

УДК 621.39

*О.В. Меркушев***ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СЕТЕВОГО УЗЛА СЕТИ С РАДИОДОСТУПОМ  
В НЕНАДЕЖНЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ**

Предложен метод оценки надежности сетевого узла по критерию его готовности к обработке требований обслуживания. Разработан протокол установления соединения и выполнена оценка среднего времени установления соединения в фазе 2. Разработан протокол передачи данных. Произведена аналитическая оценка ожидаемого времени передачи блока данных средней длины. Аналитическое моделирование выполнялось в системе Matlab. Подготовлена имитационная модель проектируемой сети с радиодоступом в ненадежных каналах связи. Изменчивость параметров связи модели обеспечивалась реализацией физического уровня имитирующего пространство радиосигнала, имитацией аддитивных помех с плотностью распределения по закону Рэлея, конкурентным доступом к среде установления соединения между соседними узлами. Разработаны модели сетевых узлов. Выполнено имитационное моделирование проектируемой радиосети передачи данных. Разработка модели и само имитационное моделирование выполнялось в системе дискретного моделирования событий OMNeT++. В ходе моделирования каждый сетевой узел выступал в качестве источника и приемника запросов обмена данными. Выполнено сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования.

*Ключевые слова:* радиосеть, помехи, канал, вероятность, надежность, транзакция, линия связи, сетевой узел, моделирование, протокол, интенсивность, готовность, кадр.

Основу определения маршрутов в сети с радиодоступом с ненадежными каналами связи составляет процедура весовой оценки линий связи соседних узлов. Проектируемая весовая оценка состоит из трех компонент: надежность среды установления соединения ( $K_{Con}$ ), готовность узла к обработке требования обслуживания ( $K_{TD}$ ), надежность интерфейса передачи данных ( $K_{If}$ ):

$$w = f(K_{Con}, K_{TD}, K_{If}). \quad (1)$$

Готовность узла к обработке требования обслуживания (ретрансляции поступившего кадра)  $K_{TD}$  определяется готовностью модуля передачи данных установить соединение в фазе 2 с модулем передачи данных соседнего узла для последующего выполнения обмена данными. С учетом того, что интерфейс сетевого узла проектируемой сети моделируется в виде системы массового обслуживания типа M/M/1/N, примем выражение для вероятности отказа от установления соединения в фазе 2 по переполнению буфера (или занятости узла в процедуре передачи сообщения ранее установленного соединения) [1;2]:

$$p_u = \frac{(1-\rho) \cdot \rho^N}{1-\rho^{(N+1)}}, \quad (2)$$

где  $\rho = \frac{\lambda_{RTD}}{\mu_{TD}}$  – коэффициент модуля трафика данных;  $\lambda_{RTD}$  – интенсивность поступления требований передачи сообщений;  $\mu_{TD}$  – интенсивность обработки требований передачи сообщений;  $N$  – размер буфера ( $N = 1$ ).

Интенсивность поступления требований обслуживания определяется суммарной интенсивностью  $\lambda$  за вычетом суммарных потерь  $\lambda_f$ , возникающих при установлении соединения:

$$\begin{aligned} \lambda &= \sum \lambda_i, \\ \lambda_f &= \sum \lambda_{f.i}. \end{aligned} \quad (3)$$

Интенсивность требований обмена данными, адресованных узлу  $l$ , определим следующим выражением:

$$\lambda_{R.TD.l} \leq \frac{\lambda - \lambda_f}{M} * K, \quad (4)$$

где  $M$  – количество узлов, конкурирующих за среду;  $K$  – количество узлов, отправивших требования установления соединения узлу  $l$ ;  $1 \leq K \leq (M - 1)$ . При построении аналитической модели для определения  $\lambda_{R.TD.l}$  используем следующее выражение:

$$\lambda_{R.TD.l} = \frac{\lambda - \lambda_f}{M} * K, \quad K = 1. \quad (5)$$

В ответ на получение запроса обмена данными (установление соединения – фаза 1) вызываемый узел может ответить кадрами подтверждения или отказа от обмена данными. Причина отказа может заключаться в текущей занятости вызываемого узла участием в ранее установленном обмене данными. В этом случае вызывающий узел определяет вызываемый узел как отказавший и находящийся в состоянии восстановления.

Период восстановления узла будет равен времени выполнения процедуры передачи сообщения (блока данных)  $T_{TD}$ . По завершении передачи блока данных узел переходит в рабочее состояние и готов к обработке следующего запроса.

Получив запрос на обмен данными, сетевой узел выполнит процедуру настройки на выбранный канал передачи данных и затем перейдет непосредственно к обмену данными. На рис. 1 показан процесс установления соединения на выбранном канале в режиме индивидуальной адресации.

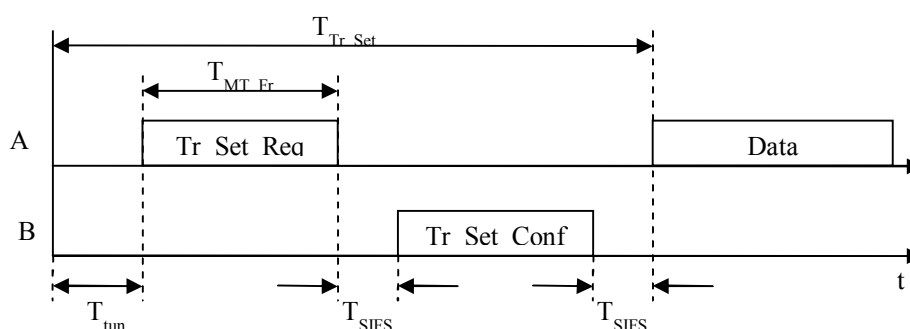


Рис. 1. Процесс установления соединения в канале передачи данных (фаза 2) в режиме индивидуального вызова

Длительность процедуры установления соединения на канале передачи данных будет равна

$$T_{TE} = T_{tun} + T_{TM\_Fr} + T_{SIFS} + T_{TM\_Fr} + T_{SIFS}, \quad (6)$$

где  $T_{tun}$  – время настройки приемопередатчиков узлов на выбранный частотный канал;  $T_{TM\_Fr}$  – длительность передачи кадра управления (кадра вызова –  $Tr\_Set\_Req$  и кадра подтверждения –  $Tr\_Set\_Conf$ );  $T_{SIFS}$  – кратчайший межкадровый интервал. С учетом возможных потерь кадров вызова и подтверждения (вследствие действия помех) и последующих повторных попыток установления среднее время установления соединения в фазе 2 будет равно

$$\overline{T_{TE}} = T_{tun} + \sum_{i=1}^{n-1} (T_{Tr} * Q_{Tr}^i) + T_{Tr}, \quad (7)$$

где  $T_{Tr}$  – транзакция попытки передачи кадра данных, равная

$$T_{Tr} = T_{TM\_Fr} + T_{SIFS} + T_{TM\_Fr} + T_{SIFS}; \quad (8)$$

$Q_{Tr}$  – вероятность неудачной транзакции, определяемая вероятностью потери кадра вызова или подтверждения  $p_{er}$ , равная

$$Q_{Tr} = p_{er} + (1 - p_{er})p_{er}. \quad (9)$$

Зависимость среднего времени установления трафика от изменения вероятности потери кадра показана на рис. 2.

При малых значениях вероятности потери кадра  $p_{er}$  среднее время установления соединения стремится к абсолютному времени установления трафика  $\overline{T_{TE}} \rightarrow T_{TE}$ . С ростом  $p_{er}$  наблюдается увеличение времени установления соединения.

Далее определим среднее время передачи данных при соединении в режиме индивидуальной адресации. После установления соединения сетевые узлы переходят к обмену данными. Доступ к среде регламентируется правилами двухточечного соединения. На рис. 3 показана схема базового доступа к среде при работе в режиме одноадресного вызова.

На рис. 3 узел А выполняет передачу блока данных узлу В. Передаваемые данные инкапсулируются в кадры (Data). Каждый переданный кадр подтверждается кадром АСК. Отсутствие подтверждения свидетельствует о неудачной попытке передачи данных. Для упрощения моделирования примем, что передача ведется кадрами фиксированного размера. Исходя из принципа статистической однородности узлов сети и анализа форматов передаваемых данных, описанных в [3], примем, что математиче-

ское ожидание размера кадра (при условии равновероятного выбора размера сегмента данных) данных составит:  $L_{DFr} = 20970$  битов, с длительностью передачи равной  $T_{DFr} = 4626.67$  мс.

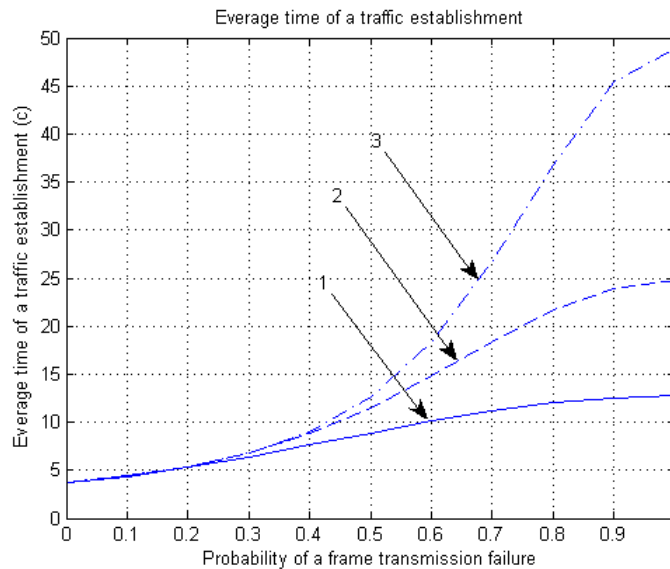


Рис. 2. Среднее время установления соединения на каналах передачи данных. Вероятность потери кадра  $P_{Fr} = 0.0001-1$ ; 1, 2, 3 — кривые, показывающие изменение длительности процедуры установления соединения с количеством попыток равным 4, 8 и 16 соответственно

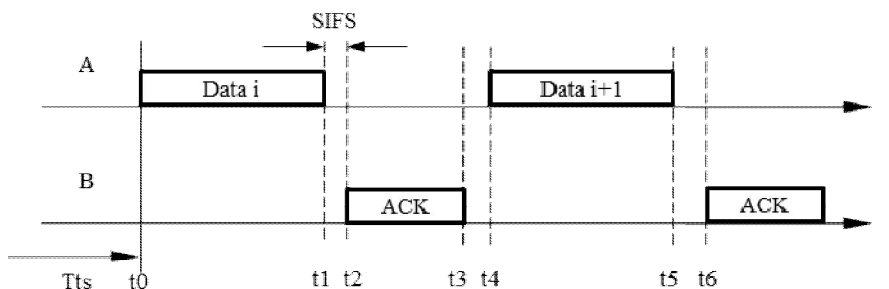


Рис. 3. Схема базового доступа к среде при передаче данных в режиме одноадресного вызова

Будем полагать, что блок данных объемом  $D$  передается кадрами размера  $L_{DFr}$ , в течение цикла передачи данных, состоящего из  $U$  итераций передачи кадров. Каждая итерация (транзакция) передачи кадра равна

$$T_{CDT} = T_{DFr} + T_{SIFS} + T_{MFr} + T_{SIFS}, \quad (10)$$

где  $T_{DFr}$  — время передачи кадра данных длины  $L_{DFr}$ ;  $T_{MFr}$  — время передачи кадра управления трафиком, подтверждающего успех передачи.

В случае неудачной попытки передачи кадра данных передающий узел повторит передачу. Количество повторных попыток ограничено предельным значением  $R$ . Таким образом, в состав успешной передачи кадра будет входить  $i$  неудачных попыток, где  $1 \leq i \leq (R - 1)$  и одна успешная попытка. Тогда математическое ожидание среднего времени передачи блока данных будет равно

$$\overline{T_{TD}} = \sum_{j=1}^F [\sum_{i=1}^{R-1} [(Q_{FrEr} + P_{Fr} * Q_{FrEr})^i * T_{CDT.j}] + T_{CDT.j}], \quad (11)$$

где  $F$  — количество кадров, необходимых для передачи блока;  $Q_{FrEr}$  — вероятность неудачной попытки передачи кадра;  $P_{Fr}$  — вероятность успешной передачи кадра данных.

В процессе установления соединения и последующей передачи данных узел находится в состоянии обслуживания принятого запроса. В случае поступления нового запроса модуль управления ответит отказом обслуживающему узлу. Модуль передачи данных способен принять новый запрос только по окончании обработки текущего запроса. Тогда скорость обработки требова-

ний обслуживания обратно пропорциональна сумме периодов среднего времени установления соединения и среднего времени передачи сообщения. Используя выражения среднего времени установления соединения (6) и среднего времени передачи сообщения (11), определим среднюю скорость обработки требований обслуживания сетевым узлом равной

$$\mu_{TD} = \frac{1}{T_{TE} + T_{TD}}. \quad (12)$$

Используем полученное выражение (13) для нахождения коэффициент загрузки системы (модуля трафика данных)  $\rho$  и последующего определения вероятности отказа обслуживания по переполнению буфера  $p_u$ , используя выражение (1). Интенсивность запросов обслуживания, поступающих на сетевые узлы, определяется выражениями (3), (4), (5). Причиной отказа обслуживания является превышение скорости поступления требований обслуживания над скоростью их обработки. Надежность узла определяется степенью его готовности к обработке поступающих требований обслуживания. Тогда оценку надежности узла выполним по критерию его готовности. Для вычисления коэффициента готовности сетевого узла используем выражение, полученное в [4]:

$$K_{TD} = \frac{\mu_{TD}}{\mu_{TD} + \lambda_{R.TD}}. \quad (13)$$

На рис.4 показана зависимость коэффициента готовности узла от интенсивности требований обслуживания. Расчет  $K_{TD}$  проводился при следующих условиях: количество узлов, разделяющих среду установления соединения  $M = 4$ ; из них задолженных узлов  $N = 2$ .

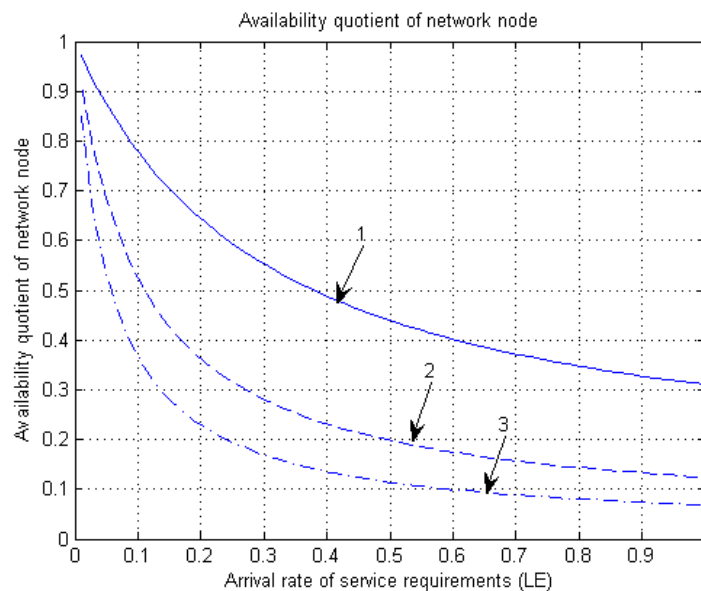


Рис. 4. Коэффициент готовности узла. Количество узлов, разделяющих среду доступа установления соединения –  $M=4$ ; количество задолженных узлов –  $N=2$ ; кривые 1, 2 и 3 – размеры передаваемого сообщения 1, 4 и 8 кадров

На вход каждого узла поступает поток требований обслуживания, прошедших среду установления соединения. Вероятность потери кадра в среде установления соединения задана равной  $p_{er} = 0.2$ . Интенсивность входного потока определяется выражениями (3), (4). Номерами 1, 2, 3 обозначены кривые зависимости коэффициентов готовности узлов при длинах сообщений 1, 4, 8 кадров соответственно. Длина каждого кадра данных -  $L_{DFr} = 20970$  битов, с длительностью передачи, равной  $T_{DFr} = 4626.67$  мс. Количество возможных повторов при потере кадра в канале трафика данных задано равным 4. Размер входного буфера узла равен 1.

На примере кривой 2 рис. 4 рассмотрим влияние изменения количества требований обслуживания на коэффициент готовности узла. Увеличение числа требований обслуживания  $\lambda$  приводит к увеличению числа требований, поступающих на вход узла,  $\lambda_{RTD}$ , что приводит к уменьшению  $K_{TD}$ . Так, при  $\lambda = 0.1K_{TD} = 0.512$ ; при  $\lambda = 0.5K_{TD} = 0.2$ ;  $\lambda = 0.9K_{TD} = 0.12$ . Данная зависимость прослеживается на всех представленных графиках. Увеличение размера сообщения и, следовательно, количества

передаваемых кадров, требуемых для его передачи, приводит к увеличению времени  $T_{TD}$  и уменьшению скорости обработки запросов  $\mu_{TD}$ , что также приводит к уменьшению  $K_{TD}$ .

Имитационное моделирование проектируемой радиосети передачи данных выполнялось в системе дискретного моделирования событий OMNeT++. В системе OMNeT++ была создана модель радиосети передачи данных. Модель радиосети состояла из моделей радиоканалов и сетевых узлов. Для сетевых узлов были разработаны следующие модули: установления соединения, передачи данных, управления, маршрутизации и обмена сообщениями. Далее указаны исходные условия запуска модели в ходе выполнения одного из серии экспериментов:

- количество соседних узлов = 4;
- время работы модели = 10000с;
- узлы используют конкурентный доступ к среде установления соединения на основе SlottedAloha;

- длительность слота канала = 0.8с.;

- доступ к среде передачи данных – в асинхронный «P2P»;

- период широковещательного объявления узла = 44 с;

- размер окна выбора слота попытки передачи = 8 слотов;

- период обновления отношений соседства = (60, 120, 240) с;

- период генерации требования передачи сообщения = (10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 180, 220) с;

- время передачи кадра данных = 4.927 с;

- время настройки приемопередатчиков на выбранный частотный канал = 0.667 с;

- время передачи кадра управления = 1.307 с;

- длительность кратчайшего межкадрового интервала = 0.2 с;

- максимальное значение счетчика попыток установления соединения = 2.

Для определения интенсивности поступления запросов передачи данных в течение периода отношений соседства с соседом  $s$  используем следующее выражение:

$$\lambda_{R.DT}^s = \frac{N_{Con}}{T_{N.Up}}, \quad (14)$$

где  $N_{Con}$  – количество запросов передачи данных, полученных за период отношений соседства  $T_{N.Up}$ , между текущим узлом и соседним узлом  $s$ .

$$N_{Con} = N_{LeaderCon} + N_{ConductCon}, \quad (15)$$

где  $N_{LeaderCon}$  – количество запросов обмена данными, созданных текущим узлом к другим соседним узлам сети за период  $T_{N.U}$ . В качестве источников запросов обмена данными в имитационной модели узла выступают следующие модули: приложений, маршрутизации и отношений соседства.

На выполнение операции установления соединения в фазе 2 узел затрачивает время  $T_{Con}$ , находясь в состоянии, отличном от свободного. При этом, начиная с момента перехода модуля управления из состояния IDLE в состояние, соответствующие этапам установления соединения фазы 2 и передачи данных, текущий узел будет отвечать отказами установления соединения DENY на запросы обмена данными, полученными от других узлов. Собственные запросы передачи данных, созданные во время, когда узел находится в занятом состоянии, ставятся в очередь запросов модуля управления.

$N_{ConductCon}$  – количество запросов обмена данными, созданных соседними узлами и адресованных текущему узлу. При получении кадра запроса установления соединения текущий узел (в зависимости от его состояния) отвечает либо подтверждением, либо отказом обслуживания. При подтверждении установления соединения (фаза 1) модуль управления активирует модуль обмена данными и переходит в режим ожидания завершения установления соединения (фаза 2). При этом узел выполняет роль ведомого. Отказ от установления соединения (фаза 1) выполняется в случае нахождения узла в состоянии, отличном от IDLE.

Период отношений соседства  $T_{N.Up}$  изменяется во времени и вычисляется для каждого соседнего узла индивидуально. Величина  $T_{N.Up}$  зависит от задаваемого на момент начала работы модели периода поддержки отношений соседства  $T_{NU}$ , загруженности среды установления соединения, интенсивности поступления требований обмена данными (со стороны соседних узлов, а также от модуля приложений текущего узла) и загруженности соседних узлов. Следовательно,  $T_{N.Up}$  является переменной величиной, измеряемой для каждого события поддержки отношений соседства. В модели ве-

личина периода  $T_{N.Up}$  вычисляется разницей между значением времени, полученного на момент начала  $i$ -й итерации процедуры поддержки отношений соседства, и значением времени  $(i-1)$ -й итерации поддержки отношений соседства:

$$T_{N.Up.i} = t - t(T_{N.Up.i-1}). \quad (16)$$

Для вычисления  $\lambda_{R,DT}^S$  использовались средние значения  $T_{N.Up}$ , полученные за время работы модели. В ходе моделирования каждый сетевой узел выступал в качестве источника и приемника запросов обмена данными. Фиксация поступающих запросов обмена данными выполняется модулем управления сетевым узлом. Действующее значение последнего периода поддержки отношений соседства, в течение которого выполнялся сбор статистических данных, равно

$$T_{NUEx} = \frac{T_{N.Up} * k_{CU}}{T_{CTr}}, \quad (17)$$

где  $k_{CU}$  – коэффициент использования канала установления соединения;  $k_{CU} = 0.8$ ;  $T_{CTr}$  – длительность транзакции операции установления соединения;  $T_{CTr} = 1.6$ с. Тогда, скорость поступления запросов обслуживания  $\lambda_{RA}$  с учетом выражений равна:

$$\lambda_{RA} = \frac{N_{Con}}{T_{NUEx}}. \quad (18)$$

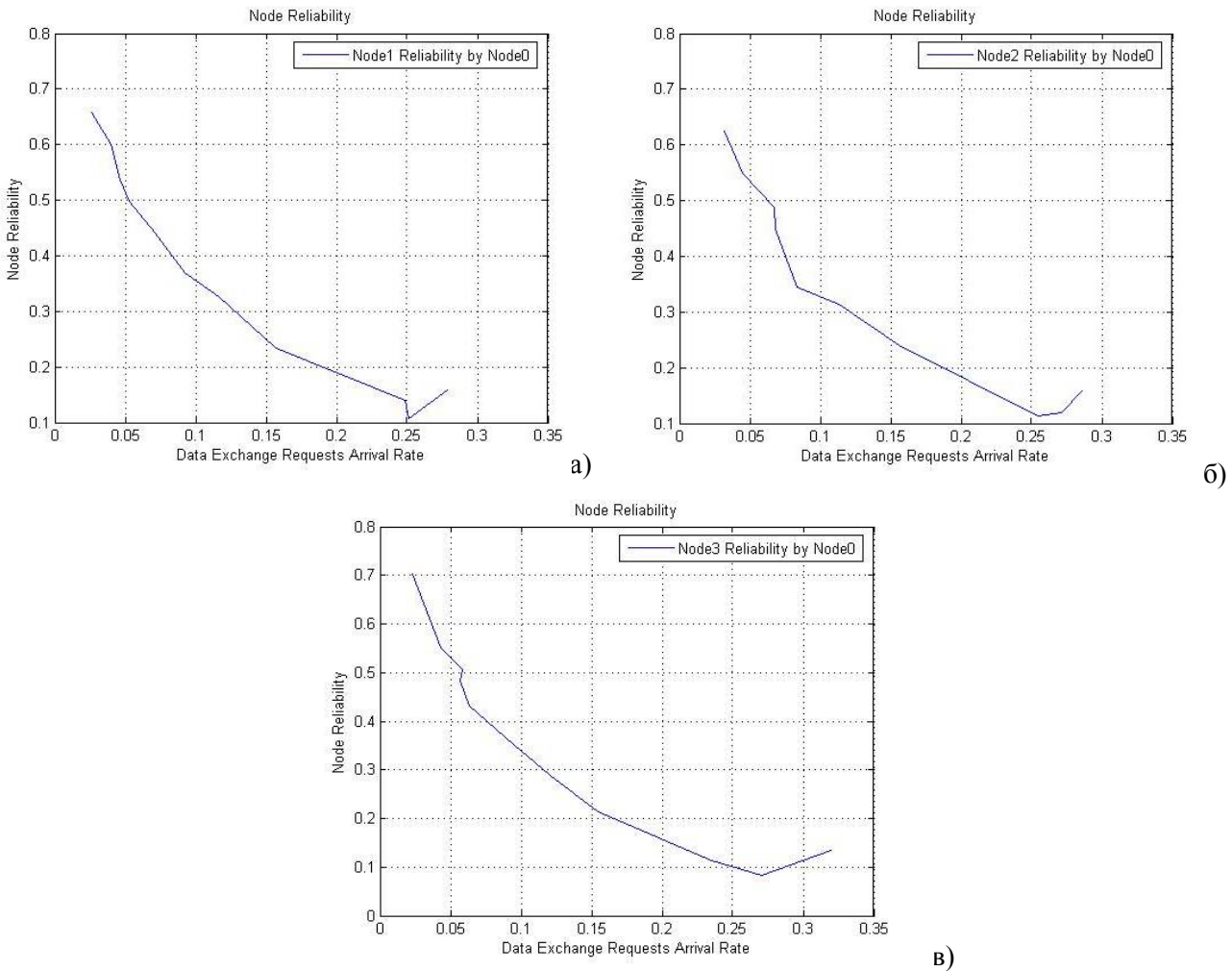


Рис. 5. Зависимость коэффициента готовности узла от интенсивности поступления требований обслуживания: а, б, в – коэффициенты готовности узлов N1, N2, N3 (соответственно), полученные узлом N0

При выполнении моделирования надежность узла оценивалась при помощи коэффициента готовности (13). Процедура обработки запроса обмена данными состоит из нескольких этапов: установление соединения, установление трафика, передача данных, завершение трафика. Установление соединения может выполняться в роли «ведущий» или «ведомый» и может быть успешным или неудачным. В ходе работы модели выполняется измерение времени выполнения операций по установлению соединения, что дает возможность определить на периоде отношений соседства среднее время установления соединения  $\overline{T}_C$ .

В случае успешного выполнения установления соединения (фаза 1) выполняются следующие этапы: установление соединения на каналах передачи данных (фаза 2), передача данных и завершение трафика. Все эти этапы объединены в подсчет среднего времени передачи данных  $\overline{T}_B$ . Для определения скорости обработки узлом запросов установления соединения и обмена данными  $\mu_{NP}$  в ходе моделирования использовалось следующее выражение:

$$\mu_{NP} = \frac{1}{\overline{T}_C + \overline{T}_B}. \quad (19)$$

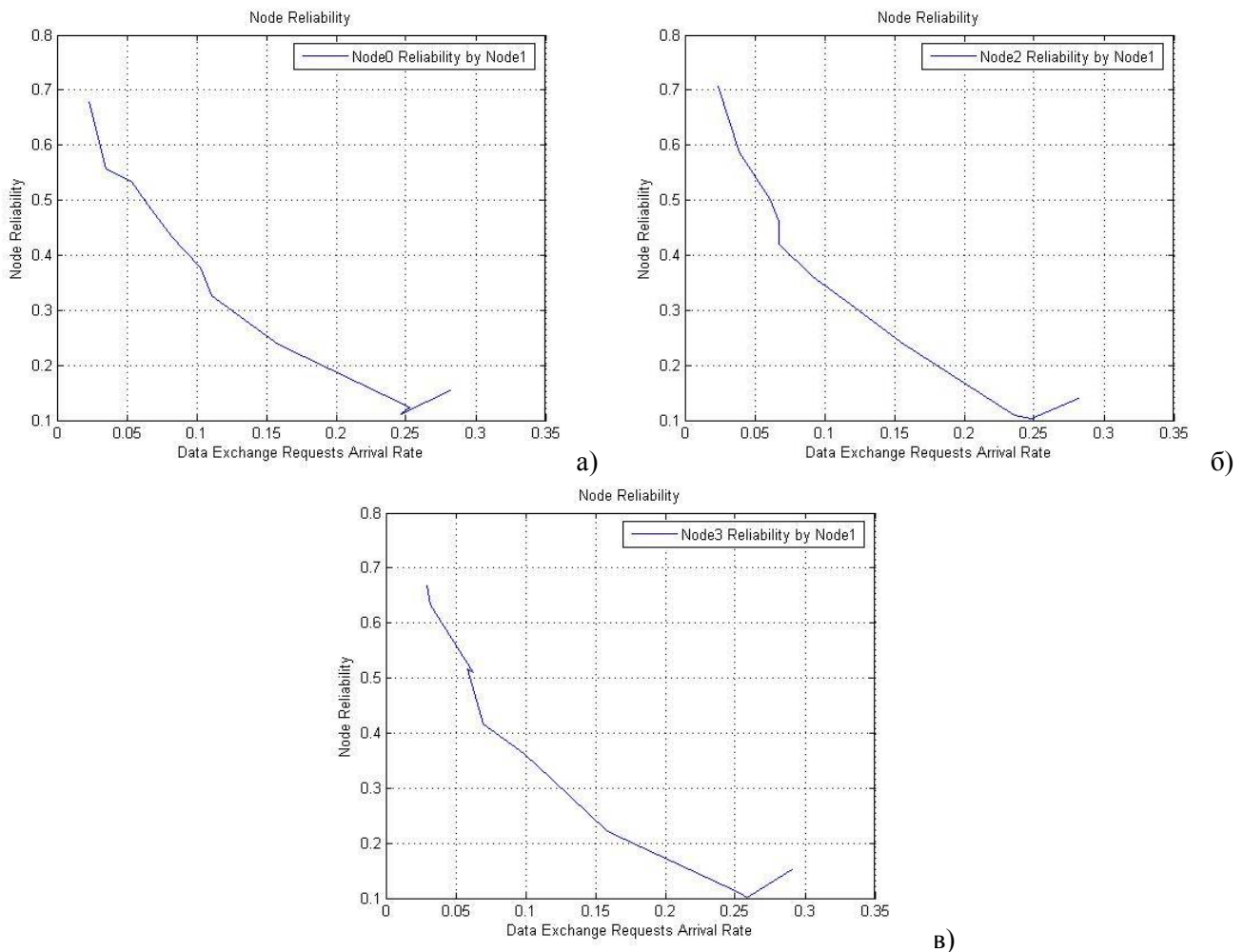


Рис. 6. Зависимость коэффициента готовности узла от интенсивности поступления требований обслуживания: а, б, в – коэффициенты готовности узлов N0, N2, N3 (соответственно), полученные узлом N1

Для вычисления среднего времени установления соединения  $\overline{T}_C$  использовалось следующее выражение:

$$\overline{T}_C = f_{CL} * \overline{T}_{CL} * N_{CL} + f_{CC} * \overline{T}_{CC} * N_{CC},$$



где  $f_{CL}$  – частота появления требований обмена данными в режиме «ведущий»;  $\overline{T_{CL}}$  – среднее время установления соединения при обработке требования обмена данными в режиме «ведущий»;  $N_{CL}$  – количество требований обмена данными в режиме «ведущий»;  $f_{CC}$  – частота появления требований обмена данными в режиме «ведомый»;  $\overline{T_{CC}}$  – среднее время установления соединения при обработке требования обмена данными в режиме «ведомый»;  $N_{CC}$  – количество требований обмена данными в режиме «ведомый». Все переменные, используемые при вычислении  $\overline{T_C}$ , получены статистически в ходе моделирования.

Для вычисления среднего времени передачи данных  $\overline{T_B}$  использовалось следующее выражение:

$$\overline{T_B} = \frac{T_{DT}}{N_{DT}}, \quad (20)$$

где  $T_{DT}$  – суммарное время, затраченное узлом на процедуру передачи данных;  $N_{DT}$  – количество событий передачи данных. В ходе моделирования  $T_{DT}$  определялось суммированием всех значений временных интервалов, от момента начала установления соединения на каналах передачи данных (в ролях «ведущий» или «ведомый»), далее передачи данных между узлами и до окончания этапа завершения графика.

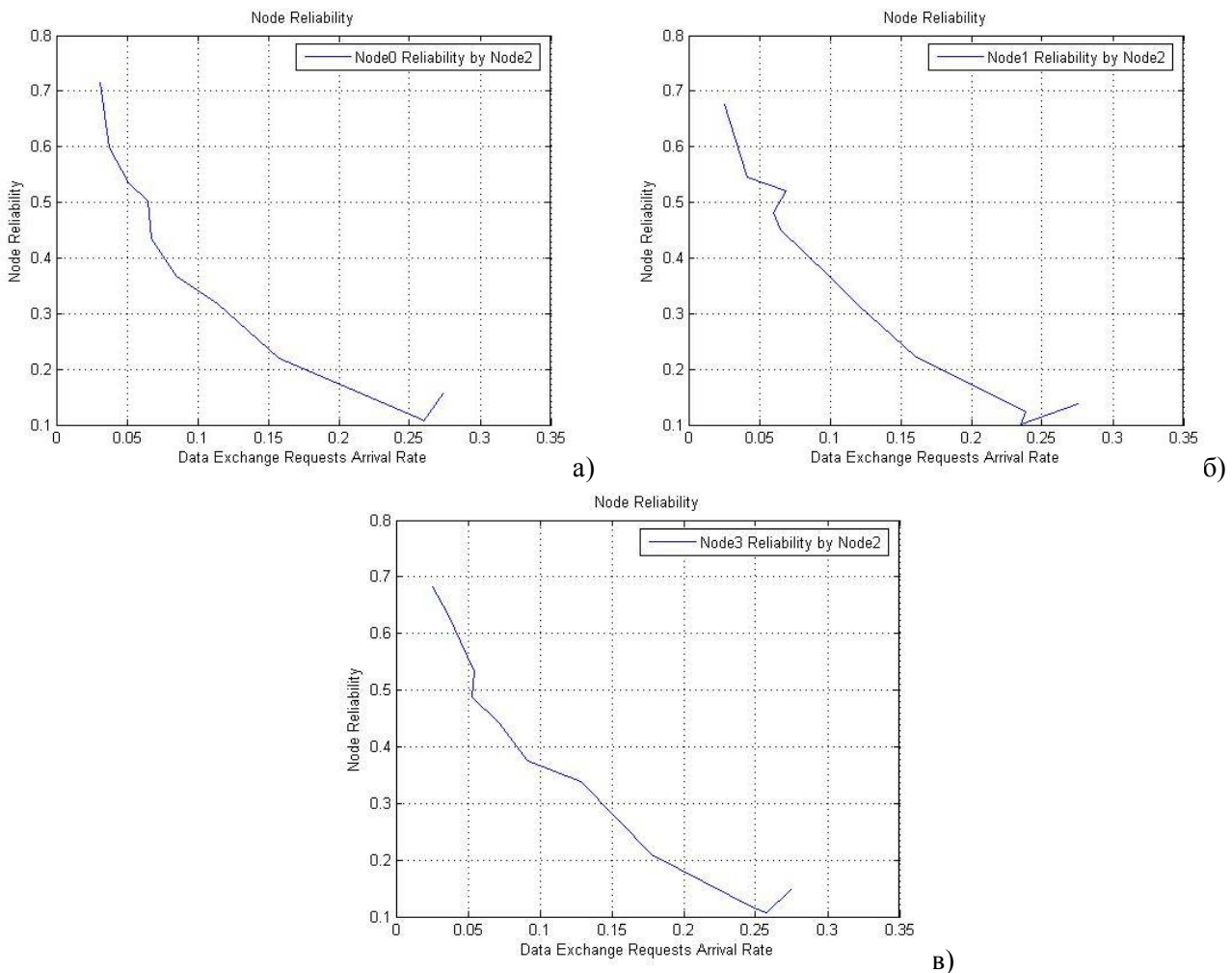


Рис. 7. Зависимость коэффициента готовности узла от интенсивности поступления требований обслуживания: а, б, в – коэффициенты готовности узлов N0, N1, N3 (соответственно), полученные узлом N2

С учетом (18), (19) конечная формула для расчета коэффициента надежности узла, использованная в ходе имитационного моделирования, имеет вид:

$$K_{TD} = \frac{\mu_{NP}}{\mu_{NP} + \lambda_{RA}}. \quad (21)$$



На рис. 5–8 показаны коэффициенты готовности сетевых узлов, полученные в ходе работы имитационной модели проектируемой радиосети. На графиках показана зависимость коэффициентов готовности от интенсивностей поступления требований обслуживания.

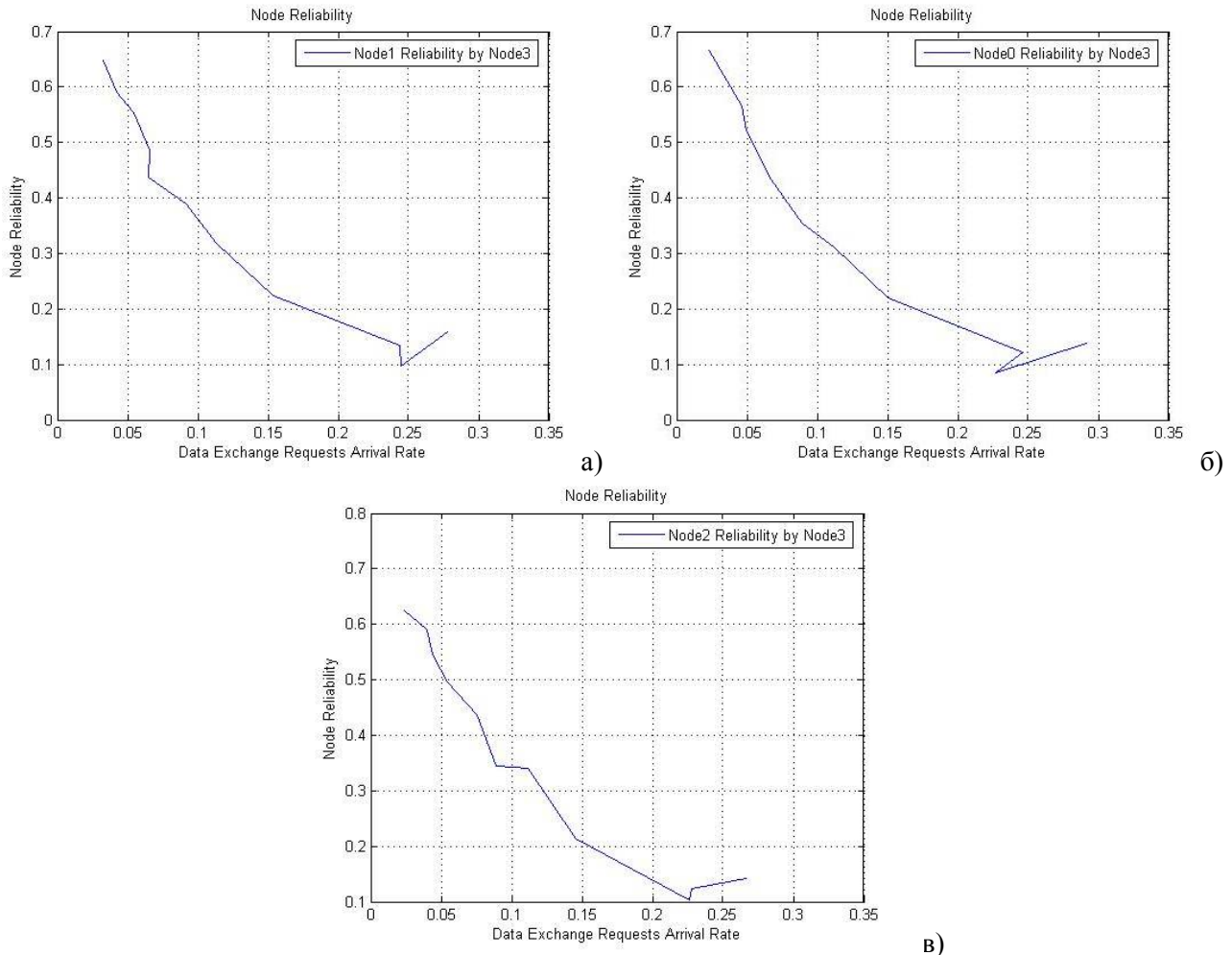


Рис. 8. Зависимость коэффициента готовности узла от интенсивности поступления требований обслуживания: а, б, в – коэффициенты готовности узлов N0, N1, N2 (соответственно), полученные узлом N3

Выполним анализ приведенных результатов моделирования. В ходе моделирования был зафиксирован сравнительно небольшой интервал требований обслуживания, поступающих для обработки сетевым узлом. Требования обслуживания обрабатываются узлом после прохождения среды установления соединения. Интенсивность трафика в среде установления соединения (2) есть суммарная величина определяемая потоком широковещательных кадров объявлений сетевых узлов, потоком кадров, создаваемых самим узлом, запросами модулей управления, маршрутизации и обмена данными, создающими потоки кадров, адресованные текущему узлу или другим узлам сети. Для доступа к среде установления соединения узлы используют конкурентный доступ. Таким образом, увеличение количества требований обслуживания, порождаемых узлами сети, приводит к увеличению конфликтов и потере передаваемых запросов. Максимальное значение интенсивности  $\lambda_{RA} \leq 0.3$ . Дальнейшее увеличение  $\lambda_{RA}$  ограничено ростом конфликтов при доступе к среде установления соединения, организованного по типу slotted Aloha.

Динамика изменения полученных в ходе моделирования коэффициентов готовности узлов в целом соответствует расчетным значениям. Наблюдающиеся скачкообразные изменения коэффициентов надежности при  $\lambda_{RA} \approx 0.25$  объясняются нестабильным поведением сети при большом количестве конфликтов, связанных с ростом  $\lambda$ .

Полученная оценка надежности сетевых узлов по критерию готовности  $K_{TD} = f(\lambda_{RA}, \mu_{NP})$  является составляющей весовой оценки линии связи  $w$  соседних узлов. Наличие весовой оценки линий связи позволит выполнять поиск маршрутов передачи данных, имеющих наибольшую надежность для сети с радиодоступом в ненадежных каналах связи. В ходе имитационного моделирования подтверждена функциональная зависимость  $K_{TD} = f(\lambda_{RA}, \mu_{NP})$ , что дает возможность построения поточковой системы маршрутизации с балансировкой нагрузки по критерию надежности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., Высш. шк., 1999.
3. 3-е поколение протоколов передачи данных в КВ-диапазоне. Приложение С. Стандарт MIL-STD-188-141В.
4. Половков А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ, 2006.

Поступила в редакцию 11.09.16

*O.V. Merkushev*

#### **RELIABILITY ASSESSMENT OF A NETWORK COMMUNICATION CENTER WITH WIRELESS ACCESS IN UNRELIABLE LINKS**

A method for evaluating the reliability of a network communication center according to the criterion of its readiness for handling service calls is proposed. A call setup protocol is developed and an estimate is made of the average time the connection is established in phase 2. A data transfer protocol is developed. An analytical evaluation of the expected block transmission time medium-length data is made. Analytical modeling is performed in the Matlab system. A simulation model has been prepared for the designed network with wireless access to unreliable links. The variability of connection parameters of the model was ensured by implementing the physical level simulating the spread of a radio signal, by simulating additive noise with the distribution density of the Rayleigh law, using a competitive access to the environment of connection between adjacent nodes. Models of network nodes have been developed. Simulation of the designed data transfer radio network has been performed. Modeling and simulation were performed in the system of discrete event simulation OMNeT ++. During the simulation, each network node acted as a source and receiver of data exchange requests. A comparison of the results of the analytical and simulation modeling is made.

*Keywords:* radio, noise, channel, probability, reliability, transaction, link, network node, modeling, protocol, rate, availability, frame.

Меркушев Олег Владимирович,  
заведующий лабораторией правовой информатики  
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»  
426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1 (корп. 4)

Merkushev O.V.,  
Head of the Laboratory of Legal Informatics  
Udmurt State University  
Universitetskaya st., 1/4, Izhevsk, Russia, 426034