

УДК 621.391.8  
DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-73-80

## МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

**О. В. Меркушев**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Представлена модель формирования маршрутов доставки сообщений конечным абонентам в распределенной системе передачи данных по критерию надежности на примере системы радиосвязи в ДКМ-диапазоне частот. Из-за особенностей распространения сигналов, флуктуации параметров передающей среды, природных и искусственных явлений, наличия «зон молчания», сложной помеховой обстановки системы связи в ДКМ-диапазоне отличаются нестационарностью физических каналов и сложностью реализации информационного обмена. При взаимодействии узлов по типу «каждый с каждым» формируется распределенная система передачи данных с динамической многополюсной топологией. Доставка сообщений удаленным узлам выполняется средствами маршрутизации по основным и резервным маршрутам. Поэтому актуальными являются вопросы разработки методов формирования маршрутов доставки сообщений по критерию надежности, включающие в себя сбор и обработку статистических данных качества принимаемых сигналов; определение закономерностей изменения уровней помех и периодов их влияния; прогнозирование состояния физических каналов и адаптивное управление их использованием; формирование линий связи как систем обмена данными с надежностью, превышающей надежность физических каналов.*

*Для решения задачи доставки сообщений конечным абонентам получена модель надежности маршрутизации данных, определены методы формирования маршрутов, получены выражения оценки надежности маршрута доставки сообщений и целевая функция выбора наилучшего маршрута. Разработана структура линии связи как элемента маршрута. Получены функциональные зависимости надежности линии связи и составляющих ее компонентов с учетом особенностей физического и канального уровней модели, исследуемой системы передачи данных.*

**Ключевые слова:** передача данных, нестационарность, надежность, маршрутизация, линия связи, коэффициент готовности.

### Введение

**П**ри построении телекоммуникационных систем с радиодоступом, действующих на больших территориях, большое внимание уделяется надежности доставки сообщений. К подобным системам относятся системы связи, действующие в ДКМ-диапазоне частот. Из-за особенностей распространения сигналов, флуктуации параметров передающей среды, наличия «зон молчания», сложной помеховой обстановки системы связи в ДКМ-диапазоне частот отличаются нестационарностью физических каналов и сложностью реализации информационного обмена [1–5]. В этих условиях обеспечение радиосвязи с соблюдением требований качества, надежности и устойчивости приводит к необходимости введения автоматической адаптации узлов системы к изменяющимся условиям физической среды на основе динамически получаемых оценок качества каналов связи, прогнозирования их надежности и управления потоками данных [6]. При взаимодействии узлов по типу «каждый с каждым»

формируется распределенная система передачи данных с динамической многополюсной топологией [7, 8]. Доставка сообщений удаленным узлам выполняется средствами маршрутизации по основным и резервным маршрутам. Следовательно, актуальными являются вопросы разработки методов формирования маршрутов доставки сообщений по критерию надежности. Используемые в настоящее время протоколы маршрутизации MANET сетей в недостаточной мере оценивают надежность линий связи формирующих маршруты доставки сообщений, не учитывая особенности физического и канального уровней системы передачи данных [9–13].

Цель исследования – определение структуры маршрута доставки сообщений, целевой функции управления доставкой сообщений, формирование структуры линии связи и определение метода оценки ее надежности для решения задачи доставки сообщений конечным абонентам в многополюсной системе с нестационарными каналами связи.

**Модель надежности маршрутизации данных**

В топологии самоорганизующейся распределенной системы передачи данных (РСПД) формируются множества соседних  $M_i = \{n_i\} \in N$  и удаленных  $n_i \in M_i, n_j \in M_j$ , где  $i \neq j$  узлов. Доставка сообщений удаленным узлам выполняется средствами маршрутизации. Протокол маршрутизации, обеспечивающий соблюдение требований надежности доставки сообщений в условиях нестационарности физических каналов, должен содержать в своем составе средства оценки их качества и формировать маршруты доставки сообщений по критерию надежности.

Граф топологии исследуемой РСПД (рис. 1), содержит смежные  $\{s, m; s, k; s, n\}$  и удаленные  $\{s, d; \dots\}$  узлы, где  $s$  – узел источника,  $d$  – узел назначения.

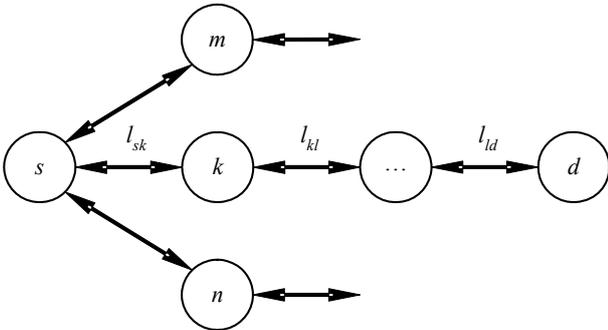


Рис. 1. Граф топологии системы передачи данных

Fig. 1. A graph of the topology of the data transmission system

Каждый узел РСПД создает трафик, поступающий в систему. Трафик состоит из служебных сообщений, передаваемых в среде установления соединения (СУС), а также служебных сообщений и полезных данных, передаваемых в среде передачи данных (СПД). Поступающие в систему требования обслуживания образуют ординарный однородный поток со средним значением интенсивности  $w_{sd}$  (сообщений в секунду) на маршруте  $R_{sd}$ . Передача пакетов от узла  $s$  до узла  $d$  выполняется по маршруту, представляющему конечную последовательность ребер  $(l_{sk}, l_{kl}, \dots, l_{jd})$ , соединенных инцидентными вершинами  $(s, k, \dots, d)$ . При условии использования диффузного метода распространения информации [14] узел  $s$  определяет маршрут до узла  $d$  в следующем виде:

$$R_{sd} = \{l_{sk} \cup R_{kd}\}, \tag{1}$$

где  $l_{sk}$  – линия связи смежных узлов  $(s, k)$ ;  $R_{kd}$  – маршрут от узла следующего перехода  $k$  до узла назначения  $d$ , сообщенный узлу  $s$  соседним узлом  $k$ .  $l_{sk}$  и  $R_{kd}$  являются элементами вероятного маршрута передачи данных. Любой маршрут может быть представлен последовательным соединением двух элементов  $\{l_{sk}, R_{kd}\}$ .

Схема маршрута  $R_{sd}$  представлена на рис. 2. Тогда маршрут от узла источника  $s$  до узла назначения  $d$  есть нерезервированная восстанавливаемая система с основным соединением элементов.

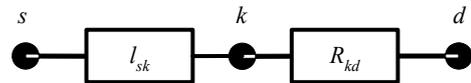


Рис. 2. Схема маршрута передачи данных:  $l_{sk}$  – линия связи узлов  $(s, k)$ ;  $R_{kd}$  – сообщенный маршрут от узла  $k$  до узла назначения  $d$

Fig. 2. Scheme of the data transfer route:  $l_{sk}$  - node communication line  $(s, k)$ ;  $R_{kd}$  - the reported route from the node to the destination node

Каждый из элементов  $\{l_{sk}, R_{kd}\}$  маршрута  $R_{sd}$  с течением времени изменяет свое состояние на «восстановление» в случае отказа и «исправен» после восстановления. Отказ любого элемента приводит к отказу  $R_{sd}$ . Состояние и моменты возникновения отказов и восстановлений элементов линии связи определяются изменениями качества физических каналов.

Оценка надежности  $l_{sk}$  и  $R_{kd}$  выполняется по величине коэффициента их готовности к обработке запросов передачи данных. На рис. 3 показан граф состояний  $R_{sd}$ .

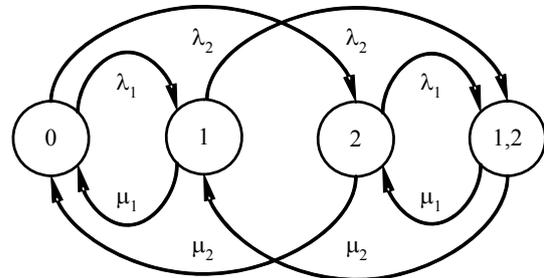


Рис. 3. Граф состояний вероятного маршрута передачи данных  $R_{sd}$ :  $\lambda_i, \mu_i$  – интенсивности отказов и восстановлений  $i$ -го элемента

Fig. 3. The graph of the states of the probable data transmission route  $R_{sd}$ :  $\lambda_i, \mu_i$  - the intensity of failures and restoration of the  $i$ -th element

Вершина с индексом  $0$  обозначает исправное состояние маршрута  $R_{sd}$ . Индексами  $1$  и  $2$  обозначены состояния системы, в которых произошли отказы линии связи  $l_{sk}$  и сообщенного маршрута  $R_{kd}$  соответственно. Состояние системы, при котором произошел отказ двух элементов  $l_{sk}$  и  $R_{kd}$ , обозначено вершиной графа с индексом  $1, 2$ . В установившемся режиме функционирования отказы и восстановления системы представляют собой стационарный поток событий [15] с интенсивностями отказов  $\lambda_1, \lambda_2$  и восстановлений  $\mu_1, \mu_2$  линии связи  $l_{sk}$  и сообщенного маршрута  $R_{kd}$  соответственно. Длительности периодов безотказной работы и восстановления элементов маршрута являются случайными величинами и распределены по экспоненциальному закону со средними  $\{\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2\}$ . Интенсивности отказов и восстановлений линии связи  $l_{sk}$  определяются на основе анализа состояния физических каналов, входящих в состав линии связи на заданном интервале измерения. Интенсивности отказов и восстановлений сообщенного маршрута  $R_{kd}$  являются агрегированными величинами, полученными в результате действия диффузного алгоритма построения маршрута.

Функционирование системы – маршрут  $R_{sd}$  в соответствии с графом (см. рис. 2) – определено системой дифференциальных уравнений Колмогорова [16]:

$$\begin{cases} p'_0(t) = -(\lambda_1 + l_2)p_0(t) + \mu_1 p_1(t) + \mu_2 p_2(t), \\ p'_1(t) = \lambda_1 p_0(t) - (\mu_1 + \lambda_2)p_1(t) + \mu_2 p_{1,2}(t), \\ p'_2(t) = \lambda_2 p_0(t) - (\mu_2 + l_1)p_2(t) + \mu_1 p_{1,2}(t), \\ p'_{1,2}(t) = \lambda_2 p_1(t) + \lambda_1 p_2(t) - (\mu_1 + \mu_2)p_{1,2}(t). \end{cases} \quad (2)$$

Для любого момента времени  $t$ :  $p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_{1,2}(t) = 1$ . Решение системы уравнений (2) выполняем при начальных условиях:  $p_0(0) = 1; p_1(0) = 0; p_2(0) = 0; p_{1,2}(0) = 0$ . В результате решения системы уравнений (2) получено выражение стационарной вероятности нахождения системы в исправном состоянии:

$$p_0 = \frac{1}{\prod_i \rho_i + \sum_i \rho_i + 1}, \quad (3)$$

где  $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ . Стационарная вероятность исправного состояния маршрута есть коэффициент его

готовности  $F_M \equiv p_0$ . Полученный коэффициент готовности  $F_{Msd}$  определяет надежность вероятного маршрута доставки сообщений  $R_{sd}$  как единой системы.

Каждый узел потенциально поддерживает  $R$  линий связи с соседними узлами. Каждый узел  $s$  для каждой линии связи  $l_{sk}$  в течение периода обновления отношений соседства ( $T_{ООСsk}$ ) выполняет сбор статистических данных качества сигналов, принимаемых от соседних узлов в физических каналах  $e_{yCi} \in E_{yC}$ , где  $E_{yC}$  – множество каналов СУС. На основе полученных данных для каждой  $l_{sk}$  определяются: интенсивности отказов  $\lambda_{sk}$  и восстановлений  $\mu_{sk}$  и коэффициент ее готовности  $F_{ЛCsk}$ .

В результате обмена данными с соседними узлами узел  $s$  определяет в направлении узла  $d$  вероятные маршруты доставки сообщений через смежные узлы  $\{m, k, n\}$ , являющиеся вероятными узлами следующего перехода. С каждым из указанных узлов узел  $s$  формирует линии связи  $\{l_{sm}, l_{sk}, l_{sn}\}$ . Для каждой линии связи определяется прогнозируемая оценка надежности  $\{F_{ЛCsm}, F_{ЛCsk}, F_{ЛCsn}\}$ . На рис. 4 показан граф маршрутов доставки сообщений от узла  $s$  до удаленного узла назначения  $d$ .

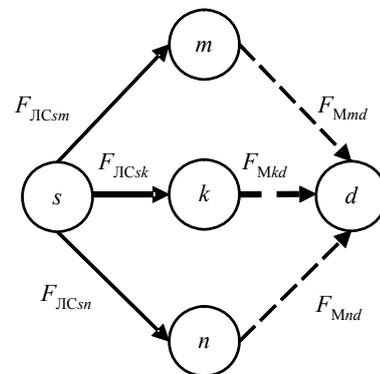


Рис. 4. Граф маршрутов доставки сообщений от узла  $s$  до удаленного узла назначения  $d$

Fig. 4. The graph of message delivery routes from node  $s$  to remote destination node  $d$

Метрики маршрутов доставки сообщений до узла назначения  $d$   $\{F_{Мmd}, F_{Мkd}, F_{Мnd}\}$  сообщаются узлу  $s$  вероятными узлами следующего перехода  $\{m, k, n\}$  в ходе поддержки отношений соседства. Используя оценки надежности линий связи и сообщенных маршрутов, узел  $s$  определяет надежности вероятных маршрутов достав-

ки сообщений до узла  $d$ . Текущим маршрутом доставки сообщений конечному абоненту назначается вероятный маршрут, имеющий наибольший коэффициент готовности:

$$F_M = \frac{1}{\prod_i \rho_i + \sum_i \rho_i + 1} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Вероятные маршруты с меньшими коэффициентами готовности являются резервными.

### Базовая структура линии связи

Линии связи  $l_{ij}$  являются элементами маршрута доставки сообщений  $R_{sd}$  и формируются в результате действия отношений соседства узлов. Структура линии связи основана на функциональном разделении физических каналов [17, 18], что вызвано нестационарностью их параметров. Вследствие этого передача данных между соседними узлами состоит из трех последовательных этапов: установление соединения; запрос готовности узла следующего перехода; передача данных.

Процедура установления соединения выполняется в среде образованной физическими каналами  $E_{yc}$ . СУС образована каналами  $e_{yci} \in E_{yc}$ , в которых в момент времени  $t$  выполняется взаимодействие соседних узлов. Обращаясь к СУС, узлы поддерживают конкурентный синхронный доступ. Состояние СУС на входе каждого узла отличается уровнем сигналов и интенсивностью помех. Для снижения влияния различий в условиях приема каналы  $e_{yci} \in E_{yc}$  объединяются в трассу установления соединения (ТУС) [19].

За установлением соединения следует запрос готовности УСП, который представляет собой одноканальную СМО типа М/М/1. При поступлении запроса обмена данными УСП переходит из свободного состояния в занятое и находится в нем до завершения процедуры обмена данными.

Передача сообщений выполняется узлами в СПД. В результате взаимодействия в каналах  $E_{yc} \in E$  узлы собирают и обрабатывают статисти-

ческие данные качества принимаемых от соседних узлов сигналов. Это позволяет определить каналы  $e_{пдi} \in E_{пд}$ , соответствующие требованиям качества принимаемых сигналов от заданного соседнего узла. Для увеличения надежности выбранные каналы  $e_{пдi} \in E_{пд}$  объединяются в структуру – интерфейс. Пара интерфейсов формирует трассу передачи данных (ТПД), структура которой описана в статье «Оценка надежности сетевого узла сети с радиодоступом в ненадежных каналах связи».

Таким образом, линия связи представляет собой восстанавливаемую нерезервированную систему с основным соединением элементов, схема которой показана на рис. 5. Надежность линии связи прогнозируется на основе статистических данных качества сигналов в каналах  $E_{yc}$  и используется для построения маршрутов доставки сообщений. Период обновления значения надежности линии связи соответствует периоду обновления отношений соседства  $T_{оос}$ .

Интенсивность потока, поступающего в линию связи, есть  $w_{sk}$ . Интенсивности отказов ( $\lambda_{TUC}$ ) и восстановлений ( $\mu_{TUC}$ ) ТУС зависят от  $w_{sk}$  и качества среды, определяемого вероятностью ошибки элемента сигнала ( $p_{ош}$ ), выражения которой приведены в работах авторов Л. М. Финка, В. Ф. Комаровича [20, 21]:

$$\lambda_{TUC}(t) = \frac{f_{TUC}(w_{sk}(t), p_{ош}(t))}{P(t)}, \quad (5)$$

$$\mu_{TUC}(t) = \frac{f_{в.TUC}(w_{sk}(t), p_{ош}(t))}{P_o(t)},$$

где  $f_{TUC}$  – плотность распределения времени до возникновения отказа;  $f_{в.TUC}$  – плотность распределения времени до восстановления;  $P$  – вероятность исправной работы ТУС;  $P_o$  – вероятность отказа ТУС. Время до возникновения отказа и восстановления ТУС распределено по показательному закону.

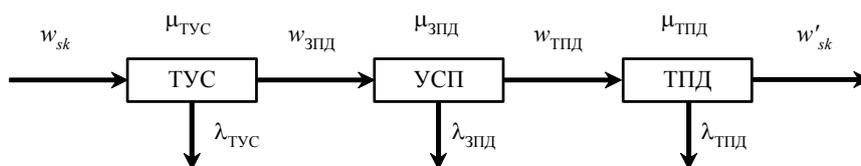


Рис. 5. Базовая структура линии связи:

ТУС – трасса установления соединения; УСП – узел следующего перехода; ТПД – трасса передачи данных

Fig. 5. Basic structure of the communication line:

TUS - route of establishment of the connection; USP - node of the next transition; TPD - data transmission path

На этапе запроса готовности УСП возникновение отказов проявляется в виде отказа узла от участия в обмене данными. Увеличение интенсивности запросов передачи данных ( $w_{зпд}$ ) и/или размера передаваемых сообщений приводит к увеличению отказов УСП:

$$\lambda_{усп}(t) = f_{усп}(w_{зпд}(t)), \quad (6)$$

где  $f_{усп}$  – плотность распределения времени до возникновения запроса готовности УСП. Интенсивность восстановления УСП  $\mu_{усп}$  определяется временем  $T_{пд}$ , необходимым для передачи блока данных размером  $L$  в соответствии с принятым алгоритмом обмена данными.

Если от УСП получен положительный ответ, сетевые узлы переходят к обмену данными средствами ТПД, где доступ к СПД выполняется асинхронно в режиме «точка-точка» в каналах  $E_{пд}$ . Отказ ТПД выражается в отсутствии каналов  $e_{пдi} \in E_{пд}$ , удовлетворяющих заданным требованиям надежности. Интенсивности отказов ( $\lambda_{тпд}$ ) и восстановлений ( $\mu_{тпд}$ ) ТПД определяются зависимостями

$$\lambda_{тпд}(t) = \frac{f_{тпд}(p_{ош}(t))}{P(t)}, \quad (7)$$

$$\mu_{тпд}(t) = \frac{f_{в.тпд}(p_{ош}(t))}{P_o(t)},$$

где  $f_{тпд}$  – плотность распределения времени до возникновения отказа ТПД;  $f_{в.тпд}$  – плотность распределения времени до восстановления ТПД;  $P$  – вероятность исправной работы ТПД;  $P_o$  – вероятность отказа ТПД.

Таким образом, надежность линии связи  $l_{sk}$  определяется следующей зависимостью:

$$F_{лск} = r_{лс}(\lambda_{тгс}(t), \mu_{тгс}(t), \lambda_{усп}(t), \mu_{усп}(t), \lambda_{тпд}(t), \mu_{тпд}(t)), \quad (8)$$

где  $r_{лс}$  – функция коэффициента готовности линии связи.

Восстановление элементов не имеет ограничений. Возможен одновременный отказ нескольких элементов линии связи. Тогда целевая функция имеет следующий вид:

$$F_{Msk}(F_{лск}(\lambda_{тгс}, \mu_{тгс}; \lambda_{усп}, \mu_{усп}; \lambda_{тпд}, \mu_{тпд}), F_{Mkd}) \rightarrow \max. \quad (9)$$

При формировании маршрутов используется прогнозируемая надежность линии связи. Отказ линии связи есть отказ любого из ее элементов. Граф состояний линия связи  $l_{sk}$  показан на рис. 6.

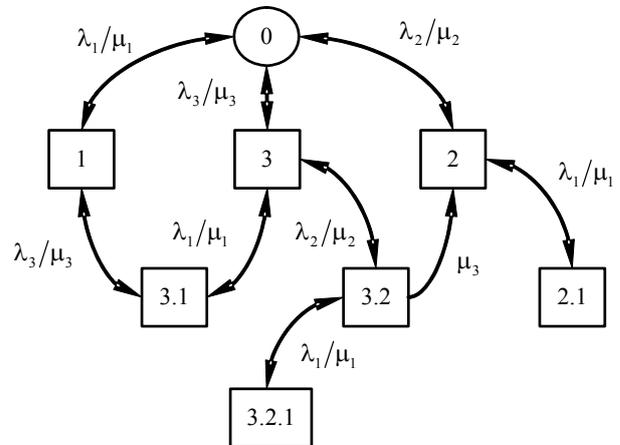


Рис. 6. Граф состояний системы «линия связи»:  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента;  $\mu_i$  – интенсивность восстановления  $i$ -го элемента

Рис. 6. State graph of the “communication line” system:  $\lambda_i$  - failure rate of the  $i$ -th element;  $\mu_i$  - repair rate of the  $i$ -th element

Состояние 0:  $l_{sk}$  исправна; ТУС, УСП и ТПД исправны.

Состояние 1: ТУС восстанавливается после отказа; УСП и ТПД исправны и ожидают восстановления ТУС или функционируют в режиме ранее установленного обмена данными;  $l_{sk}$  восстанавливается.

Состояние 2: УСП восстанавливается; ТУС функционирует; ТПД ожидает восстановления УСП;  $l_{sk}$  восстанавливается.

Состояние 3: ТПД восстанавливается; ТУС и УСП функционируют;  $l_{sk}$  восстанавливается.

Состояние 2.1: вслед за отказом УСП произошел отказ ТУС; УСП и ТУС восстанавливаются; ТПД исправна и ожидает восстановления элементов УСП и ТУС;  $l_{sk}$  восстанавливается.

Состояние 3.1: произошел отказ ТУС и ТПД; УСП исправен и ожидает восстановления элементов;  $l_{sk}$  восстанавливается.

Состояние 3.2: произошел отказ ТПД и УСП; ТУС продолжает функционировать;  $l_{sk}$  восстанавливается.

Состояние 3.2.1: произошел отказ ТПД, УСП и ТУС; элементы восстанавливаются;  $l_{sk}$  восстанавливается.

На основе представленного на рис. 6 графа получена система дифференциальных уравнений состояний линии связи  $l_{sk}$ :

$$\begin{cases}
 p_0'(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)p_0(t) + \mu_1 p_1(t) + \\
 + \mu_2 p_2(t) + \mu_3 p_3(t), \\
 p_1'(t) = -(\mu_1 + \lambda_3)p_1(t) + \lambda_1 p_0(t) + \mu_3 p_{3,1}(t), \\
 p_2'(t) = -(\mu_2 + \lambda_1)p_2(t) + \lambda_2 p_0(t) + \mu_1 p_{2,1}(t) + \\
 + \mu_3 p_{3,2}(t), \\
 p_3'(t) = -(\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2)p_3(t) + \lambda_3 p_0(t) + \\
 + \mu_1 p_{3,1}(t) + \mu_2 p_{3,2}(t), \\
 p_{2,1}'(t) = -\mu_1 p_{2,1}(t) + \lambda_1 p_2(t), \\
 p_{3,1}'(t) = -(\mu_1 + \mu_3)p_{3,1}(t) + \lambda_3 p_1(t) + \mu_1 p_3(t), \\
 p_{3,2}'(t) = -(\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3)p_{3,2}(t) + \lambda_2 p_3(t) + \\
 + \mu_1 p_{3,2,1}(t), \\
 p_{3,2,1}'(t) = -\mu_1 p_{3,2,1}(t) + \lambda_1 p_{3,2}(t).
 \end{cases} \quad (10)$$

В результате решения системы уравнений (10) получено выражение, определяющее стационарную вероятность ( $p_0$ ) нахождения системы, – линия связи в исправном состоянии:

$$\begin{aligned}
 p_0 = & (\mu_1(\lambda_1 + \mu_1)\mu_2(\lambda_1(\mu_2 + \mu_3) - \\
 & - \mu_1(\mu_2 + \mu_3) + \mu_2 + \mu_3(\lambda_2 + \mu_2 + \mu_3))) / \\
 & / (\lambda_1^2(\lambda_2(\lambda_3 + \mu_1) + \mu_1\mu_2)(\mu_2 + \mu_3) + \\
 & + \lambda_1(\lambda_2(\lambda_3 + \mu_1) + \mu_1\mu_2)(\lambda_3(\mu_2 + \mu_3) + \mu_3(\lambda_2 + \mu_2 + \mu_3)) + \\
 & + \mu_1(\lambda_2^2((\lambda_3 + \mu_1)\mu_3 + \lambda_2(\lambda_3 + \mu_1) \times \\
 & \times (\lambda_3((\mu_2 + \mu_3) - \mu_1(\mu_2 + \mu_3) + \mu_3(2\mu_2 + \mu_3)) + \\
 & + \mu_2(\mu_2 + \mu_3)) * (2\lambda_3^2 + \mu_1(\mu_3 + \mu_1) + \lambda_3(\mu_1 + 2\mu_3))))).
 \end{aligned} \quad (11)$$

Полученная стационарная вероятность нахождения линии связи в исправном состоянии является коэффициентом ее готовности  $F_{\text{ЛС}} \equiv p_0$ .

### Анализ результатов

Маршрут передачи данных формируется по коэффициенту готовности. Оптимизация  $F_{\text{Мсд}}$  выполняется за счет оптимизации интенсивностей отказов и восстановлений элементов, составляющих маршрут. Для построения маршрутов передачи данных требуется определить надежность физических каналов, образующих линии связи.

### Выводы

Получена модель маршрута доставки сообщений, отвечающая требованиям маршрутизации по критерию надежности. Определены условия изменения надежности линий связи при управлении потоками данных. Разработана структура линии связи. Получены функциональные зависимости надежности линии связи и составляющих ее компонентов с учетом осо-

бенностей физического и канального уровней модели исследуемой распределенной системы передачи данных. Полученные результаты позволяют использовать методы адаптивной маршрутизации данных на основе результатов оптимизации полученной целевой функции.

### Библиографические ссылки

1. Головин О. В., Простов С. П. Системы и устройства коротковолновой связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 598 с.
2. Хмельницкий Е. А. Оценка реальной помехозащитности приема сигналов в ДКМ-диапазоне. М.: Связь, 1975. 232 с.
3. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные радиопомехи и надежность ДКМ-связи. М.: Связь, 1977. 136 с.
4. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
5. Климов И. З. Принципы построения эффективной системы передачи информации в дециметровом диапазоне радиоволн: монография. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. 268 с.
6. Макаренко С. И., Рюмишин К. Ю., Михайлов Р. Л. Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи // Информационные системы и технологии. 2014. № 6 (86). С. 139–147.
7. Васильев Д. С., Абилов А. В. Протоколы маршрутизации в MANET // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2014. № 11. С. 52–54.
8. Tyagi S.S., Chauhan R.K. Performance analysis of proactive and reactive routing protocols for ad hoc networks. *Int J Comput*, 2010, vol. 1, no. 14.
9. Université de Paris-Diderot, 2016 Babel - a loop-avoiding distance vector routing protocol. Available at: <http://www.pps.univ-parisdiderot.fr/~jch/software/babel/> (accessed: 10.05.18).
10. Abolhasan M., Hagelstein B., Wang J. C.-P. Real-world Performance of Current Proactive Multi-hop Mesh Protocols. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1747&context=infopapers> (дата обращения: 21.10.17).
11. Perkins C., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination Sequenced Distance Vector Routing DSDV for Mobile Computers. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 24, May 1999. DOI: 10.1145/190314.190336.
12. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. *Network Working Group Request for Comments: 3561*, 2003.
13. Erpek T., Sagduyu Y. Routing, Network Coding and TCP Support for Wideband HF Communications. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 24, October 2018. DOI: 10.1109/MILCOM.2018.8599765.
14. Garcia-Lunes-Aceves J.J. Loop-Free Routing Using Diffusing Computations. *IEEE ACM Transactions on networking*, 1993, vol. 1, no. 1.

15. Гихман И. И., Скороход А. В. Теория случайных процессов. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. литер, 1971.

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

17. Меркушев О. В., Климов И. З. Метод маршрутизации пакетов в радиосети передачи данных с ненадежными каналами связи // Материалы XIX Международ. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2013). Воронеж, 2013.

18. MIL-STD-188-141B Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems. Interface standard. Department of Defense USA. 1999. March.

19. Меркушев О. В. Оценка надежности сетевого узла сети с радиодоступом в ненадежных каналах связи // Вестник Удмуртского государственного университета. Серия «Экономика и право». 2017. Т. 27, № 1. С. 106–105.

20. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М. : Советское радио, 1970. 728 с.

21. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ-связи. М. : Связь, 1977. 136 с.

### References

1. Golovin O.V., Prostov S.P. Sistemy i ustrojstva korotkovolnovoj svyazi [Systems and devices HF communications]. Moscow, Gorjachaja linija - Telekom Publ., 2006, 598 p. (in Russ.).

2. Hmel'nickij E.A. Ocenka real'noj pomehozashhishhennosti priema signalov v DKM diapazone [Evaluation of the real noise immunity of signal reception in the HF range]. Moscow, Svjaz' Publ., 1975, 232 p. (in Russ.).

3. Komarovich V.F., Sosunov V.N. Sluchajnye radiopomehi i nadezhnost' DKM svyazi [Random interference and reliability HF communication]. Moscow, Svjaz' Publ., 1977, 136 p. (in Russ.).

4. Klovskij D.D. Peredacha diskretnyh soobshhenij po radiokanalam [The transfer of discrete messages over the radio]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1982. 304 p. (in Russ.).

5. Klimov I.Z. Principy postroenija jeffektivnoj sistemy peredachi informacii v dekametrovom diapazone radiovoln [Principles of building an effective information transmission system in the decameter range of radio waves]. Izhevsk, IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova Publ., 2017, 268 p. (in Russ.).

6. Makarenko S.I., Rjumshin K.Ju., Mihajlov R.L. [Model of functioning of telecommunication object in the limited reliability of communication channel conditions]. *Information Systems and Technologies*, 2014, no. 6, pp. 139-147 (in Russ.).

7. Vasil'ev D.S., Abilov A.V. [Routing protocols in MANET]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2014, no. 11, pp. 52-54 (in Russ.).

8. Tyagi S.S., Chauhan R.K. Performance analysis of proactive and reactive routing protocols for ad hoc networks. *Int J Comput*, 2010, vol. 1, no 14.

9. Université de Paris-Diderot, 2016 Babel - a loop-avoiding distance vector routing protocol. Available at: <http://www.pps.univ-parisdiderot.fr/~jch/software/babel/> (accessed: 10.05.18).

10. Abolhasan M., Hagelstein B., Wang J. C.-P. Real-world Performance of Current Proactive Multi-hop Mesh Protocols. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1747&context=infopapers> (accessed: 21.10.17).

11. Perkins C., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination Sequenced Distance Vector Routing DSDV for Mobile Computers. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 24, May 1999. DOI: 10.1145/190314.190336.

12. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. *Network Working Group Request for Comments: 3561*, 2003.

13. Erpek T., Sagduyu Y. Routing, Network Coding and TCP Support for Wideband HF Communications. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 24, October 2018. DOI: 10.1109/MILCOM.2018.8599765.

14. Garcia-Lunes-Aceves J.J. Loop-Free Routing Using Diffusing Computations. *IEEE ACM Transactions on networking*, 1993, vol. 1, no. 1

15. Gihman I.I. Skorohod A.V. *Teorija sluchajnyh processov* [Theory of random processes] Moscow, Nauka Publ., 1971, 664 p. (in Russ.).

16. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. S. Peterburg, BHV-Peterburg Publ., 2006. 704 p. (in Russ.).

17. Merkushev O.V., Klimov I.Z. *Metod marshruti-zacii paketov v radioseti peredachi dannyh s nadezhnymi kanalami svyazi* [The method of routing packets in the radio data network with unreliable communication channels]. *Materialy XIX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"* (RLNC-2013) [Proc. of the XIX International Scientific and Practical Conference "Radiolocation, Navigation, Communication" (RLNC-2013)]. Voronezh, 2013 (in Russ.).

18. MIL-STD-188-141B Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems. Interface standard. Department of Defense USA. 1999. March.

19. Merkushev O.V. [Evaluation of the reliability of the network node of the network with radio access in unreliable communication channels]. *Vestnik Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Jekonomika i pravo, Seriya "Ekonomika i pravo"*, 2017, vol. 27, no. 1, pp. 106-105 (in Russ.).

20. Fink L.M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenij* [Theory of discrete message transfer]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 728 p. (in Russ.).

21. Komarovich V.F., Sosunov V.N. *Sluchajnye radiopomekhi i nadezhnost' KV-svyazi* [Random radio interference and HF-link reliability]. Moscow, Svjaz' publ. 1977, 136 p. (in Russ.).

**Routing Model by the Criterion of Reliability in a Distributed Data Transmission System**

*O.V. Merkushev*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*The paper presents a model of forming routes for delivering messages to end subscribers in a distributed data transmission system by the reliability criterion using the example of a radio communication system in the HF range. Due to the nature of signal propagation, fluctuations in the parameters of the transmitting medium, natural and artificial phenomena, the presence of "silence zones", and the difficult interfering environment of a communication system in the HF range, they are characterized by unsteady physical channels and the complexity of information exchange. With the interaction of nodes of the type "ad hoc", a distributed data transmission system is formed with a dynamic multi-pole topology. Delivery of messages to remote sites is performed by means of routing along the main and backup routes. Therefore, the issues of developing methods for generating message delivery routes based on reliability criteria are relevant, including: collecting and processing statistical data on the quality of received signals, determining patterns of changes in interference levels and periods of their influence, predicting the state of physical channels and adaptive management of their use, forming lines communications as data exchange systems with reliability exceeding the reliability of physical channels.*

*To solve the problem of delivering messages to end subscribers, a model of data routing reliability was obtained, methods for generating routes were determined, expressions for estimating the reliability of the message delivery route and the objective function of choosing the best route were obtained. The structure of the communication line as an element of the route is developed. Functional dependences of the reliability of the communication line and its components are obtained taking into account the features of the physical and channel levels of the model and the data transmission system under study.*

**Keywords:** data transmission, non-stationarity, reliability, routing, communication link, availability factor.

Получено 15.04.2019

**Образец цитирования**

*Меркушев О. В.* Модель маршрутизации по критерию надежности в распределенной системе передачи данных // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 2. С. 73–80. DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-73-80.

**For Citation**

*Merkushev O.V.* [Routing model by the criterion of reliability in a distributed data transmission system]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 73-80 (in Russ). DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-73-80.