

УДК 621.391.037.3

А.В. Неижмак

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛЬНЫХ ПАКЕТОВ

Неижмак Алексей Владимирович, окончил Военную академию связи им. С.М. Буденного, адъюнкт ВАС. Имеет статьи в области помехоустойчивого кодирования. [e-mail: a.v.neizhmak@mail.ru].

Аннотация

В данной статье приведено формальное описание алгоритма (процесса) однонаправленной передачи информации в линии радиосвязи с её квитируванием по обратной связи (однонаправленный полудуплекс). Оно не нарушает общность рассмотрения, так как процесс одновременной встречной передачи информации в радиолинии (дуплекс) сводится к независимому описанию двух взаимонезависимых процессов однонаправленной передачи. Также приводится описание алгоритма функционирования системы повышения достоверности с использованием контрольных пакетов в терминах марковских (полумарковских) процессов и теории стохастического управления без учета воздействия радиоэлектронного подавления. Для этого были сформулированы и описаны рабочие состояния вызывающего и отвечающего абонентов и определен перечень потенциальных, разрешенных и редуцированных состояний. С целью пояснения принципов построения модели была рассмотрена радиолиния, функционирующая без учета влияния системы радиоэлектронного подавления.

Ключевые слова: система повышения достоверности, квитанция, контрольные пакеты, алгоритм, граф переходных состояний случайного процесса, вызывающий абонент, отвечающий абонент.

THE MODEL FOR THE OPERATION OF A RELIABILITY ENHANCEMENT SYSTEM USING CONTROL PACKAGES

Aleksei Vladimirovich Neizhmak, graduated from the Marshal Budjonny Military Academy of Signal Corps; Postgraduate Student in the Military Academy of Communications; an author of articles in the field of noise-immune coding. e-mail: a.v.neizhmak@mail.ru.

Abstract

The article deals with a formal description of the algorithm (process) of unidirectional transmission of information in a radio link with its feedback (unidirectional half-duplex). It does not violate the generality of the examination, since the process of simultaneous counterpropagating information in a radio link (duplex) is reduced to an independent description of two mutually independent unidirectional transmission processes. A description of the algorithm for the operation of a reliability enhancement system using control packages in terms of Markovian (semi-Markov) processes and the theory of stochastic control without considering the effect of electronic suppression are also given. For this purpose, the working states of the calling and answering subscribers were formulated and described, and a list of potential, allowed and reduced states was defined. For the purpose of explaining the principles of constructing the model, a radio link that functioned without taking into account the influence of the electronic suppression system was considered.

Key words: reliability enhancement system, receipt, control packages, algorithm, transition state graph of a random process, calling subscriber, answering subscriber.

ВВЕДЕНИЕ

Системы повышения достоверности информации – это комплекс мероприятий по обнаружению и исправлению ошибок, возникающих при передаче информации по каналам связи в сетях передачи данных. В сетях передачи данных специального назначения к системе повышения достоверности предъявляются дополнительные требования, которые обусловлены воздействием противника на систему передачи данных.

При передаче данных по каналам связи всегда возникают ошибки. Причины их могут быть самые различные, но результат оказывается один – данные искажаются и не могут быть использованы на приемной стороне для дальнейшей обработки.

Одним из предполагаемых вариантов повышения достоверности с минимальным влиянием на скорость передачи данных может стать разработка алгоритма функционирования системы повышения достоверности с использованием контрольных пакетов.

ОПЕРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИНИИ РАДИОСВЯЗИ КВ-ДИАПАЗОНА И СТАНЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ (РЭП) ВЕРОЯТНОГО ПРОТИВНИКА

Рассмотрим линию радиосвязи, которая работает в условиях воздействия средств электронного подавления в качестве объекта управления, находящегося под влиянием управляющих субъектов, к которым относятся система управления средствами РЭП и система управления радиолинией [1].

Взаимодействие станции РЭП вероятного противника и линии радиосвязи представим в виде операторного графа функционального взаимодействия станции РЭП и линии радиосвязи (рис. 1).

При множестве возможных состояний S радиолиния в каждый момент времени t находится в одном из состояний $s(t)$, которое характеризуется значением показателя эффективности $q(t)$ (quality). Его физическая сущность должна быть заранее обоснована, а расчетные соотношения для его численного определения заранее установлены $Q: s(t) \rightarrow q(t)$. Состояния объекта могут изменяться как в результате воздействий от системы принятия решений на управление (СПРУ) радиолинией, так и от системы принятия решений на подавление (СПРП), являющейся составной частью станции РЭП [2].

Во время работы СПРУ может изменять технические характеристики радиолинии: скорость передачи, кодирование, рабочие частоты, модуляцию, скважность передачи и другое, тем самым обеспечивая стратегию функционирования линии радиосвязи. В свою очередь, СПРП в процессе работы может изменять рабочие частоты, скважность воздействия помехи, форму помехового сигнала и прочее, реализуя при этом стратегию постановки помех. Степени свободы выбора стратегий СПРУ и СПРП имеют ограничения, оговариваемые заранее специальным образом [3].

Решения СПРУ принимаются на основе наблюдений, получаемых из канала наблюдения (КН), и далее реализуются через канал управления (КУ). Данные каналы характеризуются временами задержки в них наблюдаемых состояний, а также операторами преобразования входных состояний в выходные. Так канал наблюдения характеризуется оператором преобразования текущего состояния объекта управления в наблюдение на входе СПРУ, то есть КН: $s(t) \rightarrow sm(t)$ (state to management). Текущее решение СПРУ обозначено на рисунке 1 как $m(t)$, доставленное решение на управление КУ – $dm(t)$ (delivering management) [4].

Решения СПРП принимаются исходя из наблюдений, получаемых из канала разведки (КР), и реализуются

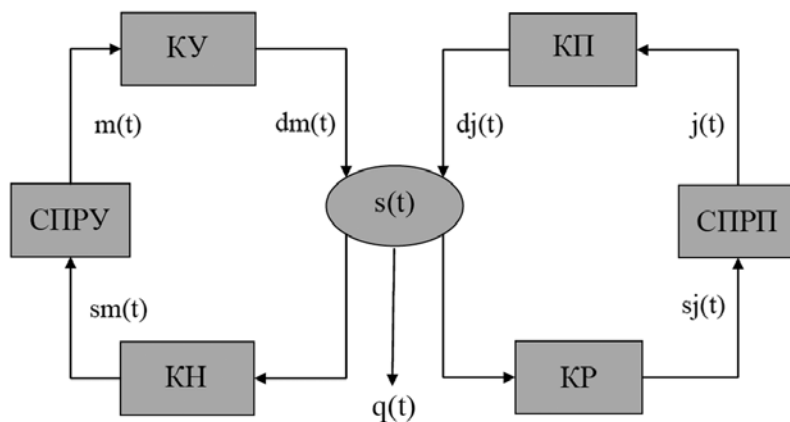


Рис. 1. Граф функционального взаимодействия станции РЭП и линии радиосвязи (операторный граф)

через канал подавления (КП). Указанные каналы характеризуются временами задержки в них наблюдаемых состояний и операторами преобразования входных состояний в выходные. Так канал разведки характеризуется оператором преобразования текущего состояния объекта управления в наблюдение на входе СПРП, то есть КР: $s(t) \rightarrow sj(t)$ (state to jammer). Текущее решение СПРП обозначено на рисунке 1 как $j(t)$, доставленное решение на подавление КУ: $m(t) \rightarrow dm(t)$ (delivering jamming).

Показатель эффективности [5]:

$$\bar{Q}(\alpha, \beta, \gamma) = \int_0^T Q(t, \alpha, \beta, \gamma) dt,$$

где T – время функционирования радиолинии, α, β – векторы параметров, определяющих стратегии радиолинии и станции РЭП, соответственно, γ – вектор параметров, описывающий структуру рассматриваемой системы связи.

Задача анализа – найти верхнюю границу эффективности:

$$\hat{Q}(\gamma) = \max_{\alpha} \min_{\beta} \int_0^T Q(t, \alpha, \beta, \gamma) dt.$$

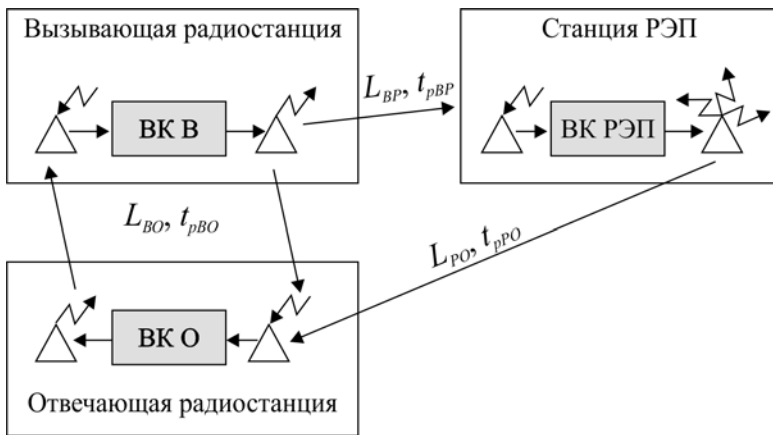
Задача синтеза – определить:

$$(\hat{\alpha}(\gamma), \hat{\beta}(\gamma)) = \arg \max_{\alpha} \min_{\beta} \int_0^T Q(t, \alpha, \beta, \gamma) dt.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОЛИНИИ И СТАНЦИИ РЭП

С целью уточнения и внесения конкретизации описываемой модели рассмотрим топологическую схему взаимодействия радиолинии и станции РЭП (рис. 2) [6].

Граничные значения указанных параметров для систем КВ-радиосвязи представлены в таблице 1.



В схеме использованы следующие обозначения:

ВК В, ВК О, ВК РЭП – вычислительные комплексы вызывающей радиостанции, отвечающей радиостанции и станции РЭП, соответственно;

L_{BO} , L_{BP} , L_{PO} – расстояния между вызывающей и отвечающей радиостанциями, вызывающей радиостанцией и станцией РЭП, станцией РЭП и отвечающей радиостанцией, соответственно;

t_{pBO} , t_{pBP} , t_{pPO} – времена распространения сигнала между парами абонентов, аналогично предыдущему обозначению.

Рис. 2. Топологическая схема взаимодействия радиолинии и станции РЭП

Таблица 1

Граничные значения дистанций радиосвязи и времен распространения сигналов

Параметры	min	max
L_{BO} , км	300	3000
t_{pBO} , мс	1	10
L_{BP}	500	5000
t_{pBP}	1,6	16
L_{PO}	500	5000
t_{pPO}	1,6	16

На основании данных таблицы 1, структуры составных частей рассматриваемой модели уточним её содержание. На рисунке 3 представлена уточненная

функциональная схема взаимодействия линии радиосвязи и станции РЭП [7].

На рисунке 3 жирными линиями отмечены радиоканалы, передача информации в которых связана со значительными временными задержками. Простыми линиями отмечены каналы передачи информации в аппаратуре станций радиосвязи и РЭП. В схеме применяются следующие обозначения:

УМ – усилитель мощности;

М – модулятор;

ПРМ В, ПРМ О, ПРМ РЭП – приемники вызывающей, отвечающей радиостанций и станции РЭП соответственно;

ПРД В, ПРД О, ПРД РЭП – передатчики вызывающей, отвечающей радиостанций и станции РЭП соответственно.

Приведенная на рисунке 3 схема позволяет составить временную диаграмму процесса взаимодействия линии радиосвязи и станции РЭП, которая представлена на рисунке 4.

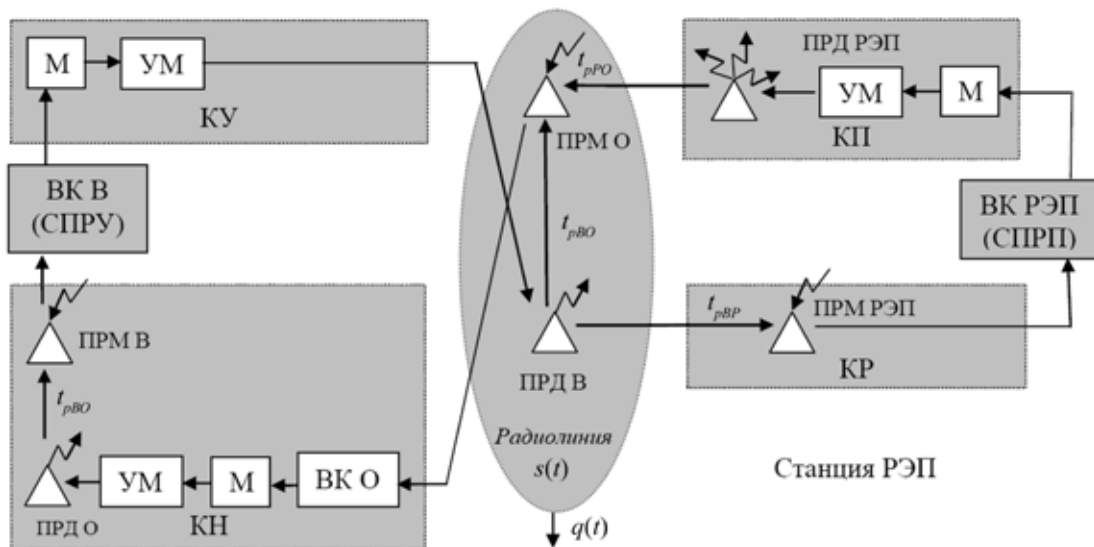


Рис. 3. Уточненная функциональная схема взаимодействия линии радиосвязи и станции РЭП

На рисунке 4 используются следующие новые обозначения:

$t_{нак}$ – время передачи пакета (кодограммы);

$t_{фк}$ – время формирования квитанции отвечающей станцией;

$t_{кв}$ – время передачи квитанции;

$t_{ан}$ – время анализа принятого сигнала станцией РЭП;

$t_{пр}$ – время принятия решения на выбор режима подавления радиолинии станцией РЭП;

$t_{прВ}$ – время принятия решения на выбор режима функционирования радиолинии ВК вызывающей станции;

$t_{фс}$ – время формирования сигнала станцией РЭП;

$t_{вклУМ}$ – время переключения режима функционирования УМ (в том числе включения);

$t_{рЭП}$ – длительность интервала воздействия сформированной помехи;

$t_{врЭП}$ – длительность интервала столкновения принимаемого пакета и сформированной помехи [3].

Таким образом, циклы управления игроками в рассматриваемой модели характеризуются следующими временами задержек:

$$t_{КР} = t_{рВР} + t_{ан}, t_{СПРП} = t_{пр} + t_{фс}, t_{КП} = t_{вклУМ} + t_{рРО},$$

$$t_{КН} = 2t_{рВО} + t_{фк} + t_{вклУМ} + t_{кв}, t_{СПРУ} = t_{прВ},$$

$$t_{КУ} = t_{вклУМ} + t_{нак}^2$$

где $t_{КР}$ – время задержки в КР,

$t_{СПРП}$ – время задержки в СПРП,

$t_{КП}$ – время задержки в КП,

$t_{КН}$ – время задержки в КН,

$t_{СПРУ}$ – время задержки в СПРУ,

$t_{КУ}$ – время задержки в КУ.

Время цикла управления станции РЭП равно

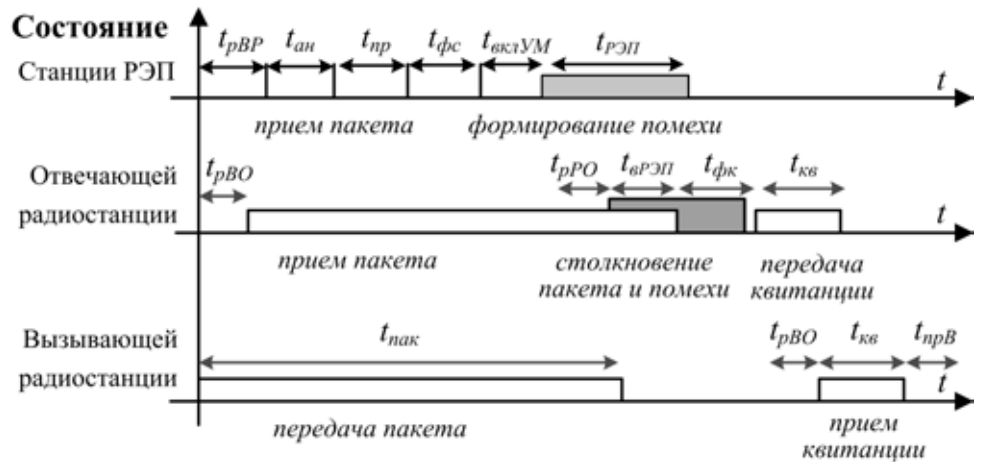


Рис. 4. Временная диаграмма процесса взаимодействия линии радиосвязи и станции РЭП

$$t_{рЭП} = t_{КР} + t_{СПРП} + t_{КП} = t_{рВР} + t_{ан} + t_{пр} + t_{фс} + t_{вклУМ} + t_{рРО}$$

Время цикла управления радиолинии определяется как

$$t_{рЛ} = t_{КН} + t_{СПРУ} + t_{КУ} = 2t_{рВО} + t_{фк} + t_{вклУМ} + t_{кв} + t_{прВ} + t_{вклУМ} + t_{нак}$$

Диапазоны значений составляющих циклов управления приведены в таблице 2.

Данные таблицы 2 указывают на основные направления совершенствования систем радиосвязи и РЭП. Для систем радиосвязи это:

- уменьшение времени работы в одном режиме (быстрое переключение режимов работы),
- использование УМ с минимальным временем переключения режимов,
- уменьшение размеров передаваемых пакетов,
- повышение разведзащищенности радиолинии (уменьшение мощности передатчика при сохранении требуемых скоростей передачи).

Для систем РЭП это:

- использование ВК с максимальной производительностью, обеспечивающих минимальное время анализа обстановки,
- использование УМ с минимальным временем переключения режимов,
- обеспечение высокой мощности передатчика [1].

Таблица 2

Диапазоны значений составляющих циклов управления для радиолинии КВ-диапазона

	$t_{рЭП}$	$t_{КР}$	$t_{рВР}$	$t_{ан}$	$t_{СПРП}$	$t_{пр}$	$t_{фс}$	$t_{КП}$	$t_{вклУМ}$	$t_{рРО}$
min, мс	48,2	11,6	1,6	10	0	0	0	36,6	35	1,6
max, мс	342	116	16	100	110	10	100	116	100	16
	$t_{рЛ}$	$t_{КН}$	$t_{рВО}$	$t_{фк}$	$t_{вклУМ}$	$t_{кв}$	$t_{СПРУ}$	$t_{КУ}$	$t_{вклУМ}$	$t_{нак}$
min, мс	21	11	1	0	0	10	0	10	0	10
max, мс	521	211	10	1	100	100	10	300	100	200

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ КОНТРОЛЛЕРА СИСТЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ (СПД) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛЬНЫХ ПАКЕТОВ ДЛЯ ВЫЗЫВАЮЩЕГО АБОНЕНТА (ВА) В ТЕРМИНАХ МАРКОВСКИХ (ПОЛУМАРКОВСКИХ) ЦЕПЕЙ

ВА может находиться в одном из шести состояний:

1. Состояние 1 – «Ожидание». При включении контроллер переходит в это состояние. С вероятностью $1 - P_m$ контроллер в следующий момент времени остаётся в этом состоянии, с вероятностью P_m он переходит в состояние 2.

2. Состояние 2 – «Определение содержания кольцевого буфера».

2.1.1 Контроллер формирует содержание канальных блоков (информационных или контрольных пакетов), записываемых в кольцевой буфер:

- записывает пришедшее сообщение в буферное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ),
- блокирует запись со стороны абонента в ОЗУ следующего сообщения,
- разбивает сообщение на информационные пакеты (блоки),
- вычисляет контрольные пакеты,
- вычисляет для них контрольные суммы,
- реализует битстаффинг,
- подставляет начальный и конечный флаги для цикловой синхронизации,
- формирует очередь канальных блоков на запись в кольцевой буфер.

Оптимизируемые параметры – длина канального блока, количество блоков в горизонтальном слое, количество блоков в вертикальном слое, дисциплина постановки в очередь к кольцевому буферу информационных и контрольных пакетов.

2.1.2 Контроллер изменяет содержимое кольцевого буфера:

- при наличии в нем свободных ячеек записывает информационные пакеты,
- при наличии запроса от отвечающего абонента (ОА) и наличии свободных ячеек записывает контрольные пакеты,
- при наличии квитанции от приемника ВА стирает ячейки.

При записи канальных блоков в кольцевой буфер им присваиваются циклические номера.

Оптимизируемые параметры – размер кольцевого буфера.

При очистке всех ячеек кольцевого буфера система переходит в Состояние 1 – «Ожидание». В противном случае система переходит в Состояние 3 – «Передача».

3. Состояние 3 – «Передача» последовательная передача канальных блоков, находящихся в кольцевом буфере.

По окончании передачи канального блока система может перейти в Состояние 2 – «Определение содержа-

ния кольцевого буфера» в случае передачи очередного канального блока из кольцевого буфера,

Состояние 4 – «Подтверждение передачи канального блока»

Состояние 5 – «Прием запроса передачи контрольных пакетов».

Состояние 6 – «Прием запроса повторной передачи информационных пакетов».

4. Состояние 4 – «Подтверждение передачи канального блока». Проходное состояние. Переход в Состояние 2 – «Определение содержания кольцевого буфера» для стирания канального блока из кольцевого буфера.

5. Состояние 5 – «Прием запроса передачи контрольных пакетов». Проходное состояние. Переход в Состояние 2 – «Определение содержания кольцевого буфера» для добавления в очередь к кольцевому буферу контрольного пакета.

6. Состояние 6 – «Прием запроса повторной передачи информационных пакетов». Проходное состояние. Переход в состояние 2 – «Определение содержания кольцевого буфера» для повторной отправки определенного, ранее записанного в кольцевой буфер имеющегося информационного пакета.

На рисунке 5 приведен граф переходов марковского (полумарковского) процесса функционирования контроллера СПД ВА [4].

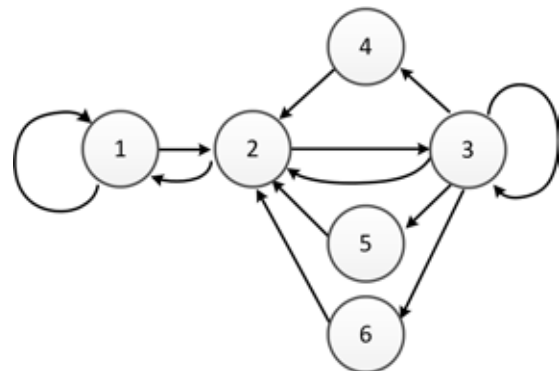


Рис. 5. Граф переходов марковского (полумарковского) процесса функционирования контроллера СПД ВА

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ КОНТРОЛЛЕРА СПД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛЬНЫХ ПАКЕТОВ ДЛЯ ОА В ТЕРМИНАХ МАРКОВСКИХ (ПОЛУМАРКОВСКИХ) ЦЕПЕЙ

На рисунке 6 представлен граф переходов марковского (полумарковского) процесса функционирования контроллера СПД ОА.

ОА может находиться в одном из пяти состояний:

1. Состояние 1 – «Ожидание». При включении контроллер переходит в это состояние. С вероятностью $1 - P_m$ контроллер в следующий момент времени остаётся в этом состоянии, с вероятностью P_m он переходит в состояние 2.

2. Состояние 2 – «Прием канальных блоков из канала связи». Проходное состояние. Переход в состояние 3 – «Подтверждение приема канальных блоков»

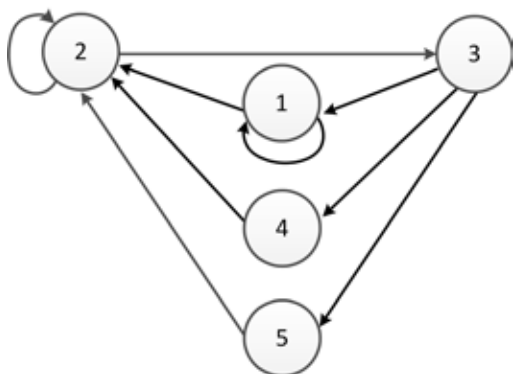


Рис. 6. Граф переходов марковского (полумарковско-го) процесса функционирования контроллера СПД ОА

для формирования квитанции об успешном приеме канальных блоков.

3. Состояние 3 – «Подтверждение приема канальных блоков». По результатам перехода в состояние 3 система может перейти в

- Состояние 1 – «Ожидание» для ожидания приема следующей серии канальных блоков,
- Состояние 4 – «Запрос отправки контрольных пакетов»,
- Состояние 5 – «Запрос повторной отправки информационных пакетов».

4. Состояние 4 – «Запрос отправки контрольных пакетов». Проходное состояние. Переход в состояние 2 – «Прием канальных блоков из канала связи» для приема сформированных контрольных пакетов 1 и (или) 2 типа от контроллера СПД ВА.

5. Состояние 5 – «Запрос отправки информационных пакетов». Проходное состояние. Переход в состояние 2 – «Прием канальных блоков из канала связи» для приема конкретно запрошенного информационного пакета [5].

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ РАССМАТРИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ В ТЕРМИНАХ ТЕОРИИ СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗ УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ РЭП

Рассматриваемая система относится к классу стохастических [2]. Для оценки эффективности функционирования таких систем и синтеза в них динамического или статического управлений корректно использовать аппарат теории случайных процессов. Наиболее общее описание систем дает аппарат теории полумарковских процессов (ПМП). Он позволяет получить точные модели систем при использовании небольшого числа состояний, в то время как более развитый аппарат марковских процессов (МП) для увеличения точности (обеспечения адекватности) представления требует увеличения числа состояний в экспоненциальной прогрессии. Поэтому для общего описания системы будем использовать аппарат ПМП в непрерывном времени, где времена пребывания процесса в состояниях будем определять в соответствии с данными таблиц 2 и рисунка 3. Для частных моделей может оказаться обоснованным и корректным вырождение ПМП в МП. В этом случае функционирование системы будем рассматривать в дискретном времени. Для упрощения модели длительность одного состояния будем полагать равной времени, необходимому для успешной/неуспешной передачи информационного пакета/квитанции между радиостанциями.

Для пояснения принципов построения модели рассмотрим радиолинию, функционирующую без учета влияния системы РЭП. В неё входят два объекта – ВА и ОА. Каждый объект потенциально может находиться в одном из пяти состояний, поэтому потенциальное количество состояний $6 \times 5 = 30$. Однако некоторые из этих состояний принципиально невозможны [6].

Определим множество возможных (разрешенных) состояний. Перечень потенциальных и возможных состояний радиолинии приведен в таблице 3.

Данные таблицы 3 позволяют построить граф переходных состояний случайного процесса, приведенный на рисунке 7.

Таблица 3

Перечень потенциальных, разрешенных и редуцированных состояний

№ потенциального состояния	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ВА	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6
ОА	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Признак разрешенного состояния	+	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+
№ разрешенного состояния	1					2		3	4	5		6		7	8			9						10						11
№ состояния после редукции	1					2		3	4	5		2		6	7			8						9						10

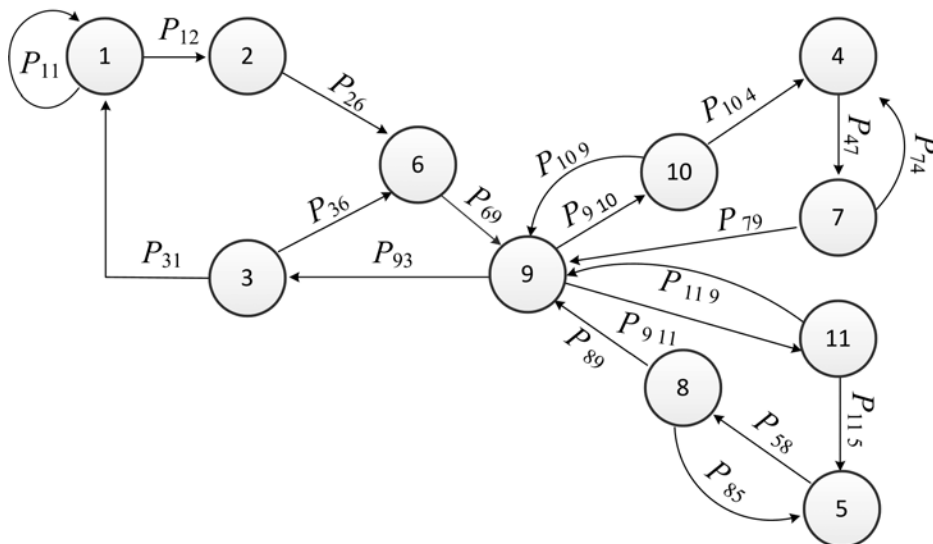


Рис. 7. Граф переходных состояний случайного процесса (без учета РЭП)

- P_{911} – вероятность запроса ОА информационного пакета от ВА;
- P_{119} – вероятность неприема запроса ОА информационного пакета от ВА;
- P_{104} – вероятность передачи ВА контрольного пакета ОА;
- P_{47} – вероятность успешного приема ОА контрольного пакета от ВА;
- P_{74} – вероятность неприема ОА контрольного пакета от ВА;
- P_{79} – вероятность устранения ошибок приема кодограммы у ОА с помощью полученного контрольного пакета;
- P_{115} – вероятность передачи ВА информационного пакета ОА;
- P_{58} – вероятность успешного приема ОА информационного пакета от ВА;
- P_{85} – вероятность неприема ОА информационного пакета от ВА;
- P_{89} – вероятность устранения ошибок приема кодограммы у ОА с помощью полученного информационного пакета [1].

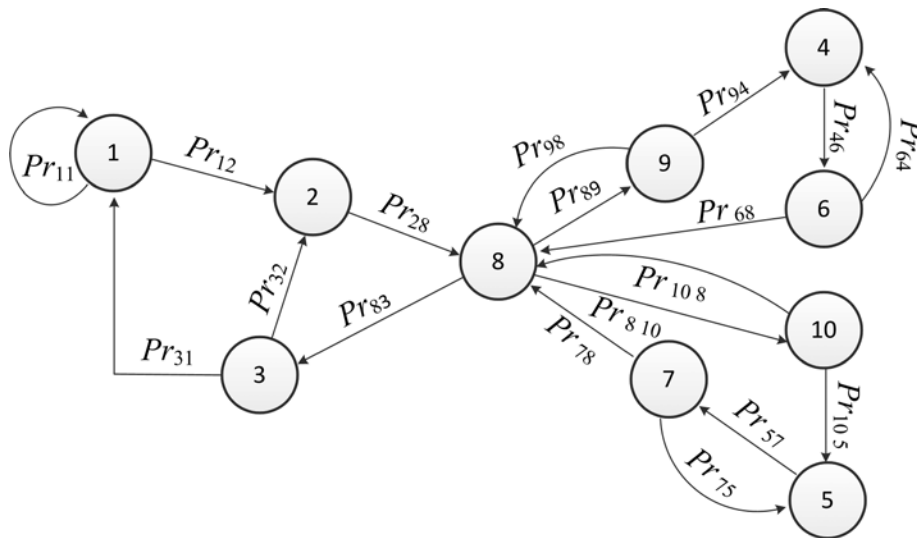


Рис. 8. Редуцированный граф переходных состояний случайного процесса (без учета РЭП)

Переходные вероятности имеют следующий физический смысл:

- P_{12} – вероятность возникновения потребности в передаче пакета у ВА;
- $P_{11} = 1 - P_{12}$;
- P_{26} – вероятность передачи пакетов из кольцевого буфера;
- P_{31} – вероятность завершения передачи после получения квитанции;
- P_{36} – вероятность продолжения передачи после получения квитанции;
- P_{93} – вероятность приема ВА квитанции от ОА;
- P_{69} – вероятность приема ОА передаваемого пакета;
- P_{910} – вероятность запроса ОА контрольного пакета от ВА;
- P_{109} – вероятность неприема запроса ОА контрольного пакета от ВА;

На представленном графе можно пояснить физический смысл эффективности функционирования рассматриваемой системы в терминах теории случайных процессов.

Отметим, что одно состояние (см. табл. 3) является транзитным. Приход в него означает детерминированный переход в следующие состояния. Следовательно, граф переходных состояний случайного процесса, представленный на рисунке 7, можно редуцировать (упростить) исключением из него транзитного состояния. Редуцированный граф переходных состояний случайного процесса представлен на рисунке 8.

Обозначим переходные вероятности в редуцированном графе Pr (probability). Из переходных вероятностей исходного графа они определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Pr_{11} &= P_{11}; & Pr_{12} &= P_{12} + P_{26}; & Pr_{28} &= P_{69}; & Pr_{83} &= P_{93}; \\
 Pr_{32} &= P_{36}; & Pr_{31} &= P_{31}; & Pr_{89} &= P_{910}; & Pr_{98} &= P_{109}; \\
 Pr_{94} &= P_{104}; & Pr_{46} &= P_{47}; & Pr_{64} &= P_{74}; & Pr_{68} &= P_{79}; \\
 Pr_{810} &= P_{911}; & Pr_{108} &= P_{119}; & Pr_{105} &= P_{115}; & Pr_{57} &= P_{58}; \\
 Pr_{75} &= P_{85}; & Pr_{78} &= P_{89}.
 \end{aligned}$$

Теперь вероятностно-временные характеристики (ВВХ) доставки пакетов определяют вероятность перехода случайного процесса из состояния 1 в состояние 8 за требуемое время. Аналогично, ВВХ доставки квитанций определяют вероятность перехода случайного процесса из состояния 8 в состояние 1, а ВВХ доставки пакетов с подтверждением определяют вероятность возврата случайного процесса из состояния 1 в него же. Данные

вероятности определяются известными соотношениями уравнения Колмогорова-Чепмена для МП [2] и аналогичными уравнениями для ПМП [3].

Представленный граф является основой для строгого описания функционирования радиолинии как ПМП.

1. Вектором начальных вероятностей:

$\vec{P}_n = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$, то есть функционирование процесса всегда начинается с первого состояния.

2. Матрицей переходных вероятностей:

$$P = \begin{pmatrix} Pr_{11} & Pr_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{28} & 0 & 0 \\ Pr_{31} & Pr_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{57} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Pr_{64} & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{68} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{75} & 0 & 0 & 0 & Pr_{78} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Pr_{83} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{89} & Pr_{810} \\ 0 & 0 & 0 & Pr_{94} & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{98} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{105} & 0 & 0 & 0 & Pr_{108} & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

3. Плотностями распределений времен пребывания процесса в его состояниях в зависимости от предыдущего состояния:

$$\rho = \begin{pmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{28}(t) & 0 & 0 \\ p_{31}(t) & p_{32}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{46}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{57}(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{64}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{68}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{75}(t) & 0 & 0 & 0 & p_{78}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{83}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{89}(t) & p_{810}(t) \\ 0 & 0 & 0 & p_{94}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{98}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{105}(t) & 0 & 0 & 0 & p_{108}(t) & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные выше вероятности определяются из соотношений переходных вероятностей в редуцированном графе Pr (probability), представленных выше; плотности распределения матрицы ρ – из частных алгоритмов взаимодействия радиостанций и РЭП, а также в соответствии с данными таблицы 2 и рисунка 3.

Аналогичным способом происходит рассмотрение и формализованное описание СПД с использованием контрольных пакетов в терминах теории стохастического управления с учетом воздействия РЭП.

Таким образом, в представленной статье предлагается один из вариантов реализации идеи построения СПД с исправлением стираний в принятых информационных пакетах. Применение описанной модели позволит существенно уменьшить время передачи сообщения с требуемой достоверностью по каналам низкого

качества, функционирующих в условиях весьма значительных помех, в том числе и преднамеренных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуднов А.М., Овчинников А.В. Оптимизация порога стирания при приеме псевдослучайных сигналов // Информационные технологии. – 2013. – № 9. – С. 42–44.
2. Гук И.И., Путилин А.Н., Филиппова Т.С. Комплекс технических средств (КТС) адаптивной КВ-радиосвязи с использованием псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Радиолокация, навигация и связь : матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж : НПФ «САК-ВОЕЕ» ООО, 2014. – С. 948–958.
3. Чуднов А.М. Алгоритмы классификации и идентификации ситуаций на основе взвешивания // Дискретная математика. – М. : Математический институт

им. В.А. Стеклова Российской академии наук, 2014. – С. 119–134

4. Мита Ц., Хара С., Кондо Р. Введение в цифровое управление / пер с япон.; под ред. В.А. Есакова. – М. : Мир, 1994. – 256 с.

5. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / пер с англ. А.В. Запорожца. – М. : Машиностроение, 1986. – 496 с.

6. Урясьев С.П. Адаптивные алгоритмы стохастической оптимизации и теории игр / под ред. Ю.М. Ермолева. – М. : Наука, 1990. – 182 с.

7. Основы передачи данных / К.А. Деньжонков [и др.] ; под ред. И.Б. Парашчука. – СПб. : Военная академия связи, 2015. – 216 с.

REFERENCES

1. Chudnov A.M., Ovchinnikov A.V. Optimizatsiia poroga stiraniiia pri prieme psevdosluchainykh signalov [Optimizing the Erasure Threshold when Receiving Pseudo-Random Signals]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2013, no. 9, pp. 42–44.

2. Guk I.I., Putilin A.N., Filippova T.S. Kompleks tekhnicheskikh sredstv (KTS) adaptivnoi KV-radiosviasi s ispolzovaniem psevdosluchainoi perestroiki rabochei chastoty [Hardware for an Adaptive Short-Wave Radio Communication System using Pseudo-Random Tuning of Operation Frequency]. *Radiolokatsiia, navigatsiia i sviaz. Mater. XX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 20th

Int. Sci. Conf. on Radar, Navigation and Communications]. Voronezh, NPF SAKVOEE LLC, 2014, pp. 948–958.

3. Chudnov A.M. Algoritmy klassifikatsii i identifikatsii situatsii na osnove vzveshivaniia [Classification Algorithm and Situation Identification Based on Calculation]. *Diskretnaia matematika* [Discrete Mathematics], Moscow, Matematicheskii institut im. V.A. Steklova RAS Publ., 2014, pp. 119–134.

4. Mita C., Hara S., Kondo R. *Vvedenie v tsifrovoe upravlenie. Per s iapon.; pod red. V.A. Esakova* [Introduction to the Digital Control. Transl. from Japanese, edited by V.A. Esakov]. Moscow, Mir Publ., 1994. 256 p.

5. Singh M., Titli A. *Sistemy: dekompozitsiia, optimizatsiia i upravlenie. Per s angl. A.V. Zaporozhtsa* [Systems: Decomposition, Optimization and Control Transl. from Engl. by A.V. Zaporozhets]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 496 p.

6. Uriasiev S.P. Adaptivnye algoritmy stokhasticheskoi optimizatsii i teorii igr. Pod red. Iu.M. Ermoleva [Adaptive Algorithms of Stochastic Optimization and Game Theory. Edited by Iu.M. Ermolev]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 182 p.

7. Denzhonkov K.A., Zubakin V.V., Kaliuka V.I., Mishin A.I., Parashchuk I.B., Renskov A.A., Sazonov V.V., Titov V.S. *Osnovy peredachi dannykh. Pod red. I.B. Parashchuka* [Fundamentals of Data Communications. Edited by I.B. Parashchuk]. St. Petersburg, Voennaia akademiia sviasi Publ., 2015. 216 p.