

# Определение рациональных параметров системных процессов оперативной организации и поддержания речевого канала «точка-точка» в военной системе связи с подвижными объектами на базе перспективных радиосредств

А. А. Васильченко

В статье представлен подход к определению рациональных параметров установления речевого канала «точка-точка» с заданной оперативностью и его восстановления с требуемой надежностью в военной системе связи с подвижными объектами на базе перспективных радиосредств в условиях радиоэлектронного подавления и огневого поражения противником.

*Ключевые слова:* оперативность, надежность, система радиодоступа, распределенная опорная сеть, магистральная опорная сеть, радиоэлектронное подавление, огневое поражение, речевой канал, система связи с подвижными объектами, сеть радиодоступа, мобильный абонент, цепь Маркова.

## 1. Введение

В условиях сложной мировой военно-политической обстановки, характеризующейся развертыванием США и НАТО мощных радиолокационных станций вдоль границ РФ, дестабилизацией силами США и НАТО обстановки в ближневосточном регионе путем импорта «оранжевых» революций в Египте, Ливии, Сирии, продолжением экспансии в Ираке и Афганистане, нестабильностью на Украине, обеспечение координации и четкого взаимодействия подразделений различных видов и родов Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) при выполнении ими боевых задач определяет результативность ведения боевых действий и обеспечивается системами военной связи, способными устойчиво функционировать в условиях различных воздействий – как в условиях применения противником средств радиоэлектронного подавления (РЭП), так и огневого поражения средствами высокоточного оружия (ВТО). В таких условиях большую значимость приобретают военные системы связи с подвижными объектами (ВСС ПО), способные устойчиво функционировать в позиционных районах мотострелковых бригад, обеспечивая координацию и взаимодействие подразделений при выполнении ими различных маневров в условиях противодействия противника.

В настоящий момент существуют ВСС ПО, реализованные как на базе существующих, так и на базе перспективных радиосредств, позволяющих в потенциале оперативно организовывать и поддерживать информационный обмен между должностными лицами различных уровней в условиях РЭП и огневого поражения противником. Данные военные системы связи с подвижными объектами наиболее подвержены деградации в ходе своего функционирования в боевой обстановке и адаптируются к поддержанию надежности и живучести сети связи посредством самоорганизации направлений связи между узлами [1, 2].

Наиболее рельефно это отражено в ВСС ПО, формирующих радиосети тактического звена управления (РС ТЗУ), имеющих важное значение и наиболее подверженных различным воздействиям противника. К ВСС ПО предъявляются жесткие требования (например, по оперативности и надежности) со стороны руководящих документов (ОТТ, наставления по связи). Как правило, оперативность связи оценивается вероятностно-временными характеристиками (ВВХ) системных процессов в ВСС ПО (установление соединения (речевого канала) между абонентами или его восстановление при деградации радиосети). Надежность связи может оцениваться коэффициентом оперативной готовности (КОГ) данного соединения (речевого канала).

В настоящее время применение таких современных технологий, как SDR (программно-конфигурируемое радио), mesh-сети, позволяет обеспечить устойчивое функционирование радиосредств в указанных условиях воздействия противника, обеспечивая высокую помехозащищенность и надежность. Однако ВСС ПО, выполненные на базе указанных радиосредств, способны формировать радиосети только на уровне терминальных станций и не функционируют в настоящее время в масштабе полных сетей (используя сетевое оборудование). В связи с изложенным возникает задача, характеризующаяся следующими особенностями.

1. В настоящее время существуют перспективные терминальные и сетевые радиосредства, позволяющие *в потенциале* с заданной степенью оперативности организовывать многовариантным образом речевой канал различным должностным лицам через многие территориально рассредоточенные узлы системы радиодоступа (УСРД) ВСС ПО и многовариантным образом его реконфигурировать (восстанавливать) в условиях выхода из строя отдельных УСРД в ходе их РЭП и огневого поражения противником. УСРД выполняют функции базовых станций (точек доступа) при обслуживании мобильных абонентов (МА).

2. Отсутствует методическое и алгоритмическое обеспечение отбора рациональных вариантов установления речевых каналов через различное число транзитных УСРД из их совокупного топологического множества, реализующих требования по оперативности установления речевых каналов и их восстановления с требуемой надежностью.

3. Разрешение данной задачи заключается в оперативном формировании речевых каналов и поддержании их надежности в условиях указанных воздействий противника, которое требует знания (нахождения) актуальных рациональных параметров установления речевого канала «точка-точка» с заданной оперативностью и его восстановления с требуемой надежностью в ВСС ПО на базе перспективных радиосредств. Архитектура рассматриваемой ВСС ПО представлена на рис. 1 [1, 2].

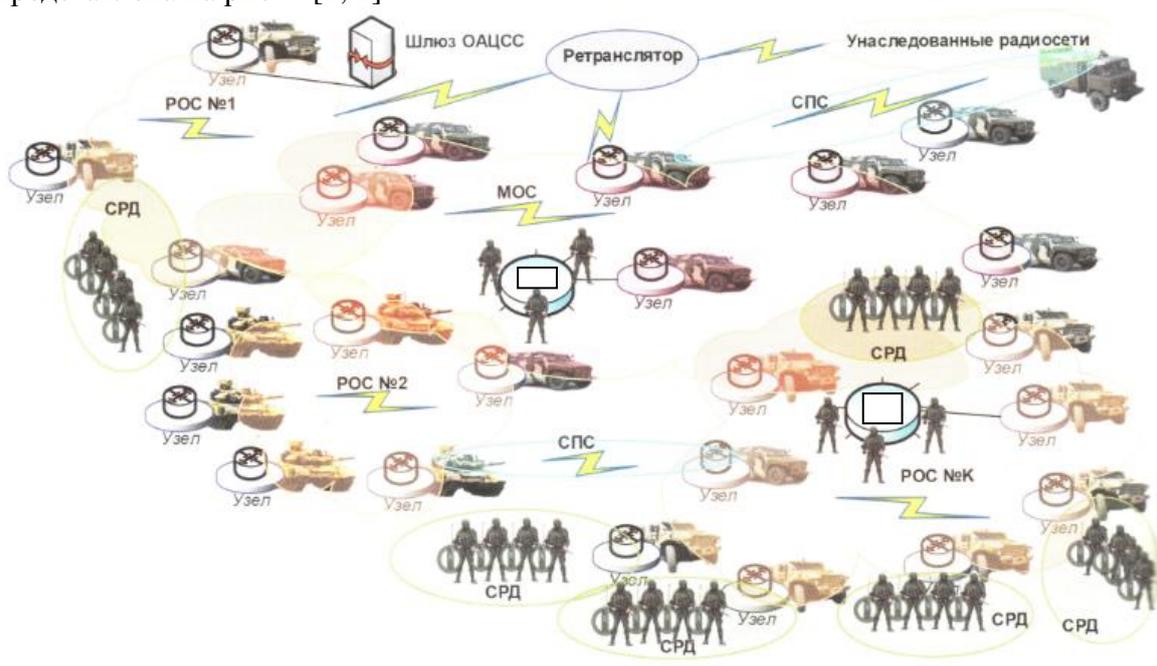


Рис. 1. Архитектура ВСС ПО на базе перспективных радиосредств

Основными элементами архитектуры полевой системы РС ТЗУ являются:

- МА;
- объектовые радиосети, реализуемые посредством распределенных опорных сетей (РОС);
- сети радиодоступа (СРД), состоящие из МА и узлов системы радиодоступа (УСРД);
- транспортная радиосеть, реализуемая посредством магистральной опорной сети (МОС);
- сети прямой связи (СПС);
- шлюз объединенной автоматизированной цифровой сети связи (ОАЦСС) ВС РФ, осуществляющий взаимодействие с морским, космическим и воздушным эшелонам связи ОАЦСС.

При оперативном формировании речевых каналов и поддержании их надежности в условиях указанных воздействий противника требуется знание (нахождение) актуальных параметров установления речевого канала «точка-точка». В качестве таковых могут выступать: количество участков переприема (транзитных участков между УСРД, через которые организуется установление речевого канала «точка-точка») ( $k$ ); количество повторных передач в радиолинии МА–УСРД ( $n_1$ ); количество повторных передач в радиолинии УСРД–УСРД ( $n_2$ ).

Системные процессы установления речевого канала «точка-точка» (соединения) и его восстановления, протекающие в данных ВСС ПО, являются сложными и включают в себя определенные последовательности операций между различными элементами сети. При этом рассматриваемые системные процессы выполняются в соответствии с протоколами тех стандартов, которые являются базовыми для соответствующих сетей ВСС ПО.

Процесс речевого обмена между двумя (и более) МА требует предварительного установления речевого канала «точка-точка» («точка-многоточка»). В свою очередь, процесс установления речевого канала можно разбить на несколько составляющих:

- проключение по СРД от МА-инициатора к обслуживающему его УСРД;
- последовательное проключение по РОС (МОС) УСРД, обслуживающего МА-инициатора, согласно выбранному маршруту по таблице маршрутизации и до УСРД, обслуживающего МА-корреспондента;
- проключение от УСРД, обслуживающего МА-корреспондента, до него самого.

Первая и третья составляющие данного процесса выполняются по модифицированному протоколу установления соединения на базе стандарта TETRA. Вторая составляющая процесса установления речевого канала в ВСС ПО выполняется по модифицированному ATM-протоколу.

В ходе ведения боевых действий УСРД, через которые проключен речевой канал, могут быть уничтожены при огневом поражении (ВТО) или подавлены средствами РЭП противника. В этом случае осуществляется восстановление речевого канала путем его проключения через работоспособные УСРД РОС (МОС) согласно таблицам маршрутизации, при этом на время восстановления речевого канала производится удержание МА-инициатора и МА-корреспондента. Рассмотренные системные процессы составляют основу штатных протоколов установления речевого канала и его восстановления и практически не отличаются от используемых в промышленных образцах перспективных радиосредств [2].

## 2. Постановка задачи и её решение

Имеется архитектура ВСС ПО на базе перспективных радиосредств, состоящая из магистральной опорной сети (МОС), распределенной опорной сети (РОС), сетей радиодоступа (СРД), сети прямых связей (СПС).

Заданы следующие системные параметры:

$N$  – количество МА в СРД;  $N_{усрд}$  – количество УСРД, участвующих в организации СРД;  $T_{k1}$  – длина кадра в СРД в секундах;  $T_{k2}$  – длина кадра в РОС в секундах;  $p_0$  – вероятность ошибочного приема элементарного символа;  $k$  – количество участков переприема (транзитных

участков между УСРД, через которые организуется установление речевого канала «точка-точка»);  $n_1$  – количество повторных передач в радиолинии МА–УСРД;  $n_2$  – количество повторных передач в радиолинии УСРД–УСРД;  $y_1$  – нагрузка, создаваемая одним МА в СРД, Эрл;  $V$  – количество типовых каналов со скоростью 7.2 кбит/с, организуемых УСРД для обслуживания МА;  $\bar{T}_{отк}$  – среднее время между отказами УСРД по причине воздействий противника (величина, обратная интенсивности отказов УСРД по причине воздействий противника).

Необходимо определить:

$$P_{уст.р.к.возд.} = f_1(V, n_1, n_2, k, p_0, N, \bar{T}_{отк}) \quad (1)$$

– вероятность установления речевого канала «точка-точка» с  $n_1$  ( $n_2$ ) повторными передачами запросов и его проклучением через  $k$  УСРД в ВСС ПО;

$$K_{ог.восст.р.к.возд.} = f_2(n_2, k, p_0, \bar{T}_{отк}) \quad (2)$$

– коэффициент оперативной готовности речевого канала «точка-точка» с  $n_2$  повторными передачами запросов и его проклучением через  $k$  УСРД в ВСС ПО.

На базе сформированных выражений (1)–(2) найти:

$$\{V^*, n_1^*, n_2^*, k^*\} = \arg \left\{ P_{уст.р.к.} (t \leq t_{уст.р.к.}^{дон}) \geq P_{уст.р.к.}^{треб} \right\} \cup \max_{\substack{\{V^*, n_1^*, n_2^*, k^*\} \\ n_{пу} N = const, \\ p_0 = const, \\ \bar{T}_{отк} = const}} P_{уст.р.к.} (t \leq t_{уст.р.к.}^{дон}) \quad (3)$$

– кортеж рациональных параметров штатного протокола установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО в условиях РЭП и огневого поражения противником;

$$\{n_2^*, k^*\} = \arg \left\{ K_{восст.р.к.} \geq K_{восст.р.к.}^{треб} \right\} \cup \max_{\substack{\{n_2^*, k^*\} \\ p_0 = const, \\ \bar{T}_{отк} = const}} K_{ог.восст.р.к.} \quad (4)$$

– кортеж рациональных параметров штатного протокола восстановления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО в условиях РЭП и огневого поражения противником.

В рассматриваемом исследовании под рациональными параметрами следует понимать значения параметров  $n_1, n_2, k, V$ , при которых выполняются следующие условия:

$$K_{np} : P_{уст.р.к.} (t_{уст.р.к.} \leq t_{уст.р.к.}^{дон}) \geq P_{уст.р.к.}^{mp} \quad (5)$$

$$K_{ог.р.к.} \geq K_{ог.р.к.}^{mp}$$

где  $P_{уст.р.к.}$ ,  $P_{уст.р.к.}^{mp}$  – расчетное и требуемое значение вероятности установления речевого канала «точка-точка»;  $t_{уст.р.к.}$ ,  $t_{уст.р.к.}^{дон}$  – расчетное и допустимое время установления речевого канала «точка-точка»;  $K_{ог.р.к.}$ ,  $K_{ог.р.к.}^{mp}$  – расчетное и требуемое значение коэффициента оперативной готовности процесса восстановления речевого канала «точка-точка».

Установление речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО осуществляется последовательным проклучением от МА-инициатора к обслуживающему его УСРД<sub>1</sub>, затем до УСРД<sub>2</sub>, который обслуживает МА-корреспондента, и далее проклучением от УСРД<sub>2</sub> до МА-корреспондента. Создание общей модели процесса установления речевого канала в ВСС ПО (РС ТЗУ) между двумя МА можно свести к созданию моделей:

- установления речевого канала между МА-инициатором и УСРД;
- установления речевого канала между УСРД;
- установления речевого канала между УСРД и МА-корреспондентом.

Анализ процесса установления речевого канала «точка-точка» в РС ТЗУ через два УСРД показывает, что в нем можно выделить следующие состояния:

*состояние S<sub>1</sub>* – состояние процесса, в котором МА-инициатор шлет служебное сообщение на УСРД<sub>1</sub> с запросом установления речевого канала;

*состояние*  $S_2$  – УСРД<sub>1</sub> принял служебное сообщение от МА-инициатора; если на УСРД<sub>1</sub> имеется свободный канал для обслуживания МА-инициатора, то УСРД<sub>1</sub> в ответ выделяет канал и пересылает его параметры на МА-инициатор; если возможность выделить канал отсутствует, то на МА-инициатор выдается служебное сообщение «отказ в установлении речевого канала»;

*состояние*  $S_3$  – по истечении тайм-аута повторной передачи ( $\tau_{mn}$ ) МА-инициатор не получил информацию о выделении сигнального канала, осуществляется повторная передача на УСРД<sub>1</sub> служебного сообщения с запросом установления речевого канала «точка-точка»;

*состояние*  $S_4$  – УСРД<sub>1</sub> принял служебное сообщение от МА-инициатора после повторной передачи; если на УСРД<sub>1</sub> имеется свободный канал для обслуживания МА-инициатора, то УСРД<sub>1</sub> в ответ выделяет канал и пересылает его параметры на МА-инициатор; если возможность выделить канал отсутствует, то на МА-инициатор выдается служебное сообщение «отказ в установлении речевого канала»;

*состояние*  $S_5$  – МА-инициатор успешно принял служебное сообщение о выделении канала от УСРД<sub>1</sub> и отправляет на УСРД<sub>1</sub> служебное сообщение о продолжении установления речевого канала «точка-точка»;

*состояние*  $S_6$  – УСРД<sub>1</sub> успешно принял служебное сообщение о продолжении установления речевого канала от МА-инициатора и отправляет на УСРД<sub>2</sub> сообщение о проключении речевого канала с МА-корреспондентом через УСРД<sub>2</sub>;

*состояние*  $S_7$  – УСРД<sub>2</sub> успешно принял служебное сообщение о проключении речевого канала через себя и отправляет на УСРД<sub>1</sub> служебное сообщение с подтверждением установления речевого канала;

*состояние*  $S_8$  – по истечении тайм-аута повторной передачи ( $\tau_{mn}$ ) УСРД<sub>1</sub> не получил информацию о подтверждении установления речевого канала, осуществляется повторная передача на УСРД<sub>2</sub> служебного сообщения о проключении речевого канала с МА-корреспондентом через УСРД<sub>2</sub>;

*состояние*  $S_9$  – УСРД<sub>2</sub> успешно принял служебное сообщение о проключении речевого канала после повторной передачи и отправляет на УСРД<sub>1</sub> служебное сообщение с подтверждением установления речевого канала;

*состояние*  $S_{10}$  – УСРД<sub>1</sub> успешно принял служебное сообщение с подтверждением установления речевого канала и отправляет на УСРД<sub>2</sub> служебное сообщение о продолжении установления речевого канала;

*состояние*  $S_{11}$  – УСРД<sub>2</sub> успешно принял служебное сообщение о продолжении установления речевого канала и отправляет МА-корреспонденту по широкополосному каналу служебное сообщение о его вызове;

*состояние*  $S_{12}$  – МА-корреспондент успешно принял служебное сообщение о вызове и отправляет УСРД<sub>2</sub> служебное сообщение о готовности ведения информационного обмена;

*состояние*  $S_{13}$  – по истечении тайм-аута повторной передачи УСРД<sub>2</sub> не получил от МА-корреспондента служебного сообщения о готовности ведения информационного обмена, осуществляется повторная передача по широкополосному каналу служебного сообщения о вызове МА-корреспондента;

*состояние*  $S_{14}$  – МА-корреспондент успешно принял служебное сообщение о вызове после повторной передачи и отправляет УСРД<sub>2</sub> служебное сообщение о готовности ведения информационного обмена;

*состояние*  $S_{15}$  – УСРД<sub>2</sub> успешно принял служебное сообщение от МА-корреспондента о готовности ведения информационного обмена, установление речевого канала завершено;

*состояние*  $S_{16}$  – состояние «отказ в установлении речевого канала».

Природа исследуемого процесса установления речевого канала такова, что вероятность его перехода из одного состояния в любое другое зависит только от данного состояния и не зависит от того, как процесс в это состояние пришел. Следовательно, анализируемый процесс



Для перехода исследуемого процесса из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2$  нужно, чтобы служебное сообщение с запросом на установление речевого канала от МА-инициатора было правильно принято на УСРД<sub>1</sub>. Для этого необходимо, чтобы от всех МА СРД был передан во временном окне восходящей линии только один запрос на установление речевого канала.

Поток заявок от одного МА в данном случае будем считать простейшим потоком с интенсивностью поступающих вызовов  $\lambda$ , при этом интенсивность обслуживания заявок на информационный обмен УСРД<sub>1</sub> равна  $\mu$ .

Тогда вероятность того, что отдельный (некоторый) МА из всей их совокупности отправит служебное сообщение с запросом установления речевого канала на УСРД<sub>1</sub> в рассматриваемом кадре, равна [4]:

$$P_{MA} = 1 - e^{-\lambda T_k} \quad (7)$$

Следовательно, вероятность того, что запрос на установление речевого канала от МА-инициатора, выдающего свой запрос с вероятностью 1, не столкнется ни с каким другим запросом из  $(N-1)$  МА всей СРД (то есть все  $(N-1)$  МА в этом кадре «молчат»), равна:

$$P_{сл.доот} = C_N^1 P_{MA} (1 - P_{MA})^{N-1} = N P_{MA} (1 - P_{MA})^{N-1} \quad (8)$$

Вероятность правильного приема УСРД служебного сообщения с запросом на установление речевого канала определим с учетом канального кодирования, используемого в рассматриваемой ВСС ПО, где применяется каскадное кодирование: двоичное блочное кодирование с параметрами внешнего кода (140,124,5) и сверточное кодирование с параметрами внутреннего кода  $R=2/3$  и  $d_{free}=7$  [4, 5]. При декодировании принятых пакетов вначале осуществляется сверточное декодирование, а затем над полученной кодовой комбинацией выполняется блочное декодирование [4, 5].

Служебные сообщения состоят из двух пакетов по 216 бит.

Для оценивания вероятности правильного приема воспользуемся «окном декодирования», равным 15 символов. Путем разбиения 432 бит служебного сообщения на последовательности длиной, равной длине окна декодирования, получим 28 последовательностей [5].

Тогда вероятность правильного приема служебного сообщения при сверточном декодировании определяется выражением [4]:

$$P_{np.n.св.к.} = \left( \sum_{i=0}^{d_{free}/2-1} C_{15}^i P_0^i (1 - P_0)^{15-i} \right)^{28} \quad (9)$$

Вероятность ошибки в приеме служебного сообщения равна:

$$P_{ош.нр.н.св.к.} = 1 - P_{np.n.св.к.} \quad (10)$$

Вероятность битовой ошибки при сверточном декодировании определяется выражением:

$$P_{ош.нр.н.св.к.б.} = 1 - \left( \sqrt[216]{1 - P_{ош.нр.н.св.к.}} \right)^2 \quad (11)$$

Отсюда вероятность правильного приема служебного сообщения [5]:

$$P_{np.n.} = \left( \sum_{i=0}^{d_{min}/2-1} C_{140}^i P_{ош.нр.н.св.к.б.}^i (1 - P_{ош.нр.н.св.к.б.})^{140-i} \right)^2 \quad (12)$$

Следовательно, вероятность  $P_{12}$  равна:

$$P_{12} = P_{сл.д.} P_{np.n.} \quad (13)$$

Вероятность  $P_{13}$  в силу стохастичности МПВ равна [3]:

$$P_{13} = 1 - P_{12} \quad (14)$$

Так как в случае неправильного приема или потери пакета от МА-инициатора до УСРД<sub>1</sub> может выполняться повторная его передача, то можно записать:

$$\left. \begin{aligned} P_{12} &= P_{34} \\ P_{13} &= P_{316} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Для перехода исследуемого процесса из состояния  $S_2$  в состояние  $S_5$  необходимо выполнение двух условий: наличие свободных каналов на УСРД<sub>1</sub> и правильный прием МА-инициатором служебного сообщения о выделении канала от УСРД<sub>1</sub>.

Вероятность того, что на УСРД<sub>1</sub> будет достаточно каналов для обслуживания МА-инициатора, примем равной  $Q$ . Из теории телетрафика известно, что величина  $Q$  равна [4]:

$$Q = 1 - P_{отк}, \quad (16)$$

где  $P_{отк}$  – вероятность отказа по причине занятости всех каналов на УСРД<sub>1</sub>, определяемая формулой Энгсета [4]:

$$P_{отк} = \frac{C_N^V y_\Sigma^V}{1 + \sum_{k=1}^V C_N^k y_\Sigma^k}, \quad (17)$$

где  $y_\Sigma = Ny_1$  – общая информационная нагрузка от всех МА;

$V$  – число каналов на УСРД<sub>1</sub>.

Вероятность того, что МА-инициатор правильно примет служебное сообщение о выделении канала, определяется по формуле (12). Тогда вероятность  $p_{25}$  будет равна:

$$p_{25} = QP_{np.n.} \quad (18)$$

Если на УСРД<sub>1</sub> нет возможности для выделения канала МА-инициатору, то УСРД<sub>1</sub> выдает на МА-инициатор служебное сообщение «отказ в установлении речевого канала». Вероятность перехода из состояния  $S_2$  в состояние  $S_{16}$  равна:

$$p_{216} = (1 - Q)P_{np.n.} \quad (19)$$

Тогда вероятность перехода из состояния  $S_2$  в состояние  $S_3$  равна:

$$p_{23} = 1 - (p_{216} + p_{25}). \quad (20)$$

Поскольку в случае неправильного приема или потери служебного сообщения о выделении канала от МА-инициатора до УСРД<sub>1</sub> может выполняться повторная его передача, то можно записать:

$$\left. \begin{aligned} p_{25} &= p_{45} \\ p_{416} &= 1 - p_{45} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Для перехода исследуемого процесса из состояния  $S_5$  в состояние  $S_6$  необходим правильный прием УСРД<sub>1</sub> от МА-инициатора служебного сообщения о продолжении установления речевого канала. Вероятность перехода из состояния  $S_5$  в состояние  $S_6$  равна:

$$p_{56} = P_{np.n.} \quad (22)$$

Вероятность  $p_{516}$  в силу стохастичности МПВ равна:

$$p_{516} = 1 - p_{56}. \quad (23)$$

Для того чтобы исследуемый процесс перешел из состояния  $S_6$  в состояние  $S_7$ , необходим правильный прием УСРД<sub>2</sub> от УСРД<sub>1</sub> служебного сообщения о проключении речевого канала с МА-корреспондентом через УСРД<sub>2</sub>. Вероятность перехода из состояния  $S_6$  в состояние  $S_7$  равна:

$$p_{67} = P_{np.n.} \quad (24)$$

Вероятность  $p_{68}$  в силу стохастичности МПВ равна:

$$p_{68} = 1 - p_{67}. \quad (25)$$

Поскольку в случае неправильного приема или потери служебного сообщения о проключении речевого канала с МА-корреспондентом через УСРД<sub>2</sub> может выполняться повторная его передача, то можно записать:

$$\left. \begin{aligned} p_{67} &= p_{89} \\ p_{68} &= p_{816} \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

Для перехода исследуемого процесса из состояния  $S_7$  в состояние  $S_{10}$  необходим правильный прием УСРД<sub>1</sub> от УСРД<sub>2</sub> служебного сообщения с подтверждением установления речевого канала. Вероятность перехода из состояния  $S_7$  в состояние  $S_{10}$  равна:

$$p_{710} = P_{np.n.} \quad (27)$$

Вероятность  $p_{78}$  в силу стохастичности МПВ равна:

$$p_{78} = 1 - p_{710} \quad (28)$$

Поскольку в случае неправильного приема УСРД<sub>1</sub> от УСРД<sub>2</sub> служебного сообщения с подтверждением установления речевого канала или его потери может выполняться повторная его передача, то можно записать:

$$\left. \begin{aligned} p_{710} &= p_{910} \\ p_{78} &= p_{916} \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

Для перехода исследуемого процесса из состояния  $S_{10}$  в состояние  $S_{11}$  необходим правильный прием УСРД<sub>2</sub> от УСРД<sub>1</sub> служебного сообщения о продолжении установления речевого канала через УСРД<sub>2</sub>. Вероятность перехода из состояния  $S_{10}$  в состояние  $S_{11}$  равна:

$$p_{1011} = P_{np.n.} \quad (30)$$

Вероятность  $p_{1016}$  в силу стохастичности МПВ равна:

$$p_{1016} = 1 - p_{1011} \quad (31)$$

Исследуемый процесс переходит из состояния  $S_{11}$  в состояние  $S_{12}$  в случае правильного приема МА-корреспондентом по широкополосному каналу служебного сообщения о вызове от УСРД<sub>2</sub>. Вероятность перехода из состояния  $S_{11}$  в состояние  $S_{12}$  равна:

$$p_{1112} = P_{np.n.} \quad (32)$$

Тогда вероятность  $p_{1113}$  равна:

$$p_{1113} = 1 - p_{1112} \quad (33)$$

Поскольку в случае неправильного приема МА-корреспондентом от УСРД<sub>2</sub> служебного сообщения о вызове или его потери может выполняться повторная его передача, то можно записать:

$$\left. \begin{aligned} p_{1112} &= p_{1314} \\ p_{1113} &= p_{1316} \end{aligned} \right\}. \quad (34)$$

Для перехода исследуемого процесса из состояния  $S_{12}$  в состояние  $S_{15}$  необходим правильный прием УСРД<sub>2</sub> от МА-корреспондента служебного сообщения о готовности ведения информационного обмена. Вероятность перехода из состояния  $S_{12}$  в состояние  $S_{15}$  равна:

$$p_{1215} = P_{np.n.} \quad (35)$$

Вероятность  $p_{1213}$  в силу стохастичности МПВ равна:

$$p_{1213} = 1 - p_{1215} \quad (36)$$

Поскольку в случае неправильного приема УСРД<sub>2</sub> от МА-корреспондента служебного сообщения о готовности ведения информационного обмена или его потери может выполняться повторная его передача, то можно записать:

$$\left. \begin{aligned} p_{1215} &= p_{1415} \\ p_{1213} &= p_{1416} \end{aligned} \right\}. \quad (37)$$

Таким образом, найдены все переходные вероятности МПВ графа переходов ПКМЦ.

Для определения времени установления речевого канала сформируем матрицу шагов переходов (МШП) [6, 8]. Она имеет вид:

$$T_{[16,16]} = \begin{pmatrix} 0 & \tau_{12} & \tau_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{23} & 0 & \tau_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{216} \\ 0 & 0 & 0 & \tau_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{316} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{416} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{516} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{67} & \tau_{68} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{78} & 0 & \tau_{710} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{89} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{816} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{910} & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{916} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{1011} & 0 & 0 & 0 & \tau_{1016} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{1112} & \tau_{1113} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{1213} & 0 & \tau_{1215} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{1314} & \tau_{1316} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{1415} & \tau_{1416} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{1515} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{1616} \end{pmatrix} \quad (38)$$

Времена переходов определяются через следующие значения [4, 8] :

$$\tau_{12} = T_{k_1} + \tau_{3_1}, \quad (39)$$

$$\tau_{34} = \tau_{25} = \tau_{45} = \tau_{56} = \tau_{1112} = \tau_{1314} = \tau_{1215} = \tau_{1415} = \tau_{12}, \quad (40)$$

$$\tau_{13} = T_{\text{тайм-аута\_СРД}} = 8 \cdot T_{k_1} + \tau_{3_1} + \tau_{p/\text{синхр}}, \quad (41)$$

$$\tau_{316} = \tau_{1113} = \tau_{1316} = T_{\text{тайм-аута\_СРД}}, \quad (42)$$

$$\tau_{23} = \tau_{416} = \tau_{1213} = \tau_{1416} = 7T_{k_1} + \tau_{p/\text{синхр}}, \quad (43)$$

$$\tau_{516} = 8 \cdot T_{k_1} + \tau_{3_1} + \tau_{p/\text{синхр}}, \quad (44)$$

$$\tau_{67} = T_{k_2} + \tau_{3_1}, \quad (45)$$

$$\tau_{89} = \tau_{710} = \tau_{910} = \tau_{1011} = \tau_{56}, \quad (46)$$

$$\tau_{68} = T_{\text{тайм-аута\_РОС(МОС)}} = 8 \cdot T_{k_2} + \tau_{3_2} + \tau_{p/\text{синхр}}, \quad (47)$$

$$\tau_{816} = T_{\text{тайм-аута\_РОС(МОС)}}, \quad (48)$$

$$\tau_{78} = \tau_{916} = 7T_{k_2} + \tau_{p/\text{синхр}}, \quad (49)$$

$$\tau_{1016} = T_{k_1} + \tau_{3_1}, \quad (50)$$

$$\tau_{\tau_1} = \frac{l_1}{c} = \frac{4 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 1.33 \cdot 10^{-5} \text{ с}; \quad \tau_{\tau_2} = \frac{l_2}{c} = \frac{10 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 3.33 \cdot 10^{-5} \text{ с},$$

$$T_{k_1} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad T_{k_2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Здесь  $l_1$  – максимальное расстояние между МА и УСРД в пределах зоны радиодоступа;  $l_2$  – максимальное расстояние между УСРД в пределах РОС (МОС);  $\tau_{p/\text{синхр}} = 233 \text{ мкс}$

Таким образом, зная времена соответствующих переходов между состояниями ПКМЦ, можно определить время, затрачиваемое на установление речевого канала в ВСС ПО (на примере РС ТЗУ) на базе перспективных радиосредств (попадание в состояние  $S_{15}$ ) при указанных системных параметрах.

В ходе рассмотрения графов ПКМЦ, описывающих процесс установления речевого канала «точка-точка» с различным количеством повторных передач запросов в радиолинии МА↔УСРД ( $n_1$ ), количеством повторных передач запросов в радиолинии УСРД↔УСРД ( $n_2$ ) и количеством участков переприема (количеством транзитных участков между УСРД, через которые проключается речевой канал) ( $k$ ), было выявлено, что графы поглощающих конечных марковских цепей, описывающие данный процесс с большим числом  $n_1$ ,  $n_2$  и  $k$ , будут строиться аналогично графам ПКМЦ, описывающим процесс установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО с меньшим числом  $n_1$ ,  $n_2$  и  $k$ . При этом граф процесса установления речевого канала с большими значениями указанных параметров будет включать в себя граф с меньшими значениями  $n_1$ ,  $n_2$  и  $k$ . Следовательно, появляется возможность автоматизированного синтеза ПКМЦ, описывающих исследуемый процесс.

Номера состояний графа и их взаимосвязи отображаются переходными вероятностями, а последние, в свою очередь, определяются своими индексами. Исходя из изложенного, задача нахождения (синтеза) элементов матрицы переходных вероятностей сводится к нахождению соответствующих им индексов и вычислению переходных вероятностей, местоположение которых в МПВ определяется найденными индексами. Из анализа графов ПКМЦ, описывающих процесс установления речевого канала «точка-точка» с различным количеством  $n_1$ ,  $n_2$  и  $k$ , было выявлено, что количество состояний процесса установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО ( $S_c$ ) в зависимости от описанных системных параметров равно:

$$S_c = 7 + 4n_1 + (3 + 2n_2)k. \quad (51)$$

Следовательно, МПВ исследуемого процесса имеет размерность  $S_c \times S_c$ .

При  $k = 1$ ,  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1$  количество состояний процесса установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО  $S_c = 7 + 4 + (3 + 2) \cdot 1 = 16$ , что соответствует количеству состояний графа переходов, изображенного на рис. 2. При этом состояние с номером  $S_c$  для всех вариантов будет определять состояние отказа в установлении речевого канала по истечении  $n_1$  повторных передач в радиолинии МА–УСРД и  $n_2$  повторных передач в радиолинии УСРД–УСРД, а состояние с номером  $S_c - 1$  – состояние успешного установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО (на примере РС ТЗУ). Данные состояния во всех графах будут поглощающими. Введем параметры  $i$  и  $j$  и выразим через них текущие номера состояний  $l$  графа переходов. Параметр  $j$  показывает в графе номер ряда, в котором находится состояние  $S_l$ , а параметр  $i$  пробегает все значения от 0 до  $(n-j)$ . Обобщенный граф переходов ПКМЦ, отображающий процесс установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО, представлен на рис. 3. Структура построения обобщенного графа переходов ПКМЦ аналогична структуре построения графа переходов ПКМЦ, изображенного на рис. 2.

Алгоритм такого синтеза искомой МПВ включает следующие правила (П1–П25):

- П1:  $P_{2i-1, 2i} = P_{сн.д.} P_{np.n.}$ , где  $1 \leq i \leq n_1 + 1$ ;
- П2:  $P_{2i-1, 2i+1} = 1 - P_{2i-1, 2i}$ , где  $1 \leq i \leq n_1$ ;
- П3:  $P_{2i, 2n_1+3} = Q P_{np.n.}$ , где  $1 \leq i \leq n_1 + 1$ ;
- П4:  $P_{2i, S_c} = (1 - Q) P_{np.n.}$ , где  $1 \leq i \leq n_1$ ;
- П5:  $P_{2i, 2i+1} = 1 - P_{2i, 2n_1+3} - P_{2i, S_c}$ , где  $1 \leq i \leq n_1$ ;
- П6:  $P_{2n_1+1, S_c} = 1 - P_{2n_1+1, 2n_2+2}$ ;
- П7:  $P_{2n_1+2, S_c} = 1 - P_{2n_1+2, 2n_2+3}$ ;
- П8:  $P_{2n_1+3, 2n_1+4} = P_{np.n.}$ ;
- П9:  $P_{2n_1+3, S_c} = 1 - P_{2n_1+3, 2n_1+4}$ ;
- П10:  $P_{2n_1+4+2i+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+5+2i+(2n_2+3)(j-1)} = P_{np.n.}$ , где  $0 \leq i \leq n_2$ ,  $1 \leq j \leq k$ ;
- П11:  $P_{2n_1+4+2i+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+6+2i+(2n_2+3)(j-1)} = 1 - P_{2n_1+4+2i+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+5+2i+(2n_2+3)(j-1)}$ , где  $0 \leq i \leq n_2 - 1$ ,  $1 \leq j \leq k$ ;
- П12:  $P_{2n_1+5+2i+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+6+2n_2+(2n_2+3)(j-1)} = P_{np.n.}$ , где  $0 \leq i \leq n_2$ ,  $1 \leq j \leq k$ ;
- П13:  $P_{2n_1+5+2i+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+6+2i+(2n_2+3)(j-1)} = 1 - P_{2n_1+5+2i+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+6+2n_2+(2n_2+3)(j-1)}$ , где  $0 \leq i \leq n_2 - 1$ ,  $1 \leq j \leq k$ ;
- П14:  $P_{2n_1+4+2n_2+(2n_2+3)(j-1), S_c} = 1 - P_{2n_1+4+2n_2+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+5+2n_2+(2n_2+3)(j-1)}$ , где  $1 \leq j \leq k$ ;
- П15:  $P_{2n_1+5+2n_2+(2n_2+3)(j-1), S_c} = 1 - P_{2n_1+5+2n_2+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+6+2n_2+(2n_2+3)(j-1)}$ , где  $1 \leq j \leq k$ ;
- П16:  $P_{2n_1+6+2n_2+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+7+2n_2+(2n_2+3)(j-1)} = P_{np.n.}$ , где  $1 \leq j \leq k$ ;
- П17:  $P_{2n_1+4+2i+(2n_2+3)k, 2n_1+5+2n_2+(2n_2+3)k} = P_{np.n.}$ , где  $0 \leq i \leq n_1$ ;
- П18:  $P_{2n_1+4+2i+(2n_2+3)k, 2n_1+6+2n_2+(2n_2+3)k} = 1 - P_{2n_1+4+2i+(2n_2+3)k, 2n_1+5+2n_2+(2n_2+3)k}$ , где  $0 \leq i \leq n_1 - 1$ ;
- П19:  $P_{2n_1+5+2i+(2n_2+3)k, S_{c-1}} = P_{np.n.}$ , где  $0 \leq i \leq n_1$ ;
- П20:  $P_{2n_1+5+2i+(2n_2+3)k, 2n_1+6+2i+(2n_2+3)k} = 1 - P_{2n_1+5+2i+(2n_2+3)k, S_{c-1}}$ , где  $0 \leq i \leq n_1 - 1$ ;
- П21:  $P_{4n_1+4+(2n_2+3)k, S_c} = 1 - P_{4n_1+4+(2n_2+3)k, 4n_1+5+(2n_2+3)k}$ ;
- П22:  $P_{4n_1+5+(2n_2+3)k, S_c} = 1 - P_{4n_1+5+(2n_2+3)k, S_{c-1}}$ ;
- П23:  $P_{2n_1+6+2n_2+(2n_2+3)(j-1), S_c} = 1 - P_{2n_1+6+2n_2+(2n_2+3)(j-1), 2n_1+7+2n_2+(2n_2+3)(j-1)}$ ,  
где  $1 \leq j \leq k$ ;
- П24:  $P_{S_{c-1}, S_{c-1}} = 1$ ;
- П25:  $P_{S_c, S_c} = 1$ .

Остальные элементы МПВ равны нулю, поскольку отсутствуют связи между данными состояниями в графе ПКМЦ (например, между состояниями  $S_2$  и  $S_4$  графа переходов, изображенного на рис. 2) [6, 8].

Для определения времени, затрачиваемого на установление речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО, сформируем по методу В. А. Цимбала [8] матрицу шагов переходов (МШП). МШП для анализируемого графа строится по аналогичным с МПВ правилам.

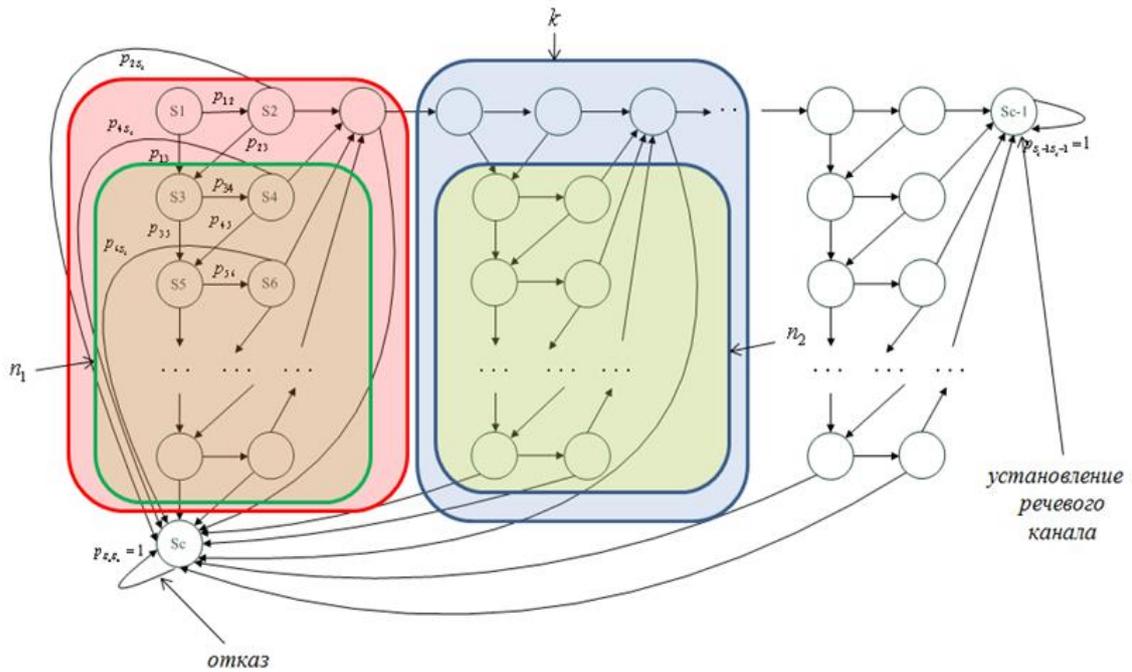


Рис. 3. Обобщенный граф переходов ПКМЦ, отображающий процесс установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО с  $n_1$  ( $n_2$ ) числом повторных передач запросов и проключением через  $(k+1)$  УСРД

Вероятность установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО определяется с помощью уравнения Колмогорова–Чепмена (УКЧ) [6, 8]:

$$P_{s\langle S_c \rangle}^{(l)} = P_{s\langle S_c \rangle}^{(0)} P_{[S_c, S_c]}^{l}, \quad (52)$$

$$P_{s\langle n \rangle}^{(0)} = \langle P_{s_1}^{(0)}, P_{s_2}^{(0)}, \dots, P_{s_i}^{(0)}, \dots, P_{S_{c-1}}^{(0)}, P_{S_c}^{(0)} \rangle, \quad (53)$$

где  $P_{s\langle S_c \rangle}^{(0)}$  – вектор вероятностей состояний ПКМЦ на нулевом шаге;

$P_{s\langle S_c \rangle}^{(l)}$  – вектор вероятностей состояний ПКМЦ соответственно на  $l$ -м шаге, который будет иметь вид:

$$P_{s\langle n \rangle}^{(l)} = \langle P_{s_1}^{(l)}, P_{s_2}^{(l)}, \dots, P_{s_i}^{(l)}, \dots, P_{S_{c-1}}^{(l)}, P_{S_c}^{(l)} \rangle, \quad (54)$$

$0, l$  – номер интервала, называемого шагом переходов, на котором рассматривается поведение процесса;

$P_{[S_c, S_c]}$  – матрица переходных вероятностей.

Для рассматриваемой математической модели процесса установления речевого канала «точка-точка» вероятность установления данного речевого канала будет определяться выражением:

$$P_{уст.р.к.возд.мод.} = P_{S_{c-1}}^{(l)}. \quad (55)$$

С помощью УКЧ можно определить и число шагов перехода для обеспечения заданного уровня вероятности установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО. Однако граф ПКМЦ, описывающий процесс установления речевого канала, имеет множество различных по длительности шагов переходов. Для корректного перехода от числа шагов к реальному времени при анализе ВВХ применяется метод среднего шага переходов [8]. При этом  $\tau_{ij} \neq 0$  означает, что в ПКМЦ возможен переход из  $i$ -го состояния в  $j$ -ое с длительностью (шагом)  $\tau_{ij}$  и ненулевой вероятностью  $p_{ij}$ , а  $\tau_{ij} = \infty$  означает, что в КМЦ невозможен переход из  $i$ -го состояния в  $j$ -ое, так как  $p_{ij} = 0$ .

Для нахождения реального времени установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО по ПКМЦ с разными шагами переходов поступим следующим образом. Введем для каждого состояния рассматриваемой ПКМЦ средний шаг переходов. Согласно [8] он находится как:

$$\bar{\tau}_i = \sum_{j=0}^{S_c} \tau_{ij} p_{ij}, \quad (56)$$

где  $p_{ij}$  и  $\tau_{ij}$  – элементы МПВ и МШП соответственно;  $S_c$  – число состояний графа переходов.

На каждом  $l$ -м шаге процесса установления (восстановления) речевого канала «точка-точка» длительность шага будет своя. Найти ее можно следующим образом [8]:

$$\bar{\tau}_l = \sum_{j=0}^n \tau_i p_i^{(l)}, \quad (57)$$

где  $p_i^{(l)}$  – распределение вероятностей состояния процесса на  $l$ -м шаге.

Тогда общее время процесса установления речевого канала «точка-точка» за  $l$  шагов будет равно [8]:

$$\tau = \sum_{l=1}^w \bar{\tau}_l \quad (58)$$

При этом расчет вероятности установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО в условиях рассматриваемых воздействий будет производиться по следующей формуле [2]:

$$P_{уст.р.к.возд.} = P_{уст.р.к.возд.мод.} \cdot e^{-(k+1)\lambda_{отк} t_{уст.р.к.возд.мод.}}, \quad (59)$$

где  $P_{уст.р.к.возд.}$  – значение финальной вероятности установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО (РС ТЗУ), полученной по математической модели процесса установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО;  $\lambda_{отк} = 1/T_{отк}$  – интенсивность отказа УСРД по причине воздействий противника (величина, обратная среднему времени выхода из строя УСРД по причине влияния рассматриваемых воздействий);  $t_{уст.р.к.возд.}$  – значение времени процесса, при котором достигается финальная вероятность установления речевого канала «точка-точка» (когда прекращается рост вероятности установления речевого канала вне зависимости от количества шагов процесса  $l$ ) в ВСС ПО (РС ТЗУ), полученная по математической модели процесса установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО. Вычисленные значения ВВХ процесса установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО (РС ТЗУ) показывают, что критическое значение  $p_0$ , при котором еще выполняются требования руководящих документов (ОТТ) уменьшается с увеличением  $k$  (т.е. требуется более качественный по вероятности ошибки на элементарный символ канал).

Используя метод наименьших квадратов и среду программирования MATLAB 2016a, определим аналитическое выражение зависимости  $k^{kp}$  (максимальное количество участков переприема, между которыми может быть организован речевой канал) от значений  $p_0$  при обеспечении вероятности установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО не менее требуемой при  $T_{отк} = 15$  мин. На базе метода планирования эксперимента и анализа полиномов различных степеней экспериментально было установлено, что наибольшее сходство имеет выражение, описываемое полиномом четвертой степени, имеющим вид в условиях отсутствия непосредственного контакта с противником:

$$k^{kp}(p_0) = \left[ 1.6759 \cdot 10^8 \cdot p_0^4 - 5.8758 \cdot 10^7 \cdot p_0^3 + 7.7228 \cdot 10^6 \cdot p_0^2 - 4.5142 \cdot 10^5 \cdot p_0 + 9.9155 \cdot 10^3 \right], \quad (60)$$

при  $n_1 = 4, n_2 = 4, 4 \cdot 10^{-2} \leq p_0 \leq 7 \cdot 10^{-2}$ .

Зависимость  $k^{kp}$  от  $p_0$  в условиях рассматриваемых воздействий противника имеет вид:

$$k^{kp}(p_0) = \left[ 1.561 \cdot 10^8 \cdot p_0^4 - 5.5031 \cdot 10^7 \cdot p_0^3 + 7.2741 \cdot 10^6 \cdot p_0^2 - 4.2772 \cdot 10^5 \cdot p_0 + 9.4486 \cdot 10^3 \right], \quad (61)$$

при  $n_1 = 4, n_2 = 4, 3 \cdot 10^{-2} \leq p_0 \leq 5 \cdot 10^{-2}$ .

где  $[ ]$  – операция округления числа в меньшую сторону.

Данные зависимости позволяют определить значение  $k^{kp}$  транзитных участков переприема (количество УСРД, через которые проключается речевой канал), обеспечивающих веро-

ятность установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО не ниже заданной. Полученные выражения (60), (61) необходимо закладывать в программное обеспечение УСРД в качестве основы штатного протокола установления речевого канала «точка-точка», и оно должно быть использовано при формировании маршрута проключения УСРД в ходе установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО (РС ТЗУ).

Для оценивания надежности определим коэффициент оперативной готовности по следующей формуле:

$$K_{ог.восст.р.к.возд.} = \frac{T_{и.о.}/(k+1)}{T_{и.о.}/(k+1) + t_{уст.р.к.возд.мод}} \cdot e^{-(k+1)\lambda_{омк}t_{уст.р.к.возд.мод}} \cdot P_{уст.р.к.возд.}, \quad (62)$$

где  $T_{и.о.}$  – время информационного обмена между МА, равное 3 мин.

Из анализа вычисленных значений  $K_{ог.восст.р.к.возд.}$  определены граничные значения  $p_0$  и  $k$ , при которых  $K_{ог.восст.р.к.возд.} = 0.75$ .

На стадии разработки оборудования УСРД и УКО ВСС ПО (РС ТЗУ), используя разработанные математические модели, для всей совокупности исходных данных с требуемой точностью формируется база данных (БД) по ВВХ (для процесса установления речевого канала «точка-точка») и КОГ (для процесса восстановления речевого канала «точка-точка» в случае деградации радиосети), а также вносятся в программное обеспечение полученные формулы (60)–(62). В ходе функционирования рассматриваемой радиосети по радиолиниям УСРД–УСРД и МА–УСРД осуществляется передача тестовой информации. По искажениям принятой данной тестовой информации осуществляется определение параметра  $p_0$  в соответствующих радиолиниях, полученные значения  $p_0$  передаются служебными сообщениями на управляющее коммутационное оборудование (УКО). При необходимости установления (восстановления) речевого канала «точка-точка» УСРД, используя полученные характеристики каналов ( $p_0$ ), известные системные параметры, а также требования руководящих документов по оперативности и надежности, производит запрос рациональных параметров штатного протокола установления (восстановления) речевого канала «точка-точка» для текущих исходных данных в систему управления базой данных (СУБД), располагаемой в каждом УСРД. В СУБД осуществляется поиск рациональных параметров установления (восстановления) речевого канала «точка-точка», после чего СУБД выдает их на УСРД. Далее параметры  $n_2$ ,  $k$  и  $V$  вводятся в виде исходных данных в программное обеспечение УСРД, а параметр  $n_1$  передается МА и вводится в виде исходных данных в свое программное обеспечение. Обязательным условием при этом является наличие сведений о качестве каналов связи по вероятности ошибки в приеме элементарного символа, требований, предъявляемых к установлению (восстановлению) речевого канала (соединения) в системах передачи речевой информации. Работоспособность данного подхода была проверена в ходе расчетов вероятности установления соединения речевого канала «точка-точка» и коэффициента оперативной готовности речевого канала «точка-точка» в сети связи максимального масштаба (в масштабе отдельной мотострелковой бригады) в рабочем диапазоне исходных данных.

В качестве таковых использовались:

$k$  – количество транзитных участков переприема (число УСРД);

$n_1$  – количество повторных передач запросов в СРД;

$n_2$  – количество повторных передач запросов в РОС (МОС).

Результаты расчетов по разработанным математическим моделям представлены на рис. 3, 4 в виде графиков зависимости значений  $n_1$  ( $n_2$ ) от  $p_0$  и  $k$ . Из данных графиков следует, что полученные результаты являются вполне приемлемыми по условиям физической реализуемости процессов установления и восстановления речевого канала «точка-точка».

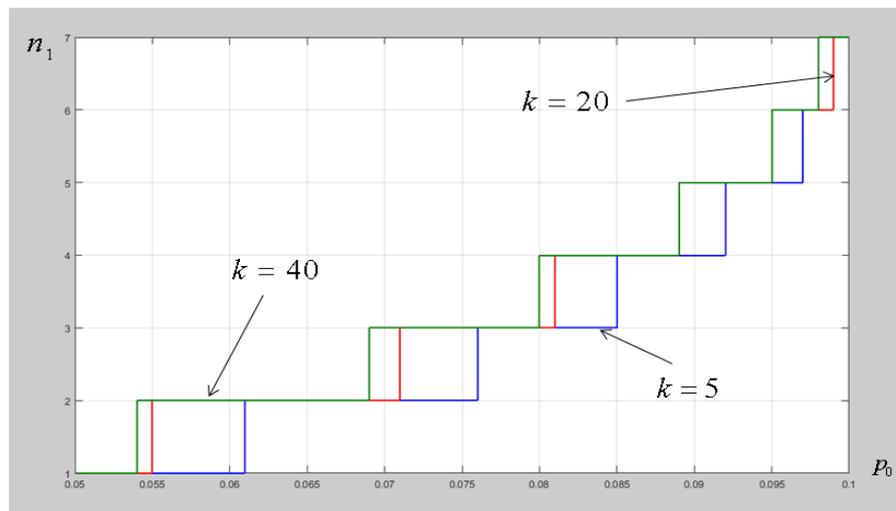


Рис. 3. График зависимости значений повторных передач запросов  $n_1$  от  $p_0$  и  $k$ , полученный по результатам расчетов по разработанной математической модели процесса установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО (РС ТЗУ)

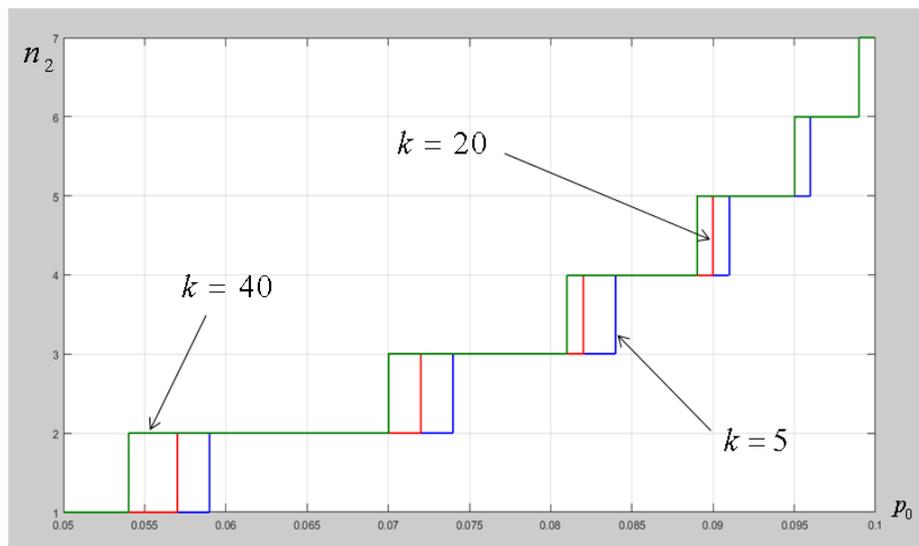


Рис. 4. График зависимости значений повторных передач запросов  $n_2$  от  $p_0$  и  $k$ , полученный по результатам расчетов по разработанной математической модели процесса восстановления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО (РС ТЗУ)

## Заключение

Применение полученных математических моделей позволяет определить границы применимости штатного протокола установления речевого канала «точка-точка» и его восстановления по вероятности ошибочного приема символа кода на входе внутреннего декодера, обеспечивающие допустимое значение ВВХ (вероятности установления и восстановления речевых каналов «точка-точка») исследуемых процессов в зависимости от числа транзитных участков (числа ретрансляторов-узлов системы радиодоступа). При этом при вероятности ошибочного приема символа кода на входе внутреннего декодера более  $6.8 \cdot 10^{-2}$  требования ОТГ по оперативности не выполняются для максимального количества транзитных участков переприема  $k > 40$ .

Найдена граница по числу транзитных участков, используемых в одном речевом канале «точка-точка», обеспечивающих заданную оперативность при его установлении и требуемую надежность при восстановлении в условиях РЭП и огневого поражения противником. Данная граница составляет не более 40 УСРД.

Определено количество повторных передач запросов в сети радиодоступа, распределенных и магистральных опорных сетях. Данные значения находятся в диапазоне от 1 до 7 повторов. Использование большего количества повторных передач является нецелесообразным, поскольку при количестве повторных передач запросов в данных сетях более 7 вероятность установления речевого канала «точка-точка» и вероятность его восстановления практически не увеличиваются. Кроме того, определены зависимости количества повторных передач запросов от текущих значений вероятности ошибочного приема символа кода на входе внутреннего декодера  $p_0$  и количества транзитных участков переприема (число УСРД)  $k$ .

Применение разработанного подхода позволяет обеспечить заданную оперативность установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО (РС ТЗУ) и требуемую надежность его восстановления в случае, если доступное число участков переприемов (число УСРД)  $k$  не превысит критического значения, которое вычислено по формулам (60)–(62). В случае невыполнения данного условия максимизируется вероятность установления речевого канала «точка-точка» (для процесса установления речевого канала «точка-точка» в ВСС ПО (РС ТЗУ)) и коэффициент оперативной готовности речевого канала «точка-точка» (для процесса его восстановления) путем определения рациональных значений параметров  $V$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $k$  (для процесса установления речевого канала «точка-точка») или значений параметров  $n_2$ ,  $k$  (для процесса его восстановления) при текущем значении параметра  $p_0$ .

## Литература

1. *Борисов В. И. и др.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом ППРЧ. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.
2. *Васильченко А. А., Бережной А. А., Коптелов Г. А.* Оценивание оперативности восстановления голосового соединения типа «точка-точка» в радиосети тактического звена управления в условиях воздействия // Тр. XXXIII ВНТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем», Серпухов. 2016. Ч. 5. С. 259–268.
3. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей: учебник для студентов вузов. 10 изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 576 с.
4. *Вишневский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В.* Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
5. *Золотарев В. В., Овечкин Г. В.* Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справочник / под ред. чл.-кор. РАН Ю. Б. Зубарева. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 126 с.
6. *Кемени Джон Дж., Снелл Дж. Ларк.* Конечные цепи Маркова / пер. с англ. М.: Наука, 1970. 272 с.
7. *Кузнецов В. И.* Радиосвязь в условиях радиоэлектронной борьбы. Воронеж: ВНИИС, 2002. 403 с.
8. *Цимбал В. А.* Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: монография. М.: Вузовская книга, 2014. 144 с.

*Статья поступила в редакцию 01.12.2016;  
переработанный вариант – 13.04.2018.*

**Васильченко Алексей Алексеевич**

к.т.н., преподаватель, филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого (142210, Серпухов, ул. Бригадная, 17), e-mail: alexsvi88@rambler.ru.

**Rational parameters definition of operative organization system processes and maintenance of "point-to-point" speech channel in a military communication system with mobile objects on the basis of perspective radio means**

**A. A. Vasilchenko**

The article presents an approach to the determination of rational parameters of establishing a "point-to-point" voice channel with a given efficiency and its restoration with the required reliability in a military communication system with mobile objects based on advanced radio facilities in conditions of electronic suppression and fire destruction of the enemy.

*Keywords:* efficiency, reliability, radio access system, distributed basic network, main basic network, radio-electronic suppression, fire destruction, speech channel, communication system with mobile objects, radio access network, mobile subscriber, Markov chain.