

## Аналитическое исследование качества соединений, открытых протоколом NHDP<sup>1</sup>

А. И. Ляхов\*, Д. М. Островский\*, Е. М. Хоров\*

*Институт проблем передачи информации им А. А. Харкевича  
Российской академии наук, Москва, Россия*

Поступила в редколлегию 23.01.2012

**Аннотация**—В работе исследуется протокол NHDP управления соединениями, входящий в известный протокол OLSR маршрутизации в мобильных беспроводных самоорганизующихся сетях MANET. Построена аналитическая модель, позволяющая оценить среднее время жизни соединения и вероятность того, что соединение открыто, при заданных вероятности успешной передачи по соединению и параметрах протокола. На основании разработанной модели предложен способ выбора параметров протокола NHDP.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития беспроводных сетей передачи данных, привлекшим огромный интерес как исследователей, так и телекоммуникационных компаний, является создание многошаговых самоорганизующихся сетей, известных в литературе как mesh-сети или сети MANET.

При разработке самоорганизующихся сетей, пожалуй, в числе первых возникает задача обнаружения соседних станций, а также установления и поддержания логических соединений с ними. Эту задачу решает механизм управления соединениями (МУС), который может быть реализован как часть протокола маршрутизации, как это сделано в первой версии протокола OLSR (Optimized Link-State Routing) [1], протоколах TBRPF (Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding) [2] и AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) [3], или самостоятельным протоколом, например, Peering Management Protocol в сетях IEEE 802.11s [4] и NHDP (Neighborhood Discovery Protocol) [5].

Вне зависимости от способа реализации МУС к нему предъявляются требования относительно качества открытых соединений. Открытые соединения должны быть надежными, т.е. обеспечивать высокую вероятность успешной попытки передачи пакета по ним, и стабильными, т.е. не должно происходить постоянных открытий и закрытий соединений между одной и той же парой станций. Кроме того, решение об открытии соединения должно приниматься как можно быстрее. Использование соединений, не удовлетворяющих данным требованиям, приводит к ошибкам маршрутизации и к потере пакетов, что в конечном итоге значительно снижает эффективность сети.

Одним из протоколов маршрутизации, наиболее широко используемых в сетях MANET, является OLSR [1]. МУС, входящий в состав данного протокола, в ходе своего развития воплотился в отдельный стандарт протокола управления соединениями NHDP [5].

Приведем упрощенное описание протокола NHDP.

Согласно спецификации [5], соединение может находиться в одном из трех состояний, которые мы будем обозначать следующим образом:

- L* (LOST) – соединение закрыто или отсутствует;
- H* (HEARD) – однонаправленное соединение;
- SYM* (SYMMETRIC) – двунаправленное соединение.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта EU FP7 FLAVIA

Для того, чтобы дать возможность соседним станциям обнаружить свое присутствие, каждая станция периодически (через интервал  $HELLO\_INTERVAL$ ) генерирует специальные служебные HELLO-сообщения. Эти сообщения рассылаются широкоэвещательно на 1 шаг, то есть не ретранслируются. Получив такое сообщение от станции  $B$ , станция  $A$  считает, что установлено однонаправленное соединение от станции  $B$  к станции  $A$ , и указывает в своем HELLO-сообщении адрес станции  $B$ .

Получив такое HELLO-сообщение от станции  $A$ , станция  $B$  принимает решение, что соединение между  $A$  и  $B$  симметричное ( $SYM$ ), и указывает в своем HELLO-сообщении адрес станции  $A$ , по получении которого станция  $A$  также считает это соединение симметричным.

Если станция  $A$  не получает HELLO-сообщения от станции  $B$  в течение  $NEIGH\_HOLD\_TIME$  (фактически это означает, что  $\lfloor \frac{NEIGH\_HOLD\_TIME}{HELLO\_INTERVAL} \rfloor$  HELLO-сообщений потеряно), то она закрывает соединение со станцией  $B$  и прекращает указывать адрес станции  $B$  в своих HELLO-сообщениях.

Станция  $B$ , получив от станции  $A$  HELLO-сообщение, в котором не указан адрес станции  $B$ , изменяет состояние соединения на однонаправленное ( $H$ ). Аналогично поступает и станция  $A$ , получив от станции  $B$  HELLO-сообщение, не содержащее адрес станции  $A$ . Для того, чтобы состояние соединения было стабильным, важна надежная передача HELLO-сообщений. В беспроводной среде HELLO-сообщение может быть потеряно не только из-за низкого уровня сигнала и шума, но и из-за коллизий – одновременной передачи пакетов разными станциями. При строгой периодичности рассылки HELLO-сообщений может наблюдаться ситуация, когда HELLO-сообщения станций постоянно попадают в коллизию с другими HELLO-сообщениями. Чтобы избежать таких коллизий и повысить надежность передачи HELLO-сообщений, они посылаются со случайной задержкой, называемой джиттером.

Исследованию механизма рассылки HELLO-сообщений посвящено множество работ. Так, в [6] изучается влияние интервала  $HELLO\_INTERVAL$  на емкость сети. Уменьшение этого интервала влечет более быстрое обнаружение соседей, но также и резкий рост объема служебного трафика из-за большого числа генерируемых HELLO-сообщений.

В [7] для сетей с высокой мобильностью станций предложено использовать укороченные HELLO-сообщения, передавать такие сообщения с большей частотой, чем сообщения стандартной длины, и считать соединение между станциями открытым или закрытым соответственно при получении или пропуске одного HELLO-сообщения. Такая стратегия увеличивает скорость реакции протокола на изменение топологии сети. Однако принятие решения по одному полученному или пропущенному сообщению приводит к частым изменениям состояния соединения, что негативно сказывается на возможности его использования для маршрутизации пакетов.

В этих работах эффективность механизма управления соединениями (МУС) оценивается методами имитационного моделирования на основе таких интегральных показателей, как емкость сети, средняя задержка при доставке пакета от источника до получателя и т.д. В этом случае эффективность собственно МУС оценивается лишь косвенно, так как на емкость сети, в частности, влияет множество факторов, не связанных с работой МУС, например, применяемый протокол маршрутизации.

Одна из первых попыток разработки аналитической модели МУС и оценки эффективности собственно МУС предпринята в [8], где вводятся такие понятия, как задержка при открытии соединения (интервал времени между попаданием станции в область уверенного приема другой станции и моментом установления соединения между ними), задержка при обнаружении разрыва соединения (интервал времени между моментом физического разрыва соединения и логическим закрытием соединения обеими станциями), время жизни соединения (интервал времени между открытием и закрытием соединения), и исследуются различные схемы передачи биконов (кадров, аналогичных HELLO-сообщениям). Рассмотрены схемы, когда интервал передачи биконов фиксирован и когда он имеет экспоненциальное распределение. Показано, что схема с фиксированным интервалом эффективнее с точки зрения предложенных показателей. Недостатком разработанной в [8] модели является принятая в ней грубая модель распространения сигнала: когда станции сближаются на заданное расстояние, вероятность успешного приема бикона скачкообразно изменяется

от нуля до единицы. Кроме того, не учтены возможные коллизии биконов. Таким образом, вероятность успешного приема бикона может принимать лишь два значения: нуль или единицу.

Этот недостаток исправлен в работе [9], в которой предполагается, что вероятность успешного приема сообщения может принимать произвольные значения в диапазоне  $[0, 1]$ . В этой работе вводятся показатели эффективности МУС и предлагается аналитическая модель протокола RMP, используемого в сетях IEEE 802.11s [4]. В этом протоколе принятие решения об открытии/закрытии соединения происходит таким же образом по принятым/пропущенным периодически рассылаемым сообщениям; однако, приняв решение об открытии соединения, станция осуществляет обмен с другой станциями служебными кадрами, в результате которого состояние соединения на обеих станциях, образовавших это соединение, оказывается синхронизованным.

Наличие механизма синхронизации состояния соединения не позволяет использовать разработанную в [9] модель для оценки значений показателей эффективности протокола NHDP, который является МУС без синхронизации состояний. Данная статья является продолжением [9], и ее целью также является построение аналитической модели для оценки значений введенных в [9] показателей эффективности МУС, но уже в случае МУС без синхронизации состояния соединения. Модели, построенные в [9] и в данной работе, позволяют сравнить эффективность МУС обоих классов.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 описываются показатели эффективности МУС. Аналитическая модель МУС без синхронизации состояния соединения построена в разделе 3. Численные результаты приведены в разделе 4. В разделе 5 сделаны выводы и рассматриваются направления дальнейшей работы.

## 2. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТОКОЛА УПРАВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЕМ

Рассмотрим показатели эффективности МУС, введенные в работе [9], и адаптируем их к МУС без синхронизации состояний соединения. Для этого сначала перечислим требования, предъявляемые к МУС.

*Надежность соединений* означает, что вероятность  $p$  успешной попытки передачи пакета данных<sup>2</sup> по открытым соединениям должна быть выше некоторого порогового значения  $p_0$ . Поскольку для передачи данных используются только двунаправленные соединения (состояние  $SYM$ ), то математически это требование формулируется следующим образом:

$$P_{SYM} > P_{SYM_0} \Leftrightarrow p > p_0, \quad (1)$$

где  $P_{SYM}$  – вероятность того, что станция находится в состоянии  $SYM$ , а  $P_{SYM_0}$  положим равным 0,5. При  $P_{SYM} > 0,5$  соединение с большей вероятностью находится в состоянии  $SYM$ .

Как показано в разделе 4,  $P_{SYM}(p)$  является непрерывной строго монотонно возрастающей функцией, поэтому условие (1) эквивалентно следующему:

$$P_{SYM} = P_{SYM_0} \Leftrightarrow p = p_0.$$

$P_{SYM}$  задает долю времени, которую станция проводит в состоянии  $SYM$ . Будем говорить, что станция находится в состоянии  $\overline{SYM}$ , если она находится в каком-либо из состояний  $L$  или  $H$ , т. е. в состоянии, отличном от  $SYM$ . Пусть  $\langle T_{SYM} \rangle$  и  $\langle T_{\overline{SYM}} \rangle$  – средние длительности этих состояний. Тогда вероятность нахождения станции в состоянии  $SYM$  определяется выражением [10]:

$$P_{SYM} = \frac{\langle T_{SYM} \rangle}{\langle T_{SYM} \rangle + \langle T_{\overline{SYM}} \rangle}. \quad (2)$$

<sup>2</sup> В работе предполагается, что события, отвечающие успешным/неудачным попыткам передачи различных пакетов, независимы в совокупности, и вероятность того, что попытка передачи будет успешной, одинакова для всех пакетов, в том числе и HELLO-сообщений.

*Стабильность соединений* означает отсутствие частых переходов между состояниями  $SYM$  и  $\overline{SYM}$ . Только в таком случае информация о том, пригодно ли данное соединение для маршрутизации пакетов, будет актуальной. Назовем флуктуацией  $g$  состояния частоту переходов между состояниями  $SYM$  и  $\overline{SYM}$ :

$$g = \frac{1}{\langle T_{SYM} \rangle + \langle T_{\overline{SYM}} \rangle}. \quad (3)$$

Чем меньше  $g$ , тем стабильнее соединение, так как малые значения одновременно  $\langle T_{SYM} \rangle$  и  $\langle T_{\overline{SYM}} \rangle$  означают частые переходы между состояниями  $SYM$  и  $\overline{SYM}$ , т.е. нестабильность данного соединения. Величина  $\frac{1}{g}$  представляет собой средний промежуток времени между последовательными переходами соединения в состояние  $SYM$ . Для того чтобы сетевая информация о соединениях была актуальна и соединение могло использоваться для маршрутизации пакетов, требуется выполнение условия:

$$\frac{1}{g} > T_{Update} + T_{NetTraversal},$$

где  $T_{Update}$  – период генерации каждой из станций сообщений TOPOLOGY\_CONTROL, посредством которых в рамках использующего данный МУС протокола OLSR по сети распространяется информация о соединениях, а  $T_{NetTraversal}$  – время распространения этих сообщений.

*Своевременность открытия соединений* означает, что МУС открывает соединения как можно быстрее после того, как вероятность  $p$  успешной попытки передачи пакета превысит пороговое значение  $p_0$ . Для этого решение об открытии соединений должно приниматься по минимальному числу  $r$  полученных HELLO-сообщений:

$$r \mapsto \min. \quad (4)$$

Для определения значений данных показателей эффективности протокола NHDP в следующем разделе разработана аналитическая модель данного протокола.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим две станции сети,  $A$  и  $B$ , образующих соединение.

Каждая станция определяет состояния соединений с другими станциями, основываясь на периодической рассылке HELLO-сообщений этими станциями. При разработке аналитической модели NHDP будем считать, что каждая станция генерирует HELLO-сообщения без джиттера, т.е. строго периодически, через равные интервалы времени, длительность которых принимается равной единице. Также будем считать, что успешные передачи HELLO-сообщения – независимые в совокупности события, происходящие с вероятностью  $p$ .

Поскольку NHDP не обеспечивает синхронизацию состояния соединения, это состояние с точки зрения станций  $A$  и  $B$  может быть различным; не нарушая общности, будем определять введенные в разделе 2 показатели эффективности только на станции  $A$ . Кроме того, далее для краткости будем называть состояние соединения с точки зрения некоторой станции состоянием станции.

Изменения состояний можно упрощенно представить диаграммой состояний, изображенной на рис. 1, со следующими правилами перехода между состояниями.

1. Если станция, находясь в состоянии  $L$ , получила  $r$  HELLO-сообщений подряд, последнее из которых содержит ее адрес, то она переходит в состояние  $SYM$ .
2. Если станция, находясь в состоянии  $L$ , получила  $r$  HELLO-сообщений подряд, последнее из которых не содержит ее адрес, то она переходит в состояние  $H$ .
3. Если станция, находясь в состоянии  $H$ , получает HELLO-сообщение, содержащее ее адрес, то она переходит в состояние  $SYM$ .
4. Если станция, находясь в состоянии  $SYM$ , получает HELLO-сообщение, не содержащее ее адреса, то она переходит в состояние  $H$ .

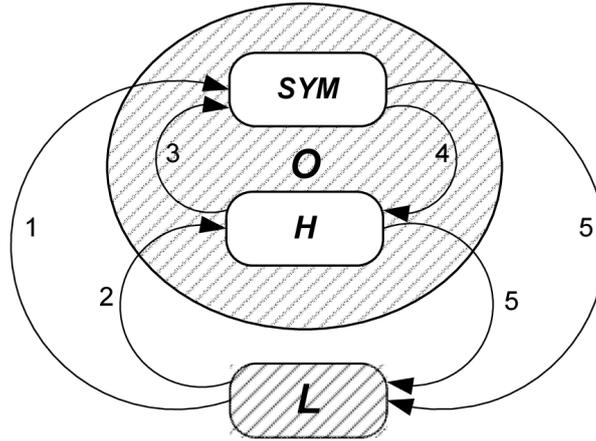


Рис. 1. Диаграмма состояний протокола NHDP

5. Если станция, находясь в состоянии  $H$  или  $SYM$ , не получает  $s$  HELLO-сообщений подряд, то она переходит в состояние  $L$ .

В NHDP  $r = 1$ , а  $s = 3$ . Мы рассматриваем более общий случай, чтобы иметь возможность выбрать наилучшие значения параметров протокола.

Изложение модели построим следующим образом. Вначале определим вероятность  $P_{SYM}$  того, что в произвольный момент времени станция  $A$  находится в состоянии  $SYM$ . После этого найдем среднюю длину интервала времени  $\langle T_{SYM} \rangle$ , в течение которого эта станция находится в состоянии  $SYM$ . При известных значениях  $P_{SYM}$  и  $\langle T_{SYM} \rangle$ , учитывая (2) и (3), значение  $g$  можно определить по формуле

$$g = \frac{P_{SYM}}{\langle T_{SYM} \rangle}. \tag{5}$$

### 3.1. Определение вероятности нахождения в состоянии SYM

Объединим состояния  $H$  и  $SYM$  каждой станции в состояние  $O$ . Вначале мы найдем вероятность  $P_O$  того, что станция, для определенности –  $A$ , находится в состоянии  $O$ , а затем найдем вероятность  $P_{SYM}$  того, что  $A$  находится в состоянии  $SYM$ .

При нахождении  $P_O$  обратим внимание на то, что обе станции совершают переходы между состояниями  $L$  и  $O$  независимо друг от друга, так как эти переходы зависят только от получения или потери HELLO-сообщения, а не от его содержимого: станция переходит из  $L$  в  $O$  при последовательном получении  $r$  HELLO-сообщений; станция совершает обратный переход при потере подряд  $s$  HELLO-сообщений.

Эволюцию состояния каждой из станций ( $A$  и  $B$ ) удобно представить процессом с дискретным временем. Процесс  $J_{OL}(t)$  перехода между состояниями  $O$  и  $L$  является On-Off процессом [10], для которого справедливо соотношение:

$$P_O = \frac{\langle T_O \rangle}{\langle T_O \rangle + \langle T_L \rangle}, \tag{6}$$

поэтому определить  $P_O$  можно, зная средние длительности  $\langle T_O \rangle$  и  $\langle T_L \rangle$  состояний  $O$  и  $L$  соответственно. Вначале найдем  $\langle T_O \rangle$ .

**Лемма 1.** Длительность  $\langle T_O \rangle$  состояния  $O$  определяется выражением:

$$\langle T_O \rangle = \frac{1 - (1 - p)^s}{p(1 - p)^s}. \tag{7}$$

**Доказательство.** Пусть в начальный момент  $t_0 = 0$  времени станция  $A$  принимает HELLO-сообщение от станции  $B$  и переходит в состояние  $O$ . Изменение состояния станции удобно представить в виде марковского процесса  $J_O(t)$ , с поглощающим состоянием  $L$  и непоглощающими состояниями  $O^{(j)}$ , где индекс  $j$  принимает неотрицательные целые значения  $0, \dots, s-1$  и указывает, сколько последних HELLO-сообщений было потеряно подряд. Средняя длительность этого процесса равна  $\langle T_O \rangle$ .

Назовем **циклом** процесса  $J_O(t)$  подпроцесс, начинающийся с состояния  $O^{(0)}$ , заканчивающийся первым приходом либо в состояние  $O^{(0)}$ , либо в поглощающее состояние. Будем говорить, что цикл **удачный**, если он оканчивается состоянием  $O^{(0)}$ . В противном случае, т.е. когда цикл оканчивается поглощающим состоянием, он **неудачный**.

Так как внутри цикла HELLO-сообщения не принимаются, то удачный цикл может иметь длительность от 1 до  $s$ , а длительность неудачного цикла всегда равна  $s$ . Чтобы цикл был неудачным,  $s$  HELLO-сообщений должны быть потеряны. Это происходит с вероятностью  $(1-p)^s$ . С вероятностью  $1 - (1-p)^s$  цикл оказывается удачный. Цикл имеет длительность  $k, k = \overline{1, s}$ , при условии, что он удачный, с вероятностью

$$p_k = \frac{(1-p)^{k-1}p}{1 - (1-p)^s}.$$

Для определения средней длительности процесса  $J_O(t)$  применим аппарат производящих функций. Вначале запишем производящие функции, соответствующие длительности удачного и неудачного циклов, а также числа циклов. Затем запишем производящую функцию для длительности процесса и найдем значение  $\langle T_O \rangle$ .

Производящая функция  $f(z)$  для распределения длительности удачного цикла, равна:

$$f(z) = \sum_{k=1}^s p_k z^k = \sum_{k=1}^s \frac{p(1-p)^{k-1}z^k}{1 - (1-p)^s} = \frac{pz(1 - z^s(1-p)^s)}{(1 - (1-p)^s)(1 - z(1-p))}.$$

Производящая функция  $g(z)$  для длительности неудачного цикла равна

$$g(z) = z^s.$$

Процесс состоит из  $m$  удачных циклов и одного неудачного. Так как вероятность того, что произвольный цикл оказался неудачным равна  $\pi = (1-p)^s$ , то вероятность того, что число удачных циклов равно  $m$  определяется выражением  $\pi(1-\pi)^m$ , т.е. число удачных циклов имеет геометрическое распределение с вероятностью успеха  $\pi$  и производящую функцию:

$$F(z) = \frac{\pi}{1 - (1-\pi)z} = \frac{(1-p)^s}{1 - (1 - (1-p)^s)z}.$$

Производящая функция суммарной длительности всех удачных циклов равна  $F(f(z))$ , так как число  $m$  удачных циклов – случайная величина, независимая в совокупности с длительностями этих циклов [11]. Следовательно, производящая функция длительности всего процесса определяется выражением:

$$\Omega_0(z) = F(f(z)) \cdot g(z) = \frac{(1-p)^s(1 - z(1-p))z^s}{1 - z + z^{s+1}p(1-p)^s}. \quad (8)$$

Так как математическое ожидание  $\langle T_O \rangle$  длительности процесса  $J_O(t)$  равно производной ее производящей функции в единице, то, дифференцируя (8), получаем (7), что и требовалось доказать.

Заменив в приведенном выше доказательстве  $O$  на  $L$ ,  $p$  на  $1-p$  и  $s$  на  $r$ , получаем следующую Лемму.

**Лемма 2.** Длительность  $\langle T_L \rangle$  состояния  $L$  определяется выражением:

$$\langle T_L \rangle = \frac{1-p^r}{(1-p)p^r}. \quad (9)$$

Зная  $\langle T_O \rangle$  и  $\langle T_L \rangle$ , определяем  $P_O$  по формуле (6), а затем –  $P_{SYM}$  с помощью следующей леммы.

**Лемма 3.** Вероятность  $P_{SYM}$  нахождения станции в состоянии  $SYM$  определяется формулой:

$$P_{SYM} = P_O^2. \quad (10)$$

**Доказательство.** Станция  $A$  находится в состоянии  $SYM$  тогда и только тогда, когда выполняются оба условия:

1. станция  $A$  находится в состоянии  $O$ ;
2. станция  $B$  находилась в состоянии  $O$  в момент, когда станция  $A$  последний раз успешно приняла HELLO-сообщение от  $B$ .

Вероятность каждого из этих событий равна  $P_O$ . Из независимости событий 1 и 2 следует справедливость леммы.

### 3.2. Определение средней длительности состояния $SYM$

Рассмотрим независимые On-Off процессы  $J_{OL}^{(A)}(t)$  и  $J_{OL}^{(B)}(t)$  изменения состояния соответственно станций  $A$  и  $B$  и построим процесс  $J_{SYM^*}(t)$  переходов между состояниями  $SYM^*$  и  $\overline{SYM^*}$ . Процесс  $J_{SYM^*}(t)$  находится в состоянии  $SYM^*$  тогда и только тогда, когда оба процесса  $J_{OL}^{(A)}(t)$  и  $J_{OL}^{(B)}(t)$  находятся в состоянии  $O$ ; в остальных случаях он находится в состоянии  $\overline{SYM^*}$ .

$J_{SYM^*}(t)$  примерно соответствует процессу  $J_{SYM}(t)$  переходов станции  $A$  между состояниями  $SYM$  и  $\overline{SYM}$ . Расхождение происходит в следующих случаях. При переходе станции  $B$  в состояние  $O$  станция  $A$  узнает об этом только тогда, когда получает очередное HELLO-сообщение от  $B$ . Другими словами, станция  $A$  переходит в состояние  $SYM$  с некоторой задержкой, причем средняя длительность этой задержки будет тем больше, чем меньше  $p$ . С аналогичной задержкой происходит выход станции  $A$  из состояния  $SYM$ , если он вызван выходом станции  $B$  из состояния  $O$ . Как показано в ходе численного моделирования в разделе 4, эти задержки в значительной степени компенсируют друг друга и оценить среднюю длительность  $\langle T_{SYM} \rangle$  состояния  $SYM$  с высокой точностью можно по средней длительности  $\langle T_{SYM^*} \rangle$  состояния  $SYM^*$  процесса  $J_{SYM^*}(t)$ .

**Лемма 4.** Пусть  $J_{OL}^{(A)}(t)$  и  $J_{OL}^{(B)}(t)$  – 2 независимых On-Off процесса с одной и той же функцией распределения  $F(t) = Pr\{T_O \leq t\}$  и математическим ожиданием  $\langle T_O \rangle$  длительности состояния  $O$ ,  $J_{SYM^*}(t)$  – процесс, построенный описанным выше способом. Тогда математическое ожидание длительности  $\langle T_{SYM^*} \rangle$  состояния  $SYM^*$  определяется выражением

$$\langle T_{SYM^*} \rangle = \frac{\langle T_O \rangle}{2}.$$

**Доказательство.** Пусть функция распределения  $F(t)$  соответствует дискретному распределению  $f_t$  длительности  $T_O$  интервалов, в которые процесс  $J_{OL}^{(B)}(t)$  находится в состоянии  $O$ .

Пусть в момент  $t_0$  процесс  $J_{SYM^*}(t)$  перешел в состояние  $SYM^*$ . Не нарушая общности, предположим, что в этот момент процесс  $J_{OL}^{(A)}(t)$  перешел в состояние  $O$ , а процесс  $J_{OL}^{(B)}(t)$  уже находился в состоянии  $O$ . Рассмотрим интервал времени, который включает  $t_0$ , и в течение которого процесс  $J_{OL}^{(B)}(t)$  находится в состоянии  $O$ . Условная вероятность того, что этот интервал имеет длительность  $\tau$ , при условии, что  $t_0$  принадлежит этому интервалу, равна  $\frac{\tau f_\tau}{\langle T_O \rangle}$ .

Так как процессы  $J_{OL}^{(A)}(t)$  и  $J_{OL}^{(B)}(t)$  независимы,  $t_0$  равновероятно соответствует любой точке этого интервала, поэтому плотность  $g(t)$  вероятности того, что оставшаяся часть интервала имеет длительность  $t$ , равна

$$g(t) = \sum_{\tau \leq t} \frac{\tau f_\tau}{\langle T_O \rangle} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{(1 - F(t))}{\langle T_O \rangle}.$$

Плотности распределения  $g(t)$  соответствует функция распределения

$$G(t) = \frac{1}{\langle T_O \rangle} \int_0^t (1 - F(x)) dx.$$

Выход процесса  $J_{SYM^*}(t)$  из состояния  $SYM^*$  произойдет по первому выходу из состояния  $O$  хотя бы одного из процессов  $J_O^{(A)}(t)$  и  $J_O^{(B)}(t)$ . следовательно, вероятность того, что длительность состояния  $SYM^*$  будет больше  $x$ , равна

$$(1 - F(x)) \cdot (1 - G(x)),$$

откуда по свойствам неотрицательных случайных величин [11] имеем:

$$\langle T_{SYM^*} \rangle = \int_0^{\infty} (1 - F(x))(1 - G(x)) dx.$$

Так как  $\frac{d}{dx}(1 - G(x)) = -\frac{1 - F(x)}{\langle T_O \rangle}$ , получаем:

$$\langle T_{SYM^*} \rangle = -\frac{\langle T_O \rangle}{2} \cdot (1 - G(x))^2 \Big|_0^{\infty} = \frac{\langle T_O \rangle}{2},$$

что и требовалось доказать.

Таким образом,

$$\langle T_{SYM^*} \rangle = \frac{\langle T_O \rangle}{2} = \frac{1 - (1 - p)^s}{2p(1 - p)^s}. \quad (11)$$

Применяя (5)–(11), находим значения искомым показателей эффективности NHDP.

## 4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

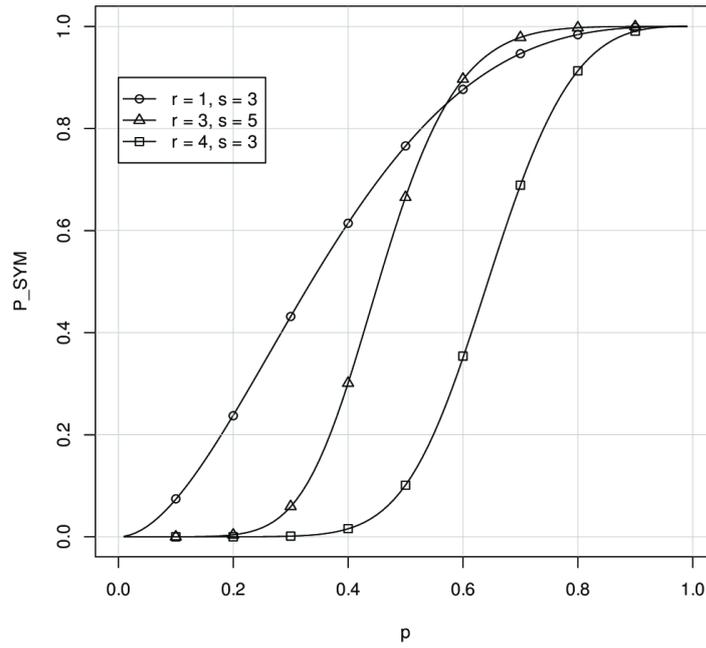
### 4.1. Оценка точности моделей

Чтобы оценить точность разработанной аналитической модели, проведено сравнение ее результатов с результатами, полученными при имитационном моделировании в среде ns-3 [12]. В ходе имитационного моделирования рассматривалась пара Wi-Fi-станций со стандартными значениями параметров протокола канального уровня, соответствующими стандарту IEEE 802.11a [13]. Станции находились на таком расстоянии друг от друга, что вероятность успешной попытки передачи пакета была равна  $p$ . Состояние соединения наблюдалось в течение 20000 секунд, что соответствует  $10^4 HELLO\_INTERVAL$ . Для получения статистически значимых результатов было проведено 50 прогонов, в ходе которых получены значения  $\langle T_{SYM} \rangle$  и  $P_{SYM}$ . Из рис. 2 и 3 видно, что при  $p > 0,5$  результаты аналитического моделирования (линии) с высокой точностью соответствуют результатам имитационного моделирования (точки).

Значительные расхождения результатов имитационного и аналитического моделирования наблюдаются для  $\langle T_{SYM} \rangle(p)$  в области низких значений вероятности  $p$  успешной передачи пакета, однако это область значений  $p$ , как правило, не представляет интереса при настройке МУС, так как при низких  $p$  соединения открываются с малой вероятностью.

### 4.2. Настройка МУС

Задавшись значениями периода  $T_{update}$  рассылки информации о соединениях и времени  $T_{NetTraversal}$ , необходимого для распространения этой информации по всей сети, а также пороговой вероятностью  $p_0$  успешной попытки передачи пакета, воспользуемся построенными моделями для настройки МУС. На первом шаге определим множество наборов значений параметров протокола, которые обеспечивают заданный порог  $p_0$  согласно требованию (2). Вообще говоря, это множество бесконечно, но, как будет показано ниже, его



**Рис. 2.** Сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования зависимости  $P_{SYM}(p)$  при различных значениях параметров протокола

можно ограничить. На втором шаге в полученном множестве найдем подмножество, гарантирующее выполнение требования (2) стабильности соединений. Наконец, на третьем шаге из полученного подмножества выберем единственное решение, согласно требованию (4). Поскольку выбранное решение соответствует минимальному значению  $r$ , то на первом шаге не имеет смысла рассматривать сколь угодно большие значения  $r$ , поэтому с самого начала введем разумное ограничение сверху на область допустимых параметров.

Проиллюстрируем описанный выше способ на конкретном примере. Пусть  $p_0 = 0,5$ ,  $T_{update} = 4$ , а  $T_{NetTraversal} = 16$  периодов рассылки HELLO-сообщений. На первом шаге с помощью построенной модели по формулам (5), (6), (7)–(11) найдем для различных параметров МУС значения  $p_0$ , после чего выберем те пары значений  $(r, s)$ , для которых выполняется приближенное равенство  $P_{SYM} \approx P_{SYM_0} \Leftrightarrow |p - p_0| \leq 0,01$ . Требовать выполнения точного равенства для данного  $p_0$  не имеет смысла, так как  $r$  и  $s$  – натуральные числа. Ограничимся значениями  $r, s \leq 10$ . Результаты приведены в табл. 1, из которой видно, что для обеспечения  $p_0 = 0,5 \pm 0,01$  следует выбрать следующие пары параметров  $(r, s)$ : (2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 6), (6, 7), (7, 8), (8, 9), (9, 10).

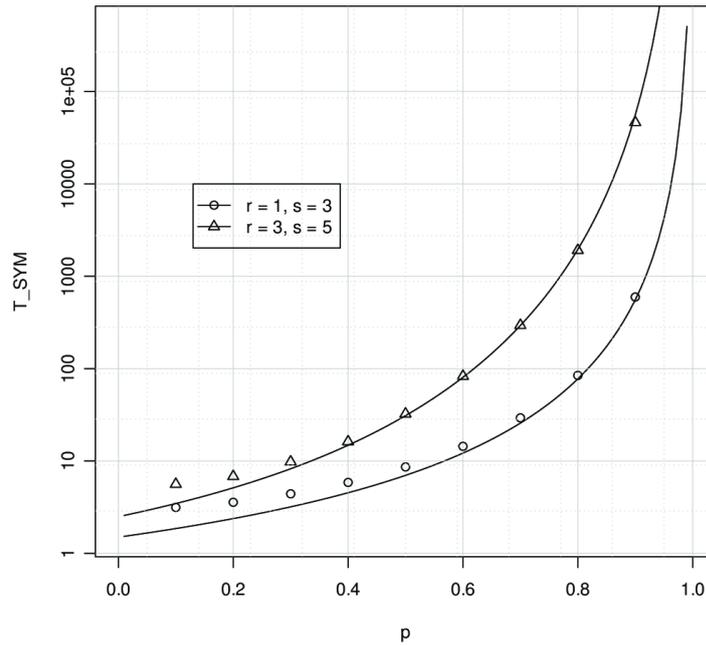
На втором шаге, учитывая значения  $T_{update}$  и  $T_{NetTraversal}$ , из (2) получаем  $g < 0,05$ .

При помощи аналитических моделей получим графики  $g(P_{SYM})$  при различных параметрах протокола (см рис. 4). Согласно (2) кривые, соответствующие допустимым значениям параметров МУС, должны находиться ниже прямой  $g = 0,05$ .

На третьем шаге, выбирая из допустимых наборов параметров протокола набор с минимальным  $r$ , получаем  $r = 3, s = 4$ . Эти параметры обеспечивают наивысшую эффективность МУС, определенную согласно разделу 2.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная в данной работе аналитическая модель может быть использована для оценки показателей эффективности протокола NHDP и для выбора значений параметров протокола. В работе исследуется только одна из стратегий принятия решения об изменении



**Рис. 3.** Сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования  $\langle T_{SYM} \rangle(p)$  при различных значениях параметров протокола

$r \setminus s$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,71	0,46	0,34	0,26	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12
2	0,84	0,63	0,50	0,42	0,37	0,33	0,30	0,27	0,25	0,23
3	0,89	0,71	0,59	0,51	0,45	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30
4	0,92	0,75	0,64	0,57	0,51	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36
5	0,93	0,79	0,68	0,61	0,55	0,51	0,47	0,44	0,42	0,40
6	0,94	0,81	0,71	0,64	0,59	0,54	0,51	0,48	0,45	0,43
7	0,95	0,83	0,73	0,67	0,61	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46
8	0,96	0,84	0,75	0,69	0,64	0,59	0,56	0,53	0,51	0,48
9	0,96	0,85	0,77	0,70	0,65	0,61	0,58	0,55	0,53	0,51
10	0,97	0,86	0,78	0,72	0,67	0,63	0,60	0,57	0,55	0,52

**Таблица 1.**  $p_0$  для различных  $r$  и  $s$

состояния соединения. В спецификации OLSR описывается еще одна стратегия, основанная на вычислении экспоненциально сглаженной доли полученных HELLO-сообщений. Исследованию эффективности такой стратегии будет посвящена дальнейшая работа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jacquet P., Clausen T. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). *IETF*, October 2003. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
2. Ogier R., Templin F., Lewis M. Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF). *IETF*, February 2004. <http://tools.ietf.org/html/rfc3684>

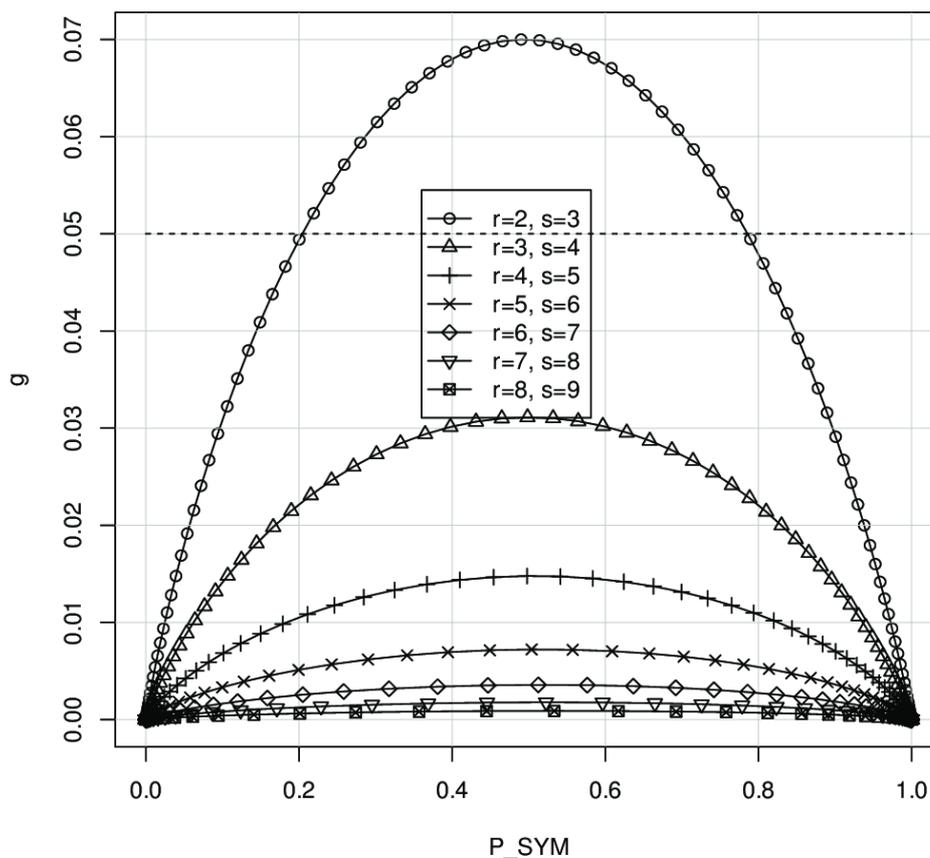


Рис. 4.  $g(p)$  для различных  $r, s$

3. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. *IETF*, July 2003. <http://tools.ietf.org/html/rfc3561>
4. IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999), IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment: Mesh Networking. *IEEE*, 2011.
5. Clausen T., Dearlove C., Dean J. Mobile Ad Hoc Network (MANET) Neighborhood Discovery Protocol (NHDP). *IETF*, April 2011. <http://tools.ietf.org/html/rfc6130>
6. Huang Y.C., Bhatti S., Parker D. Tuning OLSR. *Proc. PIMRC2006 - The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. Helsinki, Finland, 2006.
7. Voorhaen M., Blondia C. Analyzing the Impact of Neighbor Sensing on the Performance of the OLSR protocol. *Proceedings of 4th Intl. Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt06)*. Boston, Massachusetts, 2006.
8. Nayebe A., Karlsson G., Sarbazi-Azad H. Evaluation and design of beaconing in mobile wireless networks. *Ad Hoc Networks*, 2011, vol. 9, no. 3, pp. 368-386.

9. Кирьянов А.Г., Ляхов А.И., Сафонов А.А., Хоров Е.М. Метод оценки эффективности механизмов управления соединениями в беспроводных самоорганизующихся сетях. *Автоматика и телемеханика*, 2012, № 5, стр. 39–56.
10. Jelencovic P., Momcilovic P. Asymptotic loss probability in a finite buffer fluid queue with heterogeneous heavy-tailed On-Off processes. *Annals of Applied Probability*, 2003, vol. 13, no. 2, pp. 576–603.
11. Феллер В. *Введение в теорию вероятностей и ее приложения*. М.: Мир, 1984, том 2.
12. The ns-3 network simulator. <http://www.nsnam.org/>
13. IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999), IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE*, 2007.