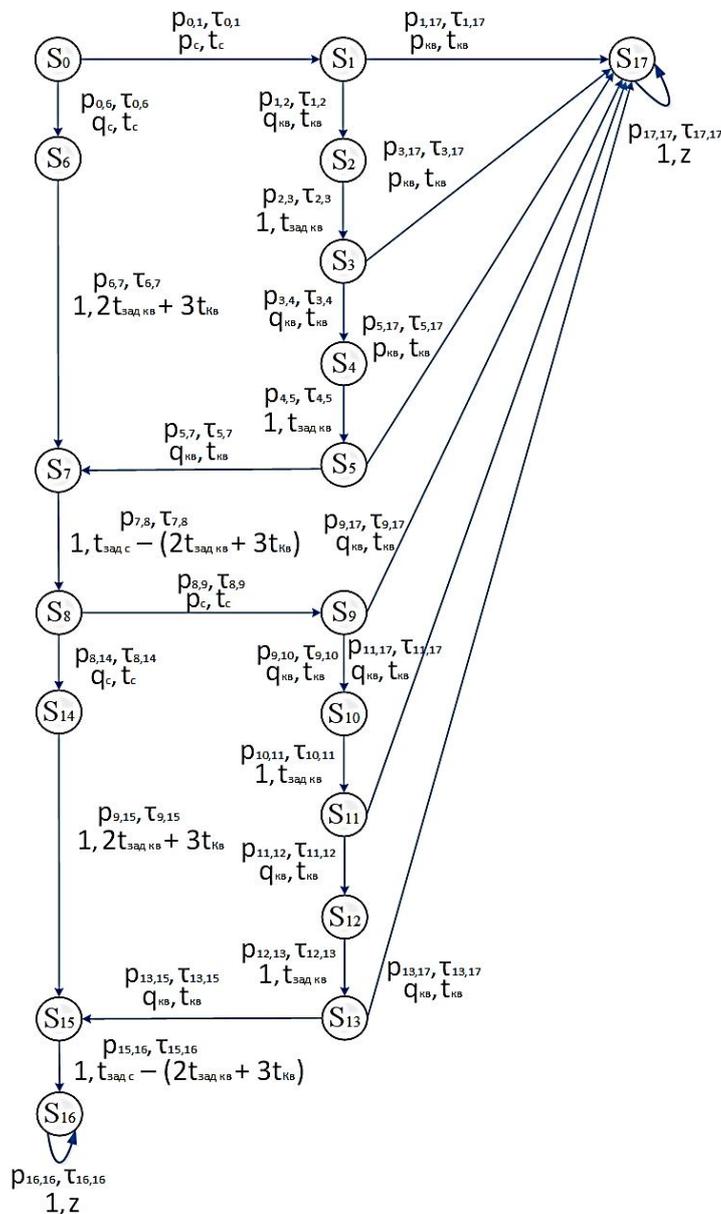


Рисунок 3 – Граф ПКМЦ для ИО в СПД с соединением типа «точка – точка» при двух повторах пакета и трех повторах квитанции

МПВ для анализируемого алгоритма ИО в СПД с соединением типа «точка – точка» имеет вид:

$$P_{[18,18]} = \begin{bmatrix} 0 & p_{0,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{0,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1,17} \\ 0 & 0 & 0 & p_{2,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{3,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{3,17} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{4,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{5,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{5,17} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{6,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{7,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{8,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{8,14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{9,10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{9,17} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{10,11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11,12} & 0 & 0 & 0 & p_{11,17} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{12,13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{13,15} & 0 & p_{13,17} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{14,15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{15,16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{16,16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{17,17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & p_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{кв} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{кв} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{кв} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{кв} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{кв} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{кв} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_c & 0 & 0 & 0 & 0 & q_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{кв} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{кв} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{кв} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{кв} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{кв} & 0 & 0 & p_{кв} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Таким образом, на основании графа ПКМЦ сформирована МПВ. Это позволяет синтезировать МШП ПКМЦ и в дальнейшем пошагово решать УКЧ по формуле (2) на ЭВМ. При этом на каждом l – ом шаге решения УКЧ необходимо находить продолжительность среднего шага перехода τ_l и общую продолжительность всех шагов.

Анализ закономерностей синтеза МПВ. Рассмотрение полученной МПВ позволяет выявить характерные области в расположении ее элементов (рис. 4).

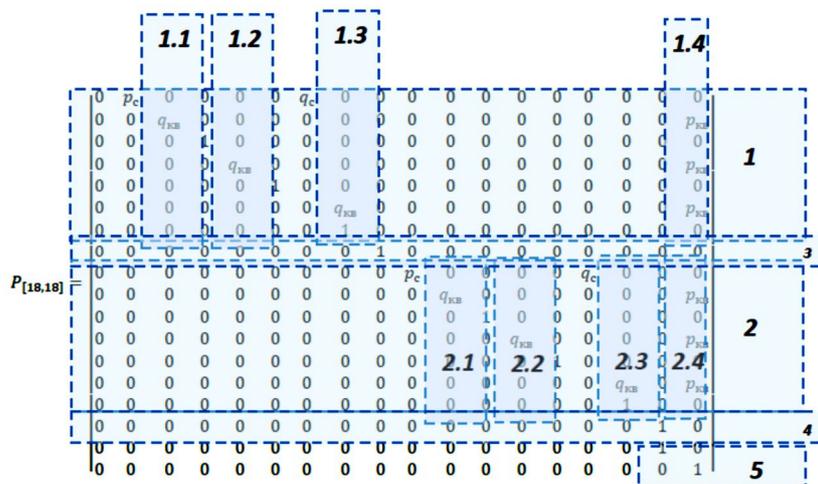


Рисунок 4 – Области МПВ, обозначающие значения переходных вероятностей между состояниями ПКМЦ

Цифрами на рисунке 4 показаны области МПВ, обозначающие значения переходных вероятностей между состояниями ПКМЦ при:

- 1) передаче ЗвО первого повтора пакета и передаче ЗвП квитанций о его получении;
 - 1.1) недоведении до отправителя ЗвО 1-го повтора квитанции;
 - 1.2) недоведении до отправителя ЗвО 2-го повтора квитанции;
 - 1.3) недоведении до отправителя ЗвО 3-го повтора квитанции;
 - 1.4) доведении до отправителя ЗвО одного из повторов квитанции после первого повтора пакета;
- 2) передаче ЗвО второго повтора пакета и передаче ЗвП квитанций о его получении;
 - 2.1) недоведении до отправителя ЗвО 1-го повтора квитанции;
 - 2.2) недоведении до отправителя ЗвО 2-го повтора квитанции;
 - 2.3) недоведении до отправителя ЗвО 3-го повтора квитанции;
 - 2.4) доведении до отправителя ЗвО одного из повторов квитанции после второго повтора пакета;
- 3) переходе от передачи первого повтора пакета и его квитирования к передаче второго повтора пакета и его квитированию;
- 4) переходе от передачи второго повтора пакета и его квитирования к поглощающим состояниям;
- 5) поглощающих состояниях ПКМЦ.

Из анализа МПВ, представленной на рисунке 4, и аналогичных ей следует, что МПВ, формируемые в процессе нахождения ВВХ для различных вариантов ИО между звеньями СПД с использованием математического аппарата ПКМЦ, имеют типовые области, характерные для отдельных фаз процесса доставки пакета и квитанции. Закономерности синтеза таких областей и МПВ в целом могут быть выявлены и формализованы.

Обоснование правил синтеза МПВ и МШП для любого количества повторов пакета и квитанции для СПД с соединением типа «точка – точка». Из анализа приведенной на рисунке 4 МПВ $P_{[18, 18]}$ и аналогичных ей матриц для ПКМЦ, описывающих алгоритмы ИО для разного количества повторов пакета и квитанции, следует, что МПВ является квадратной, ее размерность определяется соотношением:

$$G = m(2n+1) + m + 2, \tag{4}$$

где G – число строк (столбцов) МПВ; m – количество повторов пакета, а n – количество повторов квитанций о приеме пакета.

Зависимость размерности синтезируемой МПВ для соединения типа «точка – точка» от параметров алгоритма ИО показана на рисунке 5.



Рисунок 5 – Зависимость размерности синтезируемой МПВ для ИО в СПД с соединением типа «точка – точка» от параметров алгоритма ИО

Для описания правил формирования МПВ введем параметры l и j . Выразим через них текущие состояния количества повторов пакета и квитанции соответственно.

Строки и столбцы МПВ нумеруются по порядку от 0 до $m(2n+1)+m+1$.

Анализ МПВ для ПКМЦ, описывающей алгоритм ИО для соединения типа «точка – точка» при двух повторах пакета, передаваемых ЗВО и трех повторах квитанций на каждый пакет, передаваемых ЗВП, показывает следующее.

1. Поскольку в состоянии процесс ИО S_0 никогда не возвращается, то значения нулевого столбца МПВ определяется выражением $p(i,0)=0$, для $i=0,1,\dots,m(2n+1)+m+1$.

2. Переходные вероятности в первой и девятой строках МПВ $P_{[18, 18]}$ характеризуют доведение пакета (повтора пакета) от ЗВО до ЗВП. Для них справедливы выражения:

$$p((2(n-1)+4)i, (2(n-1)+4)i+1) = p_c, \text{ для } i=0,1,\dots,m-1;$$

$$p((2(n-1)+4)i, (2(n-1)+4)i+2n) = q_c, \text{ для } i=0,1,\dots,m-1.$$

3. Переходные вероятности во 2, 4, 10, 12-ой строках МПВ $P_{[18, 18]}$ описывают доведение квитанции (повтора квитанции) на полученный пакет (кроме последнего повтора квитанции). Расположение этих переходных вероятностей определяется из выражений:

$$p((2(n-1)+4)i+2j-1, (2(n-1)+4)i+2j) = q_{KB}, \text{ для } i=0,1,\dots,m-1, j=1,2,\dots,n-1;$$

$$p((2(n-1)+4)i+2j-1, m(2n+1)+m+1) = p_{KB}, \text{ для } i=0,1,\dots,m-1, j=1,2,\dots,n-1.$$

4. Значения переходных вероятностей во 3, 5, 11, 13-х строках МПВ $P_{[18, 18]}$ всегда равны 1. Причина в том, что при недоедении повтора квитанции ПКМЦ обязательно перейдет к передаче следующего повтора через $t_{\text{зад кв}}$. Поэтому $p((2(n-1)+4)i+2j, (2(n-1)+4)i+2j+1) = 1$ для $i=0,1,\dots,m-1, j=1,2,\dots,n-1$.

5. Переходные вероятности в 6 и 14-ой строках МПВ $P_{[18, 18]}$ описывают доведение квитанции (повтора квитанции) на полученный пакет при последнем (третьем) повторе квитанции. Эти переходные вероятности размещаются в МПВ так:

$$p((2(n-1)+4)i+2n-1, (2(n-1)+4)i+2n+1) = q_{KB};$$

$$p((2(n-1)+4)i+2n-1, m(2n+1)+m+1) = p_{KB}, \text{ для } i=0,1,\dots,m-1.$$

6. Переходные вероятности в 7 и 15-ой строках МПВ $P_{[18, 18]}$ характеризуют переход ПКМЦ после последнего недоедения повтора квитанции до ЗВО в состоянии недоедения повтора пакета до ЗВП (звена-получателя) в целом. Эти переходные вероятности всегда равны 1 и

$$p((2(n-1)+4)i+2n, (2(n-1)+4)i+2n+1) = 1, \text{ для } i=0,1,\dots,m-1.$$

7. Переходные вероятности в 8 и 16-ой строках МПВ $P_{[18, 18]}$ характеризуют переход ПКМЦ после недоедения i -го повтора пакета до ЗВП в состоянии начала передачи очередного повтора или в состоянии недоедения пакета в целом (после m -го повтора пакета). Эти переходные вероятности всегда равны 1 и для них справедливо выражение:

$$p((2(n-1)+4)i+2n+1, (2(n-1)+4)i+2n+2) = 1, \text{ для } i=0,1,\dots,m-1.$$

8. Переходная вероятность в предпоследней строке МПВ всегда равна 1, так как характеризует поглощающее состояние. Для нее справедливо выражение $p(m(2n+1)+m, m(2n+1)+m) = 1$.

9. Переходная вероятность в последней строке МПВ также всегда равна 1, так как характеризует поглощающее состояние:

$$p(m(2n+1)+m+1, m(2n+1)+m+1) = 1.$$

Остальные элементы МПВ заполняются нулями.

На рисунке 6 показано размещение описанных выше переходных вероятностей ПКМЦ в МПВ.

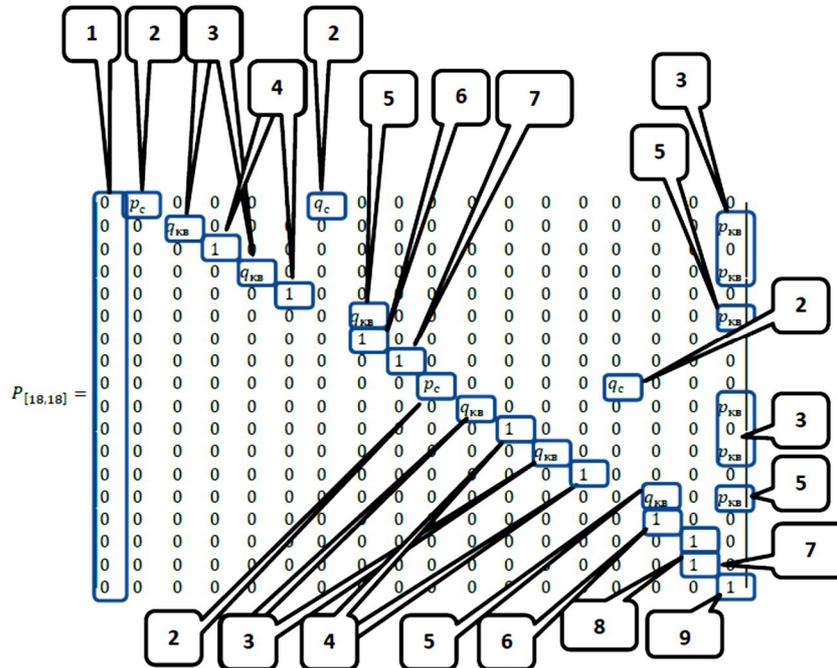


Рисунок 6 – Синтез МПВ ПКМЦ, описывающей ИО в СПД с соединением типа «точка – точка» для различного количества повторов пакета и квитанции, на примере $P_{[18, 18]}$.

Таким образом, получены все формулы, позволяющие автоматизировать синтез МПВ для любого количества повторов пакета и квитанции в ходе ИО для СПД с соединением типа «точка – точка». Алгоритм этого синтеза следующий. Пусть m – количество повторов пакета, а n – количество повторов квитанций о приеме пакета, тогда:

ПРАВИЛО 1. $p(i,0)=0$, для $i=0,1,\dots,m(2n+1)+m+1$.

ПРАВИЛО 2. $p((2(n-1)+4)i,(2(n-1)+4)i+1)=p_c$, для $i=0,1,\dots,m-1$.

ПРАВИЛО 3. $p((2(n-1)+4)i,(2(n-1)+4)i+2n)=q_c$, для $i=0,1,\dots,m-1$.

ПРАВИЛО 4. $p((2(n-1)+4)i+2j-1,(2(n-1)+4)i+2j)=q_{кв}$, для $i=0,1,\dots,m-1, j=1,2,\dots,n-1$.

ПРАВИЛО 5. $p((2(n-1)+4)i+2j,(2(n-1)+4)i+2j+1)=1$, для $i=0,1,\dots,m-1, j=1,2,\dots,n-1$.

ПРАВИЛО 6. $p((2(n-1)+4)i+2j-1,m(2n+1)+m+1)=p_{кв}$, для $i=0,1,\dots,m-1, j=1,2,\dots,n-1$.

ПРАВИЛО 7. $p((2(n-1)+4)i+2n-1,(2(n-1)+4)i+2n+1)=q_{кв}$, для $i=0,1,\dots,m-1$.

ПРАВИЛО 8. $p((2(n-1)+4)i+2n-1,m(2n+1)+m+1)=p_{кв}$, для $i=0,1,\dots,m-1$.

ПРАВИЛО 9. $p((2(n-1)+4)i+2n,(2(n-1)+4)i+2n+1)=1$, для $i=0,1,\dots,m-1$.

ПРАВИЛО 10. $p((2(n-1)+4)i+2n+1,(2(n-1)+4)i+2n+2)=1$, для $i=0,1,\dots,m-1$.

ПРАВИЛО 11. $p(m(2n+1)+m,m(2n+1)+m)=1$.

ПРАВИЛО 12. $p(m(2n+1)+m+1,m(2n+1)+m+1)=1$.

Остальные элементы МПВ заполняются нулями.

Также проведен синтез МШП для рассматриваемых условий ИО в СПД. МШП $T_{[18, 18]}$ в этом случае имеет вид:

$$\text{ПРАВИЛО 10. } \tau((2(n-1)+4)i+2n+1, (2(n-1)+4)i+2n+2) = t_{\text{задс}}^{-(n-1)t_{\text{задкв}}} - nt_{\text{кв}}),$$

для $i = 0, 1, \dots, m-1$.

$$\text{ПРАВИЛО 11. } \tau(m(2n+1)+m, m(2n+1)+m) = z.$$

$$\text{ПРАВИЛО 12. } \tau(m(2n+1)+m+1, m(2n+1)+m+1) = z.$$

Переход процесса доставки пакета из любого поглощающего состояния в самое себя происходит с произвольным шагом z . Остальные элементы МШП равны ∞ .

Таким образом, на базе теории ПКМЦ с использованием методов системного анализа разработан подход к математическому моделированию процесса доведения пакета в СПД с протоколом типа X.25 в соединении «точка – точка» при произвольном числе повторов пакета и квитанции и произвольной задержке в петле обратной связи. Использование такого подхода позволяет при нахождении ВВХ для различных вариантов ИО между звеньями СПД с использованием математического аппарата ПКМЦ формировать МПВ и МШП без разработки таблиц состояний и построения графа цепи – это значительно упрощает процесс расчета.

Используя на данный подход, произведем расчет ВВХ ИО в соединении «точка – точка» при L_c 256 бит; $L_{кв}$ 128 бит [21].

Исходные данные (ИД) для расчета ВВХ доставки пакета (однопакетного сообщения) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – ИД для расчета ВВХ доставки пакета в СПД с соединением типа «точка – точка»

Показатель	Значение		
	Рисунок 7	Рисунок 8	Рисунок 9
Вероятность битовой ошибки в КС «ЗвО – ЗвП»	10^{-3}	10^{-3}	$10^{-2}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-4}$
Вероятность битовой ошибки в КС «ЗвП – ЗвО»	10^{-3}	10^{-2}	$10^{-2}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-4}$
Пропускная способность КС, кбит/с	4,8	4,8	4,8
Временной интервал между повторами пакета, с	0,3	1	0,3
Временной интервал между повторами квитанции, с	0,1	0,1	0,1
Количество повторов пакета	1, 2, 3, 5	3	3
Количество повторов квитанции	2	1, 2, 3, 5	2

Результаты нахождения ВВХ ИО в СПД с соединением «точка – точка» для приведенных ИД представлены на рисунках 7–9.

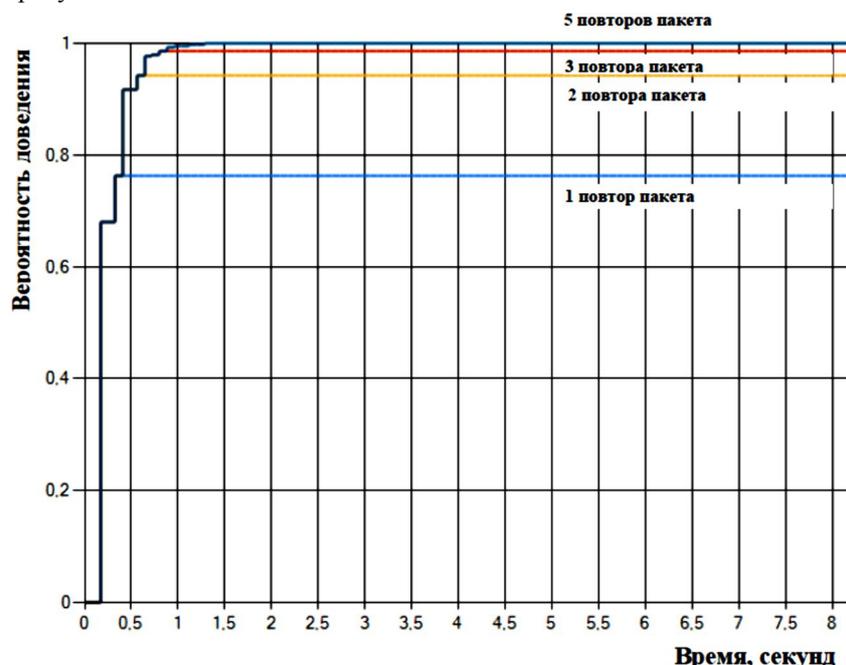


Рисунок 7 – Зависимость вероятности доведения пакета в СПД с соединением «точка – точка» от количества повторов его передачи

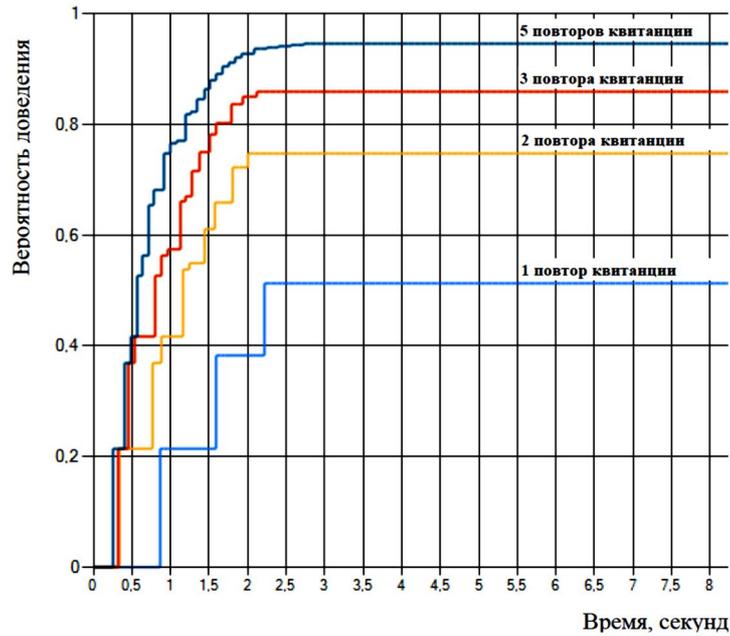


Рисунок 8 – Зависимость вероятности доведения пакета в СПД с соединением «точка – точка» при различном количестве повторов передачи квитанции

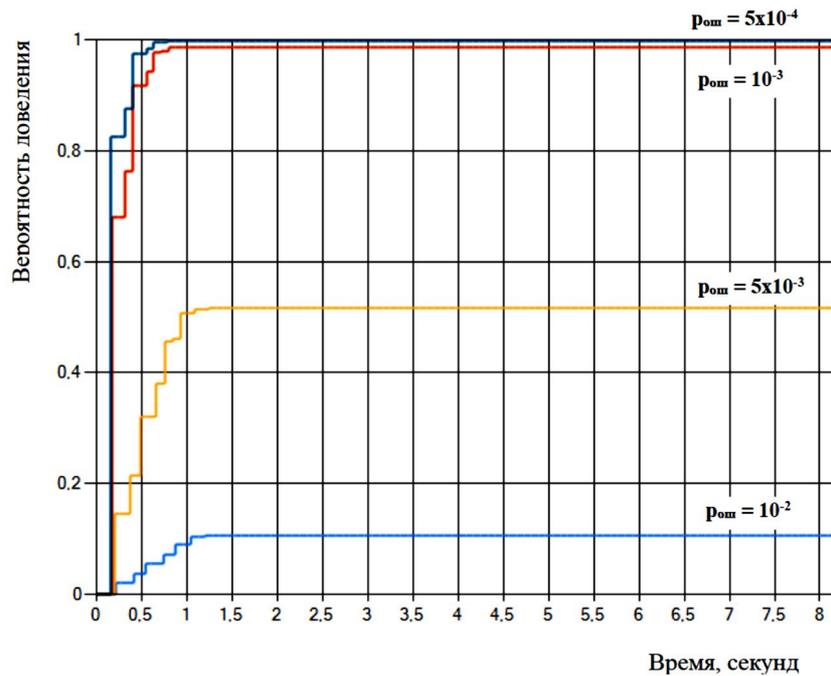


Рисунок 9 – Зависимость вероятности доведения пакета в СПД с соединением «точка – точка» при различном качестве КС

Таким образом, на базе системного анализа сформулированы правила синтеза МПВ и МШП для любого количества повторов пакета и квитанции в СПД с соединением типа «точка – точка», что упрощает нахождение ВВХ ИО с использованием аппарата ПКМЦ. Метод формирования МШП и МПВ, изложенный в настоящем исследовании, может быть обобщен для СПД с соединением типа «точка – многоточка» с любым конечным количеством звеньев управления. В дальнейшем это позволит автоматизировать для них процесс нахождения ВВХ ИО с использованием аппарата ПКМЦ, что будет наиболее востребованным при разработке программ для ЭВМ, реализующих изложенный в работе подход.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. При нахождении ВВХ информационного обмена на базе ПКМЦ наиболее трудоемким являлся синтез УКЧ, и в частности, матриц переходных вероятностей и матриц шагов перехода, проводимый на основе графа ПКМЦ.

2. Синтез матриц переходных вероятностей и матриц шагов перехода базируется на выявленных в исследовании закономерностях. Это позволило разработать инвариантные правила синтеза матриц в рамках протоколов типа Х.25 в СПД с соединением «точка – точка» для любого количества повторов пакета и квитанции об их получении; произвольной задержке в петле обратной связи.

3. Использование сформулированных правил синтеза матриц переходных вероятностей и матриц шагов перехода упрощает процесс расчета вероятностно-временных характеристик для различных вариантов ИО между звеньями системы передачи данных на базе математического аппарата ПКМЦ – за счет отказа от разработки таблиц состояний и построения графа ПКМЦ.

Список литературы

1. Аничкин С. А. Протоколы информационно-вычислительных сетей : справ. / С. А. Аничкин, С. А. Белов, А. В. Бернштейн и др. – Москва : Радио и связь, 1990. – 504 с.
2. Берлин А. Н. Коммутация в системах и сетях связи / А. Н. Берлин. – Москва : Эко-Трендз, 2006. – 345 с.
3. Бертсекас Д. Сети передачи данных : пер. с англ. / Д. Бертсекас, Р. Галлагер. – Москва : Мир, 1985 – 544 с.
4. Воловач В. И. Помехоустойчивость радиотехнических устройств охраны при использовании когерентного и некогерентного методов обнаружения / В. И. Воловач // Прикаспийский журнал управление и высокие технологии. – 2012. – № 1. – С. 13–20 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(17\)/13-20.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(17)/13-20.pdf)).
5. Гусев А. В. Метод помехоустойчивого кодирования информации каналов передачи данных телеизмерительных информационных систем с исправлением ошибок в двух байтах информации / А. В. Гусев // Известия Института инженерной физики. – 2017. – Вып. 2 (32). – С. 54–62.
6. Груднин И. В. Методика оценивания оперативности получения информации от космических систем дистанционного зондирования земли / И. В. Груднин, А. М. Зубачёв, П. Ю. Бугайченко // Известия института инженерной физики. – 2017. – Вып. 1 (43). – С. 80–86.
7. Исаков Е. Е. Технологические проблемы построения транспортных сетей военной связи / Е. Е. Исаков. – Санкт-Петербург : Военная академия связи им. маршала Советского Союза С.М. Буденного, 2004. – 528 с.
8. Кучерявый А. Е. Пакетная сеть связи общего пользования / А. Е. Кучерявый, Л. З. Гильченко, А. Ю. Иванов. – Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2004. – 272 с.
9. Леммле Д. В. Характеристики передачи сигналов OFDM в многолучевых каналах / Д. В. Леммле // Прикаспийский журнал управление и высокие технологии. – 2015. – № 2. – С. 207–216 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(30\)/207-216.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(30)/207-216.pdf)).
10. Олифер В. Г. Основы компьютерных сетей / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – Санкт-Петербург : Питер, 2014. – 352 с.
11. Олифер В. Г. Основы сетей передачи данных // В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – Москва : Институт-университет информационных технологий – ИНТУИТ.ру, 2003. – 248 с.
12. Орехов С. Е. Графовая модель функционирования сети связи с многомерной маршрутизацией пакетов в виде системы массового обслуживания / С. Е. Орехов // Известия Института инженерной физики. – 2012. – Вып. № 1 (23). – С. 57–59.
13. Орехов С. Е. Численный метод анализа временных характеристик случайного процесса, описываемого поглощающей конечной марковской цепью с неоднородными по длительности шагами переходов между состояниями цепи / С. Е. Орехов // Известия Института инженерной физики. – 2013. – Вып. 3 (29). – С. 62–65.
14. Павлов А. А. Контроль ошибок в телекоммуникационных устройствах / А. А. Павлов, А. П. Ващенко, О. В. Хоруженко, В. С. Никулин // Известия Института инженерной физики. – 2010. – Вып. 3 (17). – С. 37–38.
15. Пескова С. А. Сети и телекоммуникации : учеб. пос. для вузов / С. А. Пескова, А. В. Кузин, А. Н. Волков. – Москва : Академия, 2006. – 352 с.
16. Реджепов И. В. Математическое моделирование процедуры автоматической организации соединения (ALE) «точка – точка» в системе декаметрового радиосвязи на базе протокола MIL-STD-188-141B / И. В. Реджепов, Д. А. Токарев, А. М. Вальваков // Известия Института инженерной физики. – 2017. – Вып. 3 (45). – С. 56–60.
17. Сидоренко А. А. Методы построения систем мониторинга объектов / А. А. Сидоренко // Перспективные технологии в средствах передачи информации : мат-лы IX Междунар. науч.-тех. конф. – Владимир – Суздаль, 2011. – Т. 2. – С. 209–210.
18. Сидоренко А. А. Применение помехоустойчивого кодирования с исправлением ошибок при передаче цифровых сигналов / А. А. Сидоренко // Материалы вторых Всероссийских Армандовских чтений : сб. тез. докл. науч.-практич. семинара. – Муром, 2012. – С. 36–37.
19. Сидоренко А. А. Разработка и исследование адаптивного помехоустойчивого кодера-декодера для локальных систем телеметрии : дис. ... канд. Тех. наук / А. А. Сидоренко. – Владимир, 2014. – С. 24–46.
20. Советов Б. А. Построение сетей интегрального обслуживания / Б. А. Советов, С. А. Яковлев. – Москва : Машиностроение, 1990. – 332 с.

21. Тоискин В. Е. Оперативность информационного обмена в иерархической радиосети АСУ ВН с протоколом типа Х.25 / В. Е. Тоискин, В. А. Цимбал, Н. В. Сандулов, В. В. Хоптар // Научные исследования Земли. – 2016. – Т. 8, № 1 – С. 26–31.
22. Цимбал В. А. Информационный обмен в сетях передачи данных / В. А. Цимбал. – Москва : Вузская книга, 2014. – 144 с.
23. Цимбал В. А. Новая информационная технология синтеза систем и сетей передачи данных на основе метода чувствительности конечных марковских цепей / В. А. Цимбал // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2001. – № 1 – С. 50–53.
24. Цимбал В. А. Анализ характеристик конечных марковских цепей при разных шагах переходов / В. А. Цимбал, А. М. Вальваков, М. Ю. Попов // Известия Института инженерной физики. – 2014. – № 31 – С. 53–56.
25. Цимбал В. А. Исследование процессов информационного обмена в иерархических сетях передачи данных с соединениями «точка-многоточка» при различном качестве каналов связи / В. А. Цимбал, А. А. Москвин, Е. А. Довгополая // Материалы Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» REDS – 2017 : Доклады. Сер.: научные конференции, посвященные дню радио (выпуск LXXII) Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова, 2017. – С. 194–198.
26. Цимбал В. А. Нахождение вероятностно-временных характеристик доставки сообщений в сетях передачи данных с соединениями «точка – многоточка» при различном качестве каналов связи / В. А. Цимбал, А. А. Москвин, Е. А. Довгополая // Известия института инженерной физики. – 2017. – Вып. 3 (45). – С. 60–69.
27. Dorigo M. AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks / M. Dorigo, G. Di Caro // IRIDIA, Universite Libre de Bruxelles. Artificial Intelligence Research. – 1998. – № 9. – С. 317–365.
28. Dorigo M. Ant algorithms for distributed discrete optimization / M. Dorigo, G. Di Caro, L. M. Gambardella // IRIDIA, Universite Libre de Bruxelles. Submitted to Artificial Life. – 1998. – № 10. – С. 98–109.
29. Dorigo M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem / M. Dorigo, L. M. Gambardella // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 1997. – № 1. – С. 53–66.

References

1. Anichkin S. A., Belov S. A., Bernshteyn A. V. et al. *Protokoly informatsionno-vychislitelnykh setey: spravochnik* [Protocols of information and computer networks: info]. – Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990, 504 p.
2. Berlin A. N. *Kommutatsiya v sistemakh i setyakh svyazi* [Switching in systems and communication networks]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2006 – 345s.
3. Bertsekas D., Gallager R. *Seti peredachi dannykh* [Data transmission networks], Moscow, Mir, 1985, 544 p.
4. Volovach V. I. Pomekhoustoychivost radiotekhnicheskikh ustroystv okhrany pri ispolzovanii kogherentnogo i nekogherentnogo metodov obnaruzheniya [Noise immunity of radio protection devices using coherent and incoherent detection methods]. *Prikaspiyskiy zhurnal upravleniye i vysokieye tekhnologii* [Pre-Caspian Journal of Management and High Technologies], 2012, no. 1, pp. 13–20 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(17\)/13-20.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(17)/13-20.pdf)).
5. Gusev A. V. Metod pomekhoustoychivogo kodirovaniya informatsii kanalov peredachi dannykh teleizmeritelnykh informatsionnykh sistem s ispravleniyem oshibok v dvukh baytakh informatsii [Method of noise-immune coding of information channels of data transmission of telemetric information systems with error correction in two bytes of information]. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2017, no. 2 (32), pp. 54–62.
6. Grudin I. V., Zubachov A. M., Bugaychenko P. Yu. Metodika otsenivaniya operativnosti polucheniya informatsii ot kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya zemli [Methodology for assessing the efficiency of obtaining information from space systems of remote sensing of the earth]. *Izvestiya instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2017, no. 1 (43), pp. 80–86.
7. Isakov Ye. Ye. *Tekhnologicheskiye problemy postroyeniya transportnykh setey voyennoy svyazi* [Technological problems of building transport networks of military communications]. St. Petersburg, Military academy of communication them. Marshal of the Soviet Union S.M. Budennogo Publ., 2004, 528 p.
8. Kucheryavy A. Ye., Gilchenok L. Z., Ivanov A. Yu. *Paketnaya set svyazi obshchego polzovaniya* [Bundle communication network of general use]. St. Petersburg, Nauka i Tekhnika Publ., 2004, 272 p.
9. Lemle D. V. Kharakteristiki peredachi signalov OFDM v mnogoluchevykh kanalakh [Characteristics of OFDM signal transmission in multipath channels]. *Prikaspiyskiy zhurnal upravleniye i vysokieye tekhnologii* [Pre-Caspian Journal of Management and High Technologies], 2015, № 2, pp. 207–216 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(30\)/207-216.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(30)/207-216.pdf)).
10. Olifer V. G., Olifer N. A. *Osnovy kompyuternykh setey* [Fundamentals of computer networks]. St. Petersburg, Piter Publ., 2014, 352 p.
11. Olifer V. G., Olifer N. A. *Osnovy setey peredachi dannykh* [Fundamentals of the data transmission network]. Moscow, Institute-University of Information Technologies – INTUIT.ru Publ., 2003. 248 p.
12. Orekhov S. Ye. Grafovaya model funktsionirovaniya seti svyazi s mnogomernoy marshrutizatsiyey paketov v vide sistemy massovogo obsluzhivaniya [A graph model of the functioning of a communication network with multidimensional packet routing in the form of a queuing system]. *Izvestiya Instituta inzhener noy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2012, no. 1 (23), pp. 57–59.
13. Orekhov S. Ye. Chislennyy metod analiza vremennykh kharakteristik sluchaynogo protsessa, opisyyayemogo pogloshchayushchey konechnoy markovskoy tsepyu s neodnorodnymi po dlitelnosti shagami perekhodov mezhdru sostoyaniyami tsepi [A numerical method for analyzing the time characteristics of a random process described by an absorbing finite

Markov chain with inhomogeneous time steps of transitions between chain states]. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2013, no. 3 (29), pp. 62–65.

14. Pavlov A. A., Vashchenko A. P., Khoruzhenko O. V., Nikulin V. S. Kontrol oshibok v telekommunikatsionnykh ustroystvakh [Control of errors in telecommunication devices]. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2010, no. 3 (17), pp. 37–38.

15. Peskova S. A., Kuzin A. V., Volkov A. N. *Seti i telekommunikatsii: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Networks and telecommunications: a textbook for high schools]. Moscow, Akademiya Publ., 2006, 352 p.

16. Redzhepov I. V., Tokarev D. A., Valvakov A. M. Matematicheskoye modelirovaniye protsedury avtomaticheskoy organizatsii soyedineniya (ALE) "tochka – tochka" v sisteme dekametrovoy radiosvyazi na baze protokola MIL-STD-188-141B [Mathematical modeling of the procedure of automatic connection (ALE) "point-to-point" in the system of decametric radio communication based on the protocol MIL-STD-188-141B]. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2017, no. 3 (45), pp. 56–60.

17. Sidorenko A. A. Metody postroyeniya sistem monitoringa obektov [Methods for constructing monitoring systems for objects]. *Perspektivnyye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii: Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Perspective Technologies in Means of Information Transmission: Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference]. Vladimir – Suzdal, 2011, vol. 2, pp. 209–210.

18. Sidorenko A. A. Primeneniye pomekhoustoychivogo kodirovaniya s ispravleniyem oshibok pri peredache tsifrovyykh signalov [Application of noise-immune encoding with correction of errors in the transmission of digital signals]. *Materialy vtoroykh Vserossiyskikh Armandovskikh chteniy. Sbornik tezisov dokladov nauchno-prakticheskogo seminara* [Proceedings of the second All-Russian Armand Readings. The collection of theses of the reports of the scientific-practical seminar]. Murom, 2012, pp. 36–37.

19. Sidorenko A. A. *Razrabotka i issledovaniye adaptivnogo pomekhoustoychivogo kodera-dekodera dlya lokal'nykh sistem teletetrii: Dissertatsiya* [Development and research of adaptive noise-immune encoder-decoder for local telemetry systems]. Vladimir, 2014, pp. 24–46.

20. Sovetov B. A., Yakovlev S. A. *Postroyeniye setey integralnogo obsluzhivaniya* [Construction of integrated service networks]. Moscow Mashinostroyeniye Publ., 1990, 332 p.

21. Toiskin V. Ye., Tsimbal V. A., Sandulov N. V., Khoptar V. V. Operativnost informatsionnogo obmena v iyerarkhicheskoy radioseti ASU VN s protokolom tipa KH.25 [Efficiency of information exchange in the hierarchical radio network of the ASU VN with the X.25 protocol]. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High technology in space exploration of the Earth], 2016, vol. 8, no. 1, pp. 26–31.

22. Tsimbal V. A. *Informatsionnyy obmen v setyakh peredachi dannykh* [Information exchange in the data transmission networks]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2014, 144 p.

23. Tsimbal V. A. Novaya informatsionnaya tekhnologiya sinteza sistem i setey peredachi dannykh na osnove metoda chuvstvitel'nosti konechnykh markovskikh tsepey [New information technology for the synthesis of data transmission systems and networks based on the sensitivity of finite Markov chains]. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2001, no. 1, pp. 50–53.

24. Tsimbal V. A., Valvakov A.M., Popov M. Yu. Analiz kharakteristik konechnykh markovskikh tsepey pri raznykh shagakh perekhodov [Analysis of the characteristics of finite Markov chains at different steps of transitions]. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2014, no. 31, pp. 53–56.

25. Tsimbal V. A., Moskvina A. A., Dovgopolaya Ye. A. Issledovaniye protsessov informatsionnogo obmena v iyerarkhicheskikh setyakh peredachi dannykh s soyedineniyami "tochka – mnogotochka" pri razlichnom kachestve kanalov svyazi [Investigation of information exchange processes in hierarchical data networks with point-to-multipoint connections with different quality of communication channels]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Radioelektronnyye ustroystva i sistemy dlya infokommunikatsionnykh tekhnologiy" REDS – 2017. Doklady. Seriya "Nauchnyye konferentsii, posvyashchennyye dnyu radio" (vypusk LXXII) Rossiyskogo nauchno-tekhnicheskogo obshchestva radiotekhniki, elektroniki i svyazi imeni A. S. Popova* [Materials of the international conference "Radioelectronic devices and systems for infocommunication technologies" REDS – 2017. Reports. Series "Scientific conferences dedicated to the day of radio" (issue LXXII) of the Russian scientific and technical society of radio engineering, electronics and communications named after AS Popov], 2017, pp. 194–198.

26. Tsimbal V. A., Moskvina A. A., Dovgopolaya Ye. A. Nakhozhdeniye veroyatnostno-vremennykh kharakteristik dostavki soobshcheniy v setyakh peredachi dannykh s soyedineniyami "tochka – mnogotochka" pri razlichnom kachestve kanalov svyazi [Finding probabilistic-temporal characteristics of message delivery in data networks with point-to-multipoint connections with different quality of communication channels]. *Izvestiya instituta inzhenernoy fiziki* [News of the Institute of Engineering Physics], 2017, no. 3 (45), pp. 60–69.

27. Dorigo M., Di Caro G. AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks. *IRIDIA, Universite Libre de Bruxelles. Artificial Intelligence Research*, 1998, no. 9, pp. 317–365.

28. Dorigo M., Di Caro G., Gambardella L. M. Ant algorithms for distributed discrete optimization. *IRIDIA, Universite Libre de Bruxelles. Submitted to Artificial Life*, 1998, no. 10, pp. 98–109.

29. Dorigo M., Gambardella L. M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, no. 1, pp. 53–66.