

УДК 004.057.4:004.051

С.А. Даденков¹, Е.Л. Кон¹, А.А. Даденков²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²Пермский научно-исследовательский технологический институт,
Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ СЛОТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТИ СО СЛУЧАЙНЫМ МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ

Выполнено исследование характеристик информационно-управляющей сети с алгоритмом случайного множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий путём прогнозирования сетевой загрузки канала predictive p-persistent CSMA. Существенным преимуществом алгоритма по сравнению с другими алгоритмами класса случайного множественного доступа является динамическая адаптивность уровня настойчивости передачи к загруженности канала. Это достигается с помощью развитого механизма прогнозирования ожидаемой сетевой нагрузки на каждый цикл передачи данных. Результатом является снижение времени доступа к каналу при низкой загрузке и снижение вероятности коллизии данных при высокой загрузке. Широкое распространение алгоритм получает в fieldbus-сетях, в том числе сенсорных и промышленных сетях LonWorks и BacNet. Литературный обзор показывает интерес мирового сообщества к применению алгоритма, для чего активно ведутся исследования и модернизации составляющих его механизмов. Целью настоящей работы является исследование влияния закона распределения числа слотов соперничества за доступ к каналу на вероятностные и временные характеристики передачи данных в сети с исследуемым слотовым алгоритмом доступа. В работе представлено краткое описание принципов функционирования исследуемого алгоритма доступа и описана структура разработанной и используемой модели в среде имитационного моделирования AnyLogic. Проведены необходимые имитационные эксперименты функционирования сети с сервисами надежной и ненадежной доставки сообщений при трёх различных законах выбора слотов соперничества (равномерный, нормальный, экспоненциальный). Выполнен анализ полученных характеристик функционирования сети и сделаны выводы о влиянии законов выбора слотов доступа на продолжительность передачи и вероятность потери данных при различной загруженности сетевого канала и разных сервисах доставки. Сформулированы рекомендации по целесообразности применения различных законов выбора слотов доступа.

Ключевые слова: случайный множественный доступ, вероятностные и временные характеристики, информационно-управляющая сеть, распределение слотов доступа, LonWorks, predictive p-persistent CSMA.

S.A. Dadenkov¹, E.L. Kon¹, A.A. Dadenkov²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm Technological Research Institute, Perm, Russian Federation

INVESTIGATION THE EFFECT OF THE DISTRIBUTION OF TIME SLOTS ON THE CHARACTERISTICS OF A NETWORK WITH RANDOM MULTIPLE ACCESS

The article studies the characteristics of an information control network with a random multiple access algorithm with carrier control and collision avoidance by predicting the network load of the predictive p-persistent CSMA channel. A significant advantage of the algorithm in comparison with other algorithms of the class of random multiple access is the dynamic adaptability of the transmission persistence level to the channel load. This is achieved using an advanced mechanism for predicting the expected network load for each data transfer cycle. The result is a decrease in channel access time at low load and a reduced likelihood of data collisions at high load. The algorithm is widely used in fieldbus networks, including the sensor and industrial networks of LonWorks and BacNet. A literary review shows the interest of the world community in the application of the algorithm, for which research and modernization of its mechanisms are actively conducted. The purpose of this work is to study the influence of the law of the distribution of the number of slots of competition for access to a channel on the probabilistic and temporal characteristics of data transmission in a network with the slot access algorithm studied. The paper presents a brief description of the principles of operation of the studied access algorithm and describes the structure of the developed and used model in the simulation environment AnyLogic. The necessary simulation experiments of the functioning of the network with the services of reliable and unreliable message delivery were carried out using three different laws for choosing the slots of rivalry (uniform, normal, exponential). The analysis of the obtained characteristics of the network operation is made and conclusions are made about the impact of the laws of choice of access slots on the duration of transmission and the probability of data loss during various network channel loads and delivery services. Recommendations are formulated on the expediency of applying various laws for choosing access slots.

Keywords: random multiple access, probabilistic and temporal characteristics, information control network, distribution of access slots, LonWorks, predictive p-persistent CSMA.

Введение. Алгоритмы случайного множественного доступа с контролем несущей широко распространены и применяются в сетях с разделяемой (общей) средой передачи данных. В настоящее время случайный доступ к каналу успешно применяется в проводных промышленных, сенсорных (Fieldbus) и беспроводных децентрализованных самоорганизующихся сетях связи (MANET). Преимуществом случайного доступа над детерминированным является возможность обеспечения меньших временных задержек доступа и передачи данных по сети. Это возможно за счёт организации передачи информации только в необходимые моменты времени, а не распланированные заранее принятым «расписанием». Известно, что использование случайного доступа эффективно при значении коэффициента использования пропускной

способности каналов связи менее 0,5 [1–4]. В иных случаях методы детерминированного доступа имеют преимущественное применение за счёт гарантированности интервалов доставки данных и высокой предсказуемости максимальной величины задержки доступа и передачи.

Существует большое множество различных алгоритмов случайного множественного доступа с контролем несущей, предотвращением и избеганием коллизий. В fieldbus-сетях нашли применение: CSMA/NBA (промышленные шины CAN, KNX/EIB, DeviceNet), 1-CSMA/CD (EtherNet/IP, ModBus/TCP), predictive p-Persistent CSMA (BacNet, LonWorks). Алгоритмы отличаются эффективностью (времени и надёжности передачи) обеспечения информационного обмена в сети при различных: загруженности каналов сети, количестве узлов, периодичности/спорадичности сетевой нагрузки и других параметрах. Передаваемый в анализируемых сетях трафик имеет «взрывной» спорадический характер. Это актуализирует исследование и применение алгоритмов, самоадаптирующихся к изменяющемуся уровню загрузки сетевого канала, в частности, алгоритма с прогнозированием нагрузки predictive p-persistent CSMA. Данные алгоритмы обеспечивают высокий уровень полезной пропускной способности канала [3, 4].

Научным сообществом выполняется множество научно-исследовательских работ, посвященных изучению влияния параметров алгоритмов доступа на вероятностные и временные характеристики передачи данных в информационно-управляющих сетях [5–20]. В работе [5] изучается KNX-технология, в [6–10] CAN-шина, DeviceNet [11], в [12–20] выполняется анализ характеристик сетей с адаптивным протоколом, в частности, сети LonWorks с исследуемым в работе алгоритмом доступа. Работы посвящены изучению сетевых характеристик и созданию рекомендаций по выбору протокольных параметров алгоритмов доступа для обеспечения малой временной задержки передачи с требуемым уровнем надёжности доставки данных. В настоящей работе изучается вопрос влияния различных законов распределения (выбора) числа слотов доступа к каналу связи на характеристики передачи. Данный вопрос уже рассматривался ранее в работах Marek Miśkiewicz [12–15]. В указанных источниках изучалось влияние параметров геометрического распределения и были получены результаты для предельного случая функционирования сети в режиме насыщения канала [13]. Полученные результаты малоприспособны для типовых режимов функционирования се-

тей связи с принятой допустимой загрузкой канала, не превышающей значения 0,5 [1, 2]. Поэтому в настоящей работе изучаются вопросы влияния основных законов распределения слотов соперничества узлов за канал (экспоненциального, нормального, равномерного) на характеристики сетевого обмена при различной загруженности сетевого канала. Итогом работы являются количественная оценка характеристик сетевого обмена и анализ преимуществ и недостатков применения различных распределений выбора слотов соперничества исследуемого алгоритма множественного доступа predictive p-persistent CSMA.

1. Модель алгоритма множественного доступа. Передача данных в сети с алгоритмом доступа predictive p -persistent CSMA осуществляется в синхронных пакетных циклах (рис. 1), включающих [2]:

1) минимальный межпакетный интервал времени β_1 проверки отсутствия активности в канале связи;

2) приоритетный интервал, равный числу приоритетных тайм-слотов доступа, продолжительностью β_2 каждый;

3) случайный интервал доступа T , равный случайному количеству слотов доступа продолжительностью β_2 , выбираемых по равномерному закону из диапазона $[0..W-1]$, где ширина соревновательного окна $W = W_{base} \cdot BL$, базовая ширина соревновательного окна $W_{base} = 16$, прогнозируемая на канал нагрузка (backlog) $BL = [1..64]$ регулирует уровень настойчивости узлов сети;

4) задержка передачи пакета, равная продолжительности передачи PL бит данных по каналу с пропускной способностью C .

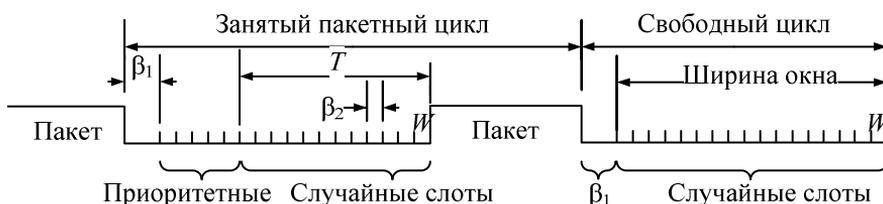


Рис. 1. Структуры пакетных циклов

При выборе узлами равного числа слотов доступа и одновременной передаче возникает коллизия, которая приводит к потере сообщения при ненадёжной передаче без повторения или повторной передаче данных при использовании надёжного сервиса доставки с подтверждением. Повышение вероятности предотвращения коллизии в следующий пакетный цикл требует увеличения на 1 прогнозируемой нагрузки [2].

Успешный или свободный пакетный цикл завершается снижением узлами прогнозируемой на канал нагрузки на единицу для сокращения времени доступа в следующий пакетный цикл. Прогнозирование нагрузки выполняется узлами сети синхронно в конце каждого пакетного цикла и также зависит от количества сообщений, ожидаемых к передаче в ответ на переданное сообщение (содержится в служебной информации пакета). Таким образом, для сообщений, не требующих подтверждения, дополнительная нагрузка равна 0, а для одноадресных сообщений, требующих подтверждения, нагрузка равна 1.

Модель алгоритма случайного множественного доступа разработана [20] в среде имитационного моделирования AnyLogic. Модель построена с использованием агентного моделирования и имеет иерархическую структуру вложенных объектов: канал сети, узлы, сообщения. В момент запуска модели на исполнение формируются структуры и выполняется инициализация параметров канала и узлов сети. Модель основного объекта-узла показана на рис. 2 и воспроизводит функциональность временной диаграммы работы алгоритма доступа и передачи (см. рис. 1).

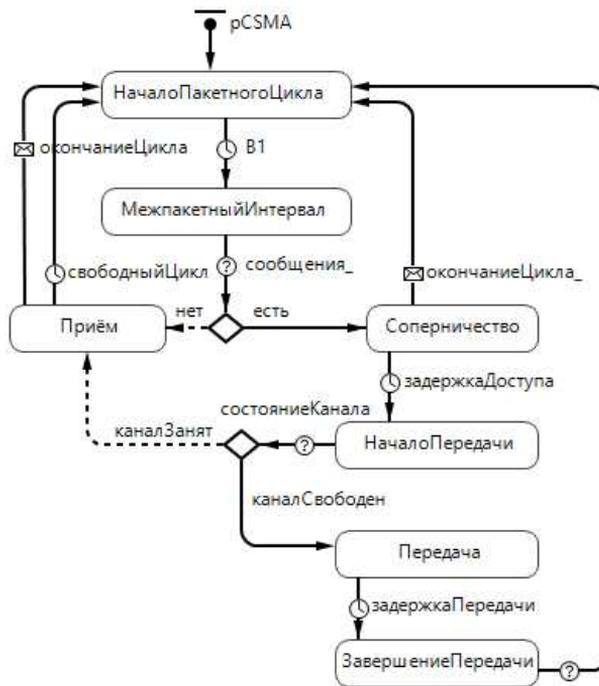


Рис. 2. Диаграмма состояний и переходов модели алгоритма доступа и передачи

Каждый узел функционирует независимо от других узлов, но в зависимости от синхронизма пакетных циклов и состояния общего канала связи. Модели алгоритмов доступа p-persistent CSMA с и без прогнозирования отличаются только изменением нагрузки в состоянии «НачалоПакетногоЦикла» (см. рис. 2).

В процессе функционирования модели в случайные моменты времени узлами выполняется генерация сообщений для передачи. Модель генерации:

- каждый узел имеет независимый источник генерации сообщений;
- интенсивности генерации сообщений узлов сети равны;
- приоритеты узлов и сообщений равны, т.е. воспроизводится равноправное соперничество;
- интервалы времени между формированием сообщений распределены по экспоненциальному закону.

Представленная модель генерации сообщений позволит исследовать характеристики сети в режиме наивысшей загрузки с выбранными параметрами.

Принципы генерации и обработки сообщений зависят от типа моделируемого сервиса доставки сообщений. При использовании сервиса передачи без подтверждения передача завершается удалением исходного сообщения безотносительно к результатам пакетного цикла. При передаче сообщения, требующего подтверждения: узел-источник сохраняет исходное сообщение, получатель исходного сообщения генерирует и передаёт ответное сообщение; источник ждёт получения ответного сообщения, и удаляет исходное сообщение, в случае отсутствия подтверждения за время таймера ожидания узел осуществляет повторную передачу сообщения (ограниченное число раз). Передача ответного сообщения характеризуется нулевым количеством повторных попыток передач.

Разработанная модель преимущественно отличается от аналогов [12–16] корректным учётом ранее не анализируемых в моделях для исследуемого алгоритма значимых протокольных факторов функционирования, таких как таймеры и счетчики повторной передачи сообщений, параметры и принципы обработки сообщений различных типов и сервисов доставки.

2. Исследование модели алгоритма доступа. Исследование модели алгоритмов доступа predictive p-persistent CSMA и p-persistent

CSMA выполняется с тремя разными законами выбора числа слотов доступа к каналу связи: равномерное, нормальное, экспоненциальное. Исследование выполняется при следующих исходных данных:

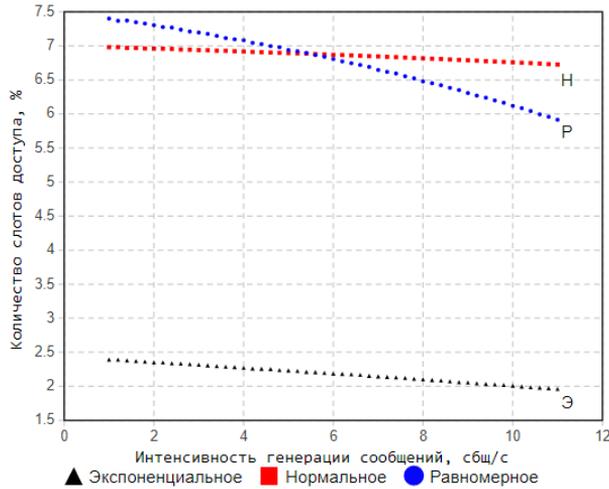
- топология сети – общая шина;
- среда передачи – витая пара TP/FT-10 с пропускной способностью $C = 78,125$ Кбит/с,
- временные параметры доступа – $\beta_1 = 868$ мкс, $\beta_2 = 168$ мкс;
- базовая ширина соревновательного окна – $W = 16$;
- число узлов в канале сети – $N = 20$;
- интенсивность нагрузки – λ (сообщений/с) варьируется для анализа характеристик сети на всём диапазоне загрузки канала;
- сервисы доставки – с подтверждением и без него;
- средний размер сетевого сообщения LonWorks – $PL = 12$ байт;
- количество повторных попыток передачи для сервиса с подтверждением – 3;
- таймер ожидания ответного сообщения – 30 мс.

Получаемые в ходе исследования результаты носят общий характер для различных сред передачи ввиду пропорциональности параметров доступа, но могут отличаться для различных промышленных сетей с различным соотношением продолжительности доступа и передачи данных. В процессе исследования выполняется количественная оценка характеристик:

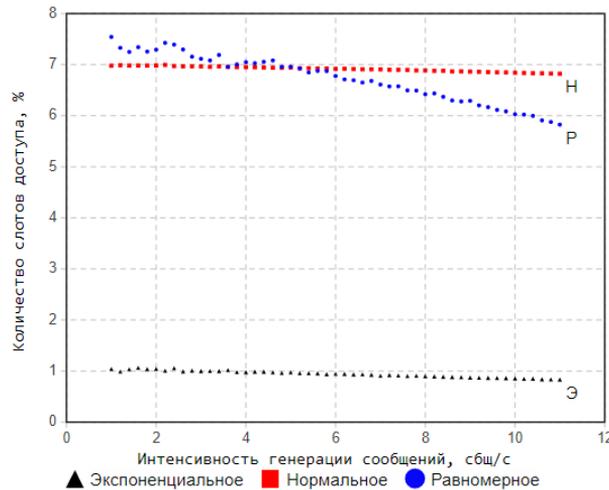
- число слотов доступа при успешной и неудачной (коллизии) передаче, которые иллюстрируют уровень задержки доступа (задержка передачи постоянна и равна времени распространения сигнала в линии связи и буферизации на приёмнике);
- вероятность потери сообщения;
- загрузка канала.

Результаты оценки характеристик модели алгоритма доступа для сервиса ненадежной доставки (без подтверждения) приведены на рис. 3 и 4. Анализ результатов нормального и экспоненциального законов распределения слотов показывает взаимно противоположные результаты по анализируемым характеристикам. Нормальный закон распределения иллюстрирует большое число слотов доступа при успешной и неудачной передаче (коллизии) за счёт сосредоточенности случайных слотов, выбираемых узлами в узком диапазоне в середине соревновательного окна $[1..W]$. Экспоненциальный закон, напротив,

иллюстрирует очень малое число слотов доступа (см. рис. 3), поскольку выбор слотов смещён к началу соревновательного окна. Это определяет малое время доступа и наименьшую загруженность канала среди анализируемых распределений (см. рис. 4, б). Тем не менее экспоненциальное распределение не обеспечивает наименьшую вероятность потери в сети (см. рис. 4, а). Это обусловлено плотностью экспоненциального распределения слотов соперничества на интервале доступа.



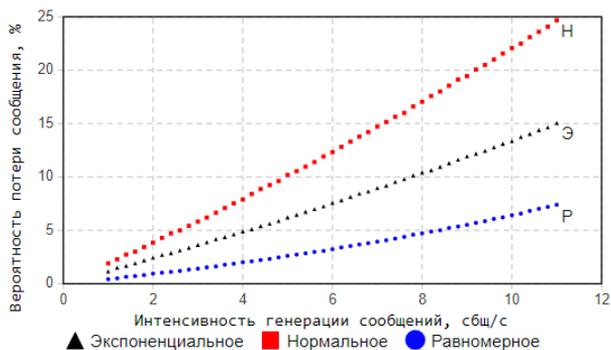
а



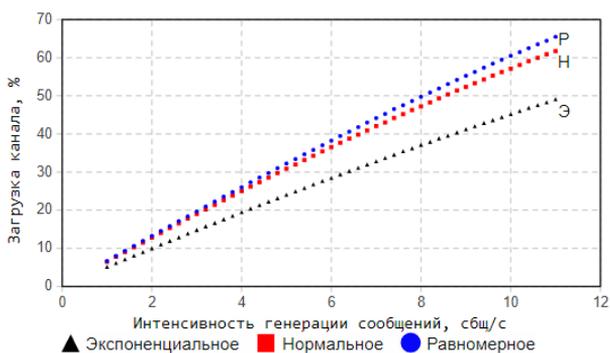
б

Рис. 3. Количество слотов доступа:
а – при успешной передаче; б – при коллизии

Экспоненциальный закон обеспечивает сосредоточенность выбора слотов в начале окна доступа, за счёт чего вероятность коллизии на начальных слотах также возрастает и приводит к высокой вероятности потери данных в случае использования сервиса ненадежной доставки.



а



б

Рис. 4. Характеристики передачи данных: a – вероятность потери; b – загрузка канала

Таким образом, нормальное и экспоненциальное распределения иллюстрируют граничные характеристики механизма доступа. Наихудшие результаты характеристик доступа наблюдаются на всём диапазоне загруженности канала при нормальном распределении. Распределение характеризуется наибольшей вероятностью потери сетевого сообщения и высокой загрузкой канала, обеспечивая наименьшую полезную пропускную способность сетевого канала. Равномерное распределение, напротив, показывает наименьшую вероятность потери сообщения, поскольку слоты распределяются равномерно по ширине окна, снижая вероятность коллизии. Данное преимущество равномерного распределения определяет его недостаток – наибольшую загрузку канала, близкую к величине

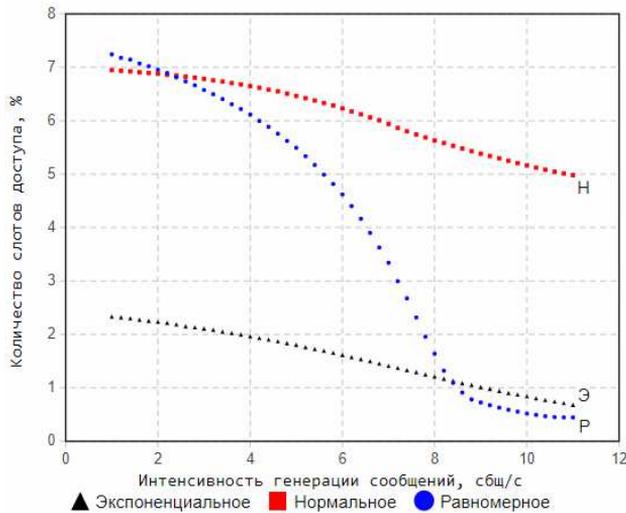
нормального распределения. Таким образом, для обеспечения надёжности передачи в сети с сервисом ненадёжной доставки целесообразно использовать равномерное распределение. Для обеспечения наименьших временных затрат доступа и передачи может быть использован экспоненциальный закон выбора числа слотов доступа, но не рекомендуется по причине высокой вероятности потери информации, превышающей величину, свойственную равномерному распределению. Полученные результаты моделирования совпадают для алгоритмов р-persistent CSMA с и без прогнозирования нагрузки на канал сети, что свидетельствует о малом влиянии механизма прогнозирования в рабочем режиме функционирования сети с загрузкой канала до 50 %. Результаты оценки характеристик модели алгоритма доступа для сервиса надёжной доставки (с подтверждением) приведены на рис. 5 и 6.

Сравнительный анализ результатов моделирования, полученных для сервисов надёжной и ненадёжной доставки, иллюстрирует схожесть характера, но различие в динамике изменения анализируемых характеристик (рис. 3–6).

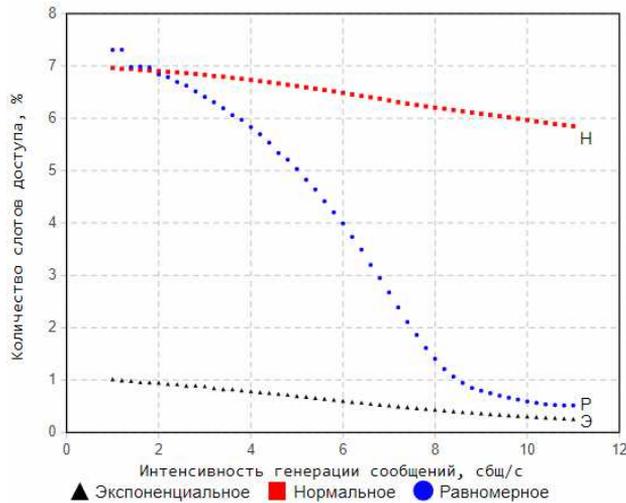
Сервис надёжной доставки характеризуется наличием в сети трафика ответных сообщений, что значительно увеличивает загруженность канала (см. рис. 6, б) в сравнении с ненадёжной доставкой (см. рис. 4, б). При использовании сервиса ненадёжной доставки загрузка канала в 60 % достигается только при нагрузке от одного сетевого узла, равной 10 сообщений в секунду (см. рис. 4, б), а для сервиса надёжной доставки величина полезной нагрузки составляет 4 сообщения в секунду (см. рис. 6, б). Увеличение скорости насыщения (загрузки) канала с ростом интенсивности нагрузки приводит к аналогичному росту скорости изменения и других характеристик – числа слотов доступа при передаче и вероятности потери сообщений. При этом характер изменения числа слотов доступа для нормального и экспоненциального распределений аналогичен для различных сервисов доставки. Равномерный закон распределения для различных сервисов доставки иллюстрирует разный характер изменения числа слотов доступа. Это объясняется резким ростом загруженности сетевого канала, при котором средний номер слота доступа при успешной и неудачной передаче в канале смещается от среднего значения $(W-1)/2$ к 1 с приближением загруженности канала к 100 % (см. рис. 6, б).

Механизмы, обеспечивающие гарантированность доставки данных, приводят к повышению загрузки канала связи, что отрицательно влияет на надёжность передачи. С одной стороны, повторные передачи уменьшают вероятность потери сообщения (повышают вероятность

доставки исходного сообщения). С другой стороны, это приводит к росту нагрузки на сеть, увеличению объёма сетевого трафика и соответственно увеличению вероятности коллизии сообщений, уменьшению полезной пропускной способности канала. Таким образом, можно сделать вывод, что сервис надежной доставки эффективен для применения в случаях, когда отрицательная составляющая влияния дополнительных передач меньше положительной.

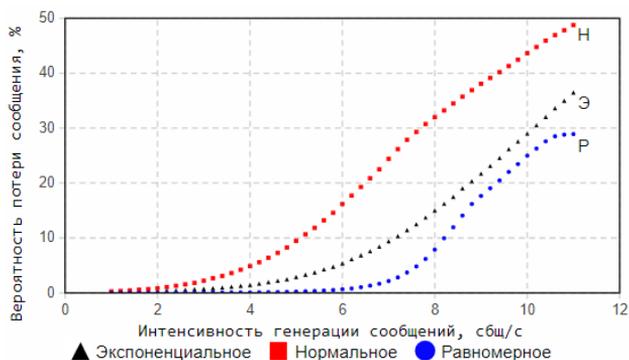


а

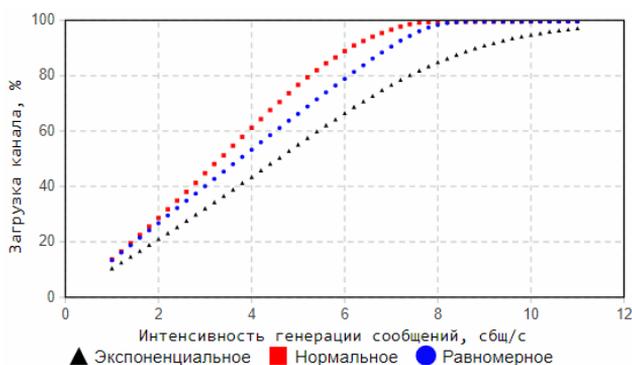


б

Рис. 5. Количество слотов доступа:
 а – при успешной передаче, б – при коллизии



а



б

Рис. 6. Характеристики передачи данных:
а – вероятность потери; б – загрузка канала

При сравнении графиков вероятности потери сообщений с сервисами надежной и ненадежной передачи (см. рис. 4, а и б, а) можно отметить, что наименьшая вероятность потери данных наблюдается для сервиса надежной передачи до нагрузки от узла в 6 сообщений в секунду, что соответствует полезной загрузке канала 40 % (загрузке, учитывающей время передачи только полезных данных, см. рис. 4, б). После данного уровня нагрузки дополнительный трафик резко возрастает, что приводит к экспоненциальному росту загрузки канала, вероятности коллизии и, как следствие, вероятности потери информации. При полезной загрузке выше 40 % использование сервиса надежной доставки нецелесообразно, и в таком случае возможно применение сервиса ненадежной доставки (см. рис. 4, а).

Наименьшее число слотов доступа и загруженность канала сети с сервисом надежной доставки характерны для экспоненциального

распределения. Тем не менее надежность доставки распределения хуже, чем равномерного. Это обусловлено использованием при экспоненциальном распределении большего числа попыток до успешной передачи, завершение которых приводит к его удалению, т.е. к неудачной доставке. Таким образом, несмотря на наименьшее число слотов доступа экспоненциального распределения, нельзя сделать вывод о свойственном ему меньшем времени доставки в сети по сравнению с равномерным распределением. Это требует дополнительной оценки числа попыток передач сообщения до его успешной доставки.

Поэтому далее в работе примем, что время доступа до успешной передачи экспоненциального распределения меньше равномерного при низкой загрузке канала (когда отсутствуют коллизии и потери) и продолжительность доставки распределений практически равна при большей загруженности, когда использование экспоненциального распределения сокращает время доступа, но увеличивает итоговую продолжительность доставки большим числом попыток передачи. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности использования экспоненциального распределения на этапе до 10 % полезной загрузки канала (2 сообщения в секунду от узла анализируемой сети, см. рис. 6, *а*) и равномерного распределения в интервале полезной загрузки 10–40 % (см. рис. 4, *б*), что соответствует нагрузке до 6 сообщений в секунду (см. рис. 6, *б*).

Выводы. По результатам моделирования алгоритмов с прогнозированием нагрузки на сетевой канал и без него получены одинаковые результаты оценки сетевых характеристик. Это подтверждает малую значимость механизма прогнозирования нагрузки в сети с полезной загруженностью канала до 50 % для различных сервисов доставки.

Анализ полученных в работе результатов позволяет сформулировать рекомендации по выбору законов распределения слотов соперничества изучаемых алгоритмов доступа. Сервис без подтверждения может успешно применяться на всём диапазоне загруженности сетевого канала, при этом целесообразно использовать равномерное распределение, обеспечивающее наименьшую вероятность потери данных. Сервис надежной доставки может эффективно использоваться при полезной загрузке канала до 40 %. При этом с загрузкой канала до 10 % целесообразно использование экспоненциального распределения, обеспечивающего малое время доступа и вероятность потери, аналогичную равномерному распределению. В диапазоне загрузки 10–40 % целесо-

образно использование равномерного распределения, для которого характерна наименьшая вероятность коллизий, число повторных попыток передач сообщений, следовательно, наименьшее среднее время доставки сообщений и вероятности потери.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00070 «Алгоритмы проектирования информационно-управляющих сетей LonWorks с требуемыми вероятностными и временными характеристиками».

Библиографический список

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учеб. для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.
2. Control Network Protocol Specification (ANSI/CTA-709.1-D). – United States, 2014. – URL: <https://webstore.ansi.org/standards/cea/cea7092014ansi> (дата обращения: 02.12.2018).
3. Дитрих Д., Лой Д., Швайндер Г.Ю. LON-технология, построение распределенных приложений: пер. с нем. / под ред. О.Б. Низамудинова. – Пермь: Звезда, 1999. – 242 с.
4. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб.: БХВ, 2005. – 288 с.
5. Köhler W. Simulation of a KNX network with EIBsec protocol extensions: building a KNX network with a simulation framework // VDM Verlag Dr. Müller. – Saarbrücken, 2010. – 140 p.
6. Hong S.H., Kim W.H. Bandwidth allocation scheme in the CAN protocol // Control Theory and Applications: IEEE Proc. – 2000. – Vol. 147. – P. 37–44. DOI: 10.1007/s12555-010-0415-1
7. Hong S.-H., Lee J.-H. A bandwidth allocation scheme in fieldbuses // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2010. – № 8(4). – P. 831–840.
8. Lian F.-L., Moyne J.R., Tilbury D.M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. Technical Report: UM-MEAM-99-02. – 1999. – URL: <http://www-personal.umich.edu/~tilbury/papers/lmt99csm.pdf> (дата обращения: 28.09.2016).
9. Tindell K., Burns A., Wellings A.J. Calculating controller area network (CAN) message response times // Control Engineering Practice. – 1995. – Vol. 3, iss. 8. – P. 1163–1169. DOI: 10.1016/0967-0661(95)00112-8

10. Mary G.I., Alex Z.C., Jenkins L. Response Time Analysis of Messages in Controller Area Network: A Review // *Journal of Computer Networks and Communications*. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–11. DOI: 10.1155/2013/148015

11. Wen Li, Xiangyu Dai. Performance Evaluation Analysis about Ethernet and DeviceNet // *Internet of Things. Communications in Computer and Information Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. – Vol. 312–P. 64–69. DOI: 10.1007/978-3-642-32427-7_9

12. Moshe K. Collision resolution simulation for distributed control architectures using LonWorks // *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. – Edmonton, 2005. – P. 319–326.

13. Miśkiewicz M. Analysis of mean access delay in variable-window CSMA // *Sensors. Schweiz: Molecular Diversity Preservation International*. – 2007. – Vol. 7. – P. 3535–3559.

14. Miśkiewicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol // *Computer Standards & Interfaces*. – Nederland: Elsevier Science Publishing Company, 2009. – Vol. 31(3). – P. 548–556. DOI: 10.1016/J.CSI.2008.03.025.

15. Miśkiewicz M. Average Channel Utilization of CSMA With Geometric Distribution Under Varying Workload // *IEEE Transactions on industrial informatics*. – 2009. – Vol. 5. – № 2. – P. 123–131. DOI: 10.1109/TII.2009.2017524

16. Buchholz P., Plonnigs J. Analytical analysis of access-schemes of the CSMA type // *Proc. of IEEE International Workshop on Factory Communication Systems WFCS*. – 2004. – Wien, 2004. – P. 127–136.

17. Степанов С.Н., Цитович И.И. Оценка вероятностных характеристик моделей с повторными вызовами // *Модели распределения информации и методы их анализа: тр. X Всесоюз. шк.-сем. по теории телеграфика*. – М., 1988. – С. 4–12.

18. Назаров А.А., Кузнецов Д.Ю. Исследование сети связи, управляемой адаптивным протоколом случайного множественного доступа, в условиях критической загрузки // *Проблемы передачи информации*. – 2004. – № 3. – С. 69–80.

19. Dadenkov S.A. The simulation of p-persistent CSMA algorithm of unequal random multiple access // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2018. – № 2(45). – P. 98–107. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-11

20. Даденков С.А., Кон Е.Л., Чмыков В.В. Имитационная модель промышленной сети (на примере технологии LonWorks) // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – С. 82–84.

References

1. Olifer V.G., Olifer N.A. Komp'uternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. 4nd ed. Saint Petersburg: Piter, 2010. 944 p.

2. Control Network Protocol Specification (ANSI/CTA-709.1-D). United States, 2014, available at: <https://webstore.ansi.org/standards/cea/cea7092014ansi> (accessed 02 December 2018).

3. Ditrikh D., Loi D., Shvaintser G.Iu. LON-tekhnologiiia, postroenie raspredelennykh prilozhenii [LON technology, creation of the distributed applications]. Ed. O.B. Nizamutdinova. Perm': Zvezda, 1999. 242 p.

4. Krylov V.V., Samokhvalova S.S. Teoriia teletrafika i ee prilozheniia [Theory of teletraffic and its application]. Saint Petersburg: BKhV, 2005. 288 p.

5. Köhler W. Simulation of a KNX network with EIBsec protocol extensions: building a KNX network with a simulation framework. VDM Verlag Dr. Müller. Saarbrücken, 2010. 140 p.

6. Hong S.H., Kim W.H. Bandwidth allocation scheme in the CAN protocol. *Control Theory and Applications: IEEE Proc*, 2000, vol. 147, pp. 37-44. DOI: 10.1007/s12555-010-0415-1

7. Hong S.-H., Lee J.-H. A bandwidth allocation scheme in fieldbuses. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2010, no. 8(4), pp. 831-840.

8. Lian F.-L., Moyne J.R., Tilbury D.M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. Technical Report: UM-MEAM-99-02. 1999, available at: <http://www-personal.umich.edu/~tilbury/papers/lmt99csm.pdf> (accessed: 28 September 2016).

9. Tindell K., Burns A., Wellings A.J. Calculating controller area network (CAN) message response times. *Control Engineering Practice*, 1995, vol. 3, iss. 8, pp. 1163-1169. DOI: 10.1016/0967-0661(95)00112-8

10. Mary G.I., Alex Z.C., Jenkins L. Response Time Analysis of Messages in Controller Area Network: A Review. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013, vol. 2013, pp. 1-11. DOI: 10.1155/2013/148015

11. Wen Li, Xiangyu Dai. Performance Evaluation Analysis about Ethernet and DeviceNet. *Internet of Things. Communications in Computer and Information Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, vol. 312, pp. 64-69. DOI: 10.1007/978-3-642-32427-7_9

12. Moshe K. Collision resolution simulation for distributed control architectures using LonWorks. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Edmonton, 2005, pp. 319-326.

13. Miśkowicz M. Analysis of mean access delay in variable-window CSMA. *Sensors. Schweiz: Molecular Diversity Preservation International*, 2007, vol. 7, pp. 3535-3559.

14. Miśkowicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol. *Computer Standards & Interfaces*. Nederland: Elsevier Science Publishing Company, 2009, vol. 31(3), pp. 548-556. DOI: 10.1016/J.CSI.2008.03.025.

15. Miśkowicz M. Average Channel Utilization of CSMA With Geometric Distribution Under Varying Workload. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 2009, vol. 5, no. 2, pp. 123-131. DOI: 10.1109/TII.2009.2017524

16. Buchholz P., Plonnigs J. Analytical analysis of access-schemes of the CSMA type. *Proc. of IEEE International Workshop on Factory Communication Systems WFCS*, 2004, Wien, 2004, pp. 127-136.

17. Stepanov S.N., Tsitovich I.I. Otsenka veroiatnostnykh kharakteristik modeli s povtornymi vyzovami [Evaluation of probabilistic characteristics of models with repeated calls]. *Modeli raspredeleniia informatsii i metody ikh analiza. Trudy X Vsesoiuznoi shkoly-seminara po teorii teletrafika*. Moscow, 1988, pp. 4-12.

18. Nazarov A.A., Kuznetsov D.Iu. Issledovanie seti sviazi, upravliaemoi adaptivnym protokolom sluchainogo mnozhestvennogo dostupa, v usloviakh kriticheskoi zagruzki [Research of the communication network managed by the adaptive protocol of accidental multiple access in the conditions of critical loading]. *Problemy peredachi informatsii*, 2004, no. 3, pp. 69-80.

19. Dadenkov S.A. The simulation of p-persistent CSMA algorithm of unequal random multiple access. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, no. 2(45), pp. 98-107. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-11

20. Dadenkov S.A., Kon E.L., Chmykov V.V. Imitatsionnaia model' promyshlennoi seti (na primere tekhnologii LonWorks) [Simulation model of industrial network (on the example of LonWorks technology)]. *Problemy*

tehniki i tekhnologii telekommunikatsii. Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014, pp. 82-84.

Сведения об авторах

Даденков Сергей Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dadenkov@rambler.ru).

Кон Ефим Львович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kel-40@yandex.ru).

Даденков Александр Александрович (Пермь, Россия) – ведущий инженер Пермского научно-исследовательского технологического института (614990, Пермь, Героев Хасана, 41, e-mail: dadenkov@rambler.ru).

About the authors

Dadenkov Sergey Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of “Automatics and telemechanics” Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: dadenkov@rambler.ru).

Kon Efim Lvovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Professor at the Department of “Automatics and telemechanics” Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kel-40@yandex.ru).

Dadenkov Aleksandr Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Lead Engineer Perm Technological Research Institute (614990, Perm, 41, Geroev Xasana, e-mail: dadenkov@rambler.ru).

Получено 15.04.2019