

**АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ  
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЯХ  
С КОНКУРИРУЮЩИМ ДОСТУПОМ**

Г. В. Абрамов\*, А.Е. Емельянов\*\*, К. Ч. Колбая\*\*

*\*Воронежский государственный университет*

*\*\*Воронежский государственный университет инженерных технологий*

**Поступила в редакцию 10.06.2016 г.**

**Аннотация.** Проводится исследование времени передачи данных в распределенных сетях с конкурирующим доступом, а также анализ влияния изменения параметров исходной системы на максимальное время доставки информации.

**Ключевые слова:** распределенные сети, конкурирующий доступ, время передачи данных, технологии Ethernet.

**Annotation.** Research of the data transfer time on the distributed networks with the competing access and also analysis of the impact of changes in the parameters of the original system to the maximum time of information delivery is conducted.

**Keywords:** distributed networks, competing access, data transfer time, Ethernet technology.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все большей популярностью пользуются технологии «умного дома» или «интеллектуального здания». Основным признаком «интеллектуального здания» (ИЗ) является комплексная система управления, функционирующая посредством единой системы диспетчеризации (локальной или удаленной). Данные системы являются аппаратно-программным комплексами, осуществляющими сбор, хранение и обработку информации, получаемой от различных подсистем ИЗ. Среди прочих, можно выделять следующие подсистемы:

- **климат** (датчики температуры и влажности, кондиционирование и вентиляция, отопление);
- **свет** (датчики освещенности и присутствия, система управления светом);

– **безопасность** (системы видеонаблюдения, охранной и пожарной сигнализаций).

Выбор технологии передачи информации в данной ситуации – сложная задача, не позволяющая одновременно абсолютно следовать принципам открытых систем – стандартизованности и доступности. При ее решении необходимо руководствоваться количественными параметрами (объем передаваемых полезных данных, допустимое число узлов, помехозащищенность и др.), ценовым критерием (затраты в расчете на один узел), популярностью, эффективностью решения задачи, простотой конфигурирования и многими другими [1–4].

Использование единой коммуникационной среды и на уровне управления, и на уровне периферийного оборудования, будет являться решением проблем совместимости уровней управления между собой (т. к. каждому уровню предъявляются свои требования к программно-аппаратному комплексу по объему передаваемой информации и вре-

мени передачи) и проблем, возникающих при модернизации систем (замена устаревших компонентов на более перспективные).

В качестве одного из эффективных вариантов можно рассматривать использование различных вариантов стандарта Ethernet, ставшего фактическим стандартом на верхних уровнях управления. Наличие в большинстве зданий функционирующей сети, ее простота, дешевизна, надежность, открытость, легкая масштабируемость открывает большие перспективы для его использования и на нижнем же уровне, особенно с учетом того, что все ведущие производители оборудования разработали стандарты и начали выпуск оборудования, в основе которого также лежит данная технология. Эти стандарты используют на физическом и канальном уровне модели взаимодействия открытых систем технологию конкурирующего доступа к среде передачи данных [5–6].

Главным недостатком использования сети Ethernet на нижнем уровне управления является недетерминированность времени передачи данных по каналу. При этом наибольшие задержки происходят при возникновении коллизий, которые возможны при использовании множественного доступа с контролем несущей и обнаружением коллизий (CSMA/CD) при передаче по кабелю (стандарты 10-100 BASE) или множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA) при беспроводной передаче (стандарты IEEE 802.11a/b/g/n/ac) [7]. В первом варианте коллизии определяются наиболее близким к коллизии сетевым устройством. Во втором предусмотрен режим работы, при котором после прослушивания канала передачи и пакета коллизия определяется по отсутствию пакета подтверждения приема.

При использовании уже имеющихся сетей необходимо убедиться, что режим работы позволяет передавать данные по сети в течение заданного цикла обработки данных и выработки управляющего воздействия. Для сетей, использующих низкоскоростные датчики (измерение температура, влажности, давле-

ния) цикл передачи данных до 100 мс, в системах управления приводами – до 10 мс [8].

Математическое моделирование процесса передачи данных позволяет оценить временные задержки, однако, несмотря на многочисленные исследования математических моделей сетей связи, остается ряд проблем, требующих дополнительного исследования. К числу малоизученных можно отнести такие проблемы как закон распределения времени передачи информации между устройствами сети и время доставки информации от конкретного устройства с заданной вероятностью при возможных коллизиях в сети. Эта информация важна при разработке систем управления, т.к. величина управляющего воздействия зависит и от времени доставки.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ С КОНКУРИРУЮЩИМ ДОСТУПОМ

Для решения задачи расчета времени доставки информации между подсистемами ИЗ, которая возникает при проектировании сети Ethernet, была разработана математическая модель [9] распределенной системы с конкурирующим доступом к каналу передачи данных и произведен анализ влияния изменения параметров системы на максимальное время доставки информации. Главной особенностью построения математической модели является выделение одного устройства из общей совокупности, для которого и определяется закон распределения времени передачи информации, при этом рассматривается взаимодействие выделенного оконечного устройства с остальными устройствами сети.

Математическая модель системы реального времени состоит из композиции трех объектов моделирования: канала передачи данных, заявки и выделенного устройства (рис. 1), взаимодействие которых позволяет определять вероятностно – временные характеристики исследуемой системы (вероятность нахождения канала передачи в возможных состояниях, плотность распределения вероятности времени доставки пакета

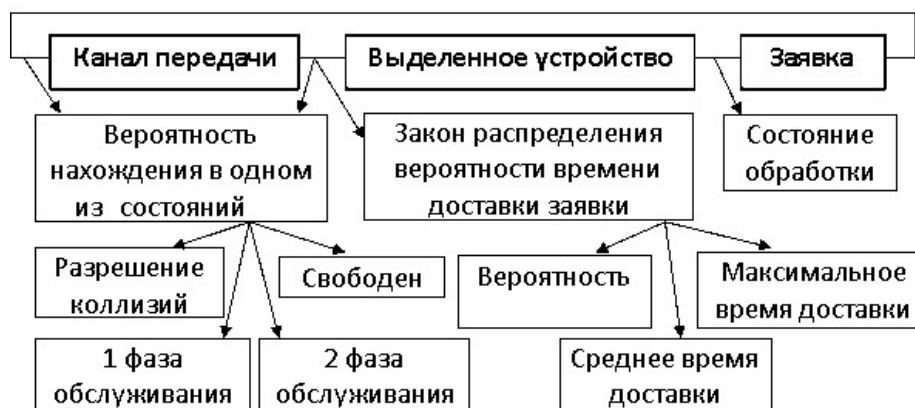


Рис. 1. Структурная схема математической модели

и состояние обработки заявки от выделенного устройства (ВУ)).

Рассматривается система, особенностью которой является недетерминированное время передачи данных от одного устройства к другому. Что связано с возможностью возникновения коллизий, когда несколько устройств одновременно начинают передачу данных. Система состоит из  $n$  конечных устройств. Под конечным устройством подразумевается рабочая станция, сетевой датчик, исполнительное устройство и т. д. Обмен данными между устройствами осуществляется по каналам связи локальной сети. Для получения математической модели выделяется одно из конечных устройств – выделенное устройство (ВУ) и рассматривается его взаимоотношения с другими устройствами из сети [10].

При получении математической модели были приняты следующие допущения:

1. Все конечные устройства имеют одинаковые характеристики.
2. Время между появлением (формированием) заявок в устройствах имеет экспоненциальное распределение с параметром  $\lambda$ .
3. Для занятия канала сетевое устройство формирует простейший поток с интенсивностью поступления заявок  $-\lambda_1$ .
4. Обслуживание заявки каналом передачи имеет три фазы. В течение первой фазы возможны конфликтные ситуации (коллизии), в течение второй – конфликты исключаются, в течение третьей восстанавливается работа канала передачи данных после возникновения коллизии. Длительности фаз обслуживания

имеют экспоненциальное распределение с параметрами  $\mu_1$  для первой,  $\mu_2$  – второй,  $\mu_3$  – третьей фазы обслуживания.

5. В каждом сетевом устройстве может находиться не более одной заявки.

Систему «выделенное устройство – информационная система» можно описать следующим вектором состояний  $(i, j, l, m)$ , где:

$i$  – состояние канала передачи при занятии его заявкой от выделенного конечного устройства ( $i = 0, 1, 2, 3$ );

$j$  – наличие заявки в выделенном ( $j = 0$  – заявка в ВУ отсутствует;  $j = 1$  – в ВУ сформирована заявка);

$l$  – состояние канала передачи при занятии его заявкой конечного устройства из сети ( $l = 0, 1, 2, 3$ );

$m$  – количество конечных устройств в сети, имеющих заявки (согласно рекомендациям по проектированию сетей множественного доступа, в одном сегменте должно быть не более 25–30 сетевых устройств).

Таким образом, можно выделить следующие состояния системы при условии, что  $k$  конечных устройств имеют заявки:

1.  $(0, 0, 0, k)$  – канал передачи свободен, при этом заявка в выделенном устройстве отсутствует.

2.  $(0, 0, 1, k)$  – канал передачи занят первой фазой обслуживания заявки устройства из сети, заявка в выделенном устройстве отсутствует.

3.  $(0, 0, 2, k)$  – канал передачи занят второй фазой обслуживания заявки устройства из сети, заявка в выделенном устройстве отсутствует.

4.  $(0, 0, 3, k)$  – в канале произошла коллизия, при этом заявка в выделенном устройстве отсутствует.

5.  $(0, 1, 0, k)$  – канал передачи свободен, в выделенном устройстве сформировалась заявка.

6.  $(0, 1, 1, k)$  – канал передачи занят первой фазой обслуживания заявки устройства из сети, в выделенном устройстве сформировалась заявка.

7.  $(0, 1, 2, k)$  – канал передачи занят второй фазой обслуживания заявки устройства из сети, в выделенном устройстве сформировалась заявка.

8.  $(0, 1, 3, k)$  – в канале произошла коллизия от устройств из сети, в выделенном устройстве сформировалась заявка.

9.  $(1, 1, 0, k)$  – канал передачи занят первой фазой обслуживания заявки выделенного устройства.

10.  $(2, 1, 0, k)$  – канал занят второй фазой обслуживания заявки выделенного устройства.

11.  $(3, 1, 3, k)$  – в канале передачи коллизия, столкновение заявок выделенного и устройства из сети.

Введем следующие обозначения для возможных состояний системы:

$S_0 - (0, 0, 0, k); S_1 - (0, 0, 1, k); S_2 - (0, 0, 2, k);$

$S_3 - (0, 0, 3, k); S_4 - (0, 1, 0, k); S_5 - (0, 1, 1, k);$

$S_6 - (0, 1, 2, k); S_7 - (0, 1, 3, k); S_8 - (1, 1, 0, k);$

$S_9 - (2, 1, 0, k); S_{10} - (3, 1, 3, k).$

Вероятность нахождения системы в состоянии  $S_i$ , при наличии в оконечных устройствах (без учета выделенного)  $k$  заявок определим через  $P_{i,k}(t)$ , где:

$i$  – номер состояния ( $i = 0 \dots 10$ );

$k$  – количество оконечных устройств, имеющих заявки.

В работе [9] получена математическая модель информационной системы с конкурирующим доступом к каналу передачи информации, представляющая собой систему дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний  $S_i$ .

Вероятностные характеристики канала передачи по следующим выражениям:

1. Вероятность нахождения канала передачи в свободном состоянии.

Данная вероятность является суммой вероятностей нахождения сети в состояниях  $S_0$  и  $S_4$ . Так как в этих состояниях канал передачи свободен.

$$P_0(t) = \sum_{k=0}^{n-1} [P_{0,k}(t) + P_{4,k}(t)].$$

2. Вероятность нахождения канала передачи в первой фазе обслуживания заявки.

Данная вероятность является суммой вероятностей нахождения сети в состояниях  $S_1$ ,  $S_5$  и  $S_8$ . Так как в этих состояниях сетевые устройства пытаются занять канал для передачи пакета информации. При первой фазе обслуживания заявки коллизия в канале передачи информации возможна, поскольку несколько сетевых устройств пытаются занять общий канал передачи.

$$P_1(t) = \sum_{k=0}^{n-1} [P_{1,k}(t) + P_{5,k}(t) + P_{8,k}(t)].$$

3. Вероятность нахождения канала передачи во второй фазе обслуживания заявки.

Данная вероятность является суммой вероятностей нахождения сети в состояниях  $S_2$ ,  $S_6$  и  $S_9$ . Так как в этих состояниях сетевое устройство заняло канал для передачи пакета информации. При второй фазе обслуживания заявки коллизия в канале передачи информации не возможна, поскольку идет прием – передача информации между двумя сетевыми устройствами, а остальные, вследствие этого, «молчат».

$$P_2(t) = \sum_{k=0}^{n-1} [P_{2,k}(t) + P_{6,k}(t) + P_{9,k}(t)].$$

4. Вероятность нахождения канала передачи в состоянии разрешения коллизии.

Данная вероятность является суммой вероятностей нахождения сети в состояниях  $S_3$ ,  $S_7$  и  $S_{10}$ . Так как в этих состояниях в канале произошла коллизия при передаче информации.

$$P_3(t) = \sum_{k=0}^{n-1} [P_{3,k}(t) + P_{7,k}(t) + P_{10,k}(t)].$$

В качестве закона распределения времени передачи информации используется плотность распределения времени передачи информации (обслуживания заявки).

Для анализа работы распределенной системы управления с конкурирующим доступом необходим закон распределения времени передачи информации. В работе [10] изложен подход для определения закона распределения времени передачи данных. Он заключается в том, что выделяется из графа состояний канала передачи те состояния  $S_i$ , в которых заявка на обслуживание уже сформировалась –  $\tilde{S}_i$ .

Плотность распределения времени передачи информации:

$$f_i(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \mu * \tilde{P}_{9,k}(t),$$

где  $\tilde{P}_9(t)$  – вероятность нахождения системы в состоянии  $\tilde{S}_9$ .

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет на основе параметров распределенной сети конкурирующего доступа исследовать не только работу информационной системы, как единого целого и получать ее основные вероятностные характеристики, но и анализировать работу отдельного устройства и его взаимодействие с другими устройствами сети на основе плотности распределения вероятностей времени обслуживания заявки каналом передачи. Полученные плотности распределения времени доступа для различных режимов работы системы возможно аппроксимировать подходящим аналитическим законом распределения. Это, в свою очередь, позволит производить анализ и синтез открытых систем, построенных на основе сети конкурирующего доступа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Важнейшей характеристикой распределения вероятности является максимальное время гарантированной доставки сообщения. Рассмотрим, какое влияние на него оказывает изменение параметров моделирования: количество устройств в сети, размер пакетов, интенсивность формирования заявки, время разрешения коллизии.

На рис. 2 представлена зависимость максимального гарантированного времени обслуживания каналом передачи сообщения от

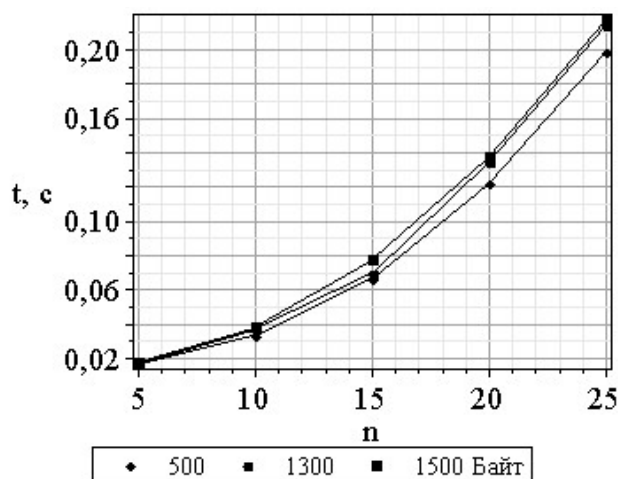


Рис. 2 Зависимость максимального времени обслуживания сообщения от количества устройств в системе и размера пакета

количества устройств в системе и их объема (интенсивность формирования 1400 пак/с, время разрешения коллизии 0,00249 с).

Анализ данных зависимостей, показывает, что максимальное время обслуживания заявки возрастают при увеличении количества устройств в системе. Изменение размера пакета, в свою очередь, практически не влияет на временные характеристики передачи сообщения.

На рис. 3 представлена зависимость максимального времени доставки от интенсивности формирования заявок и количества устройств в системе (время разрешения коллизии 0,00249 с).

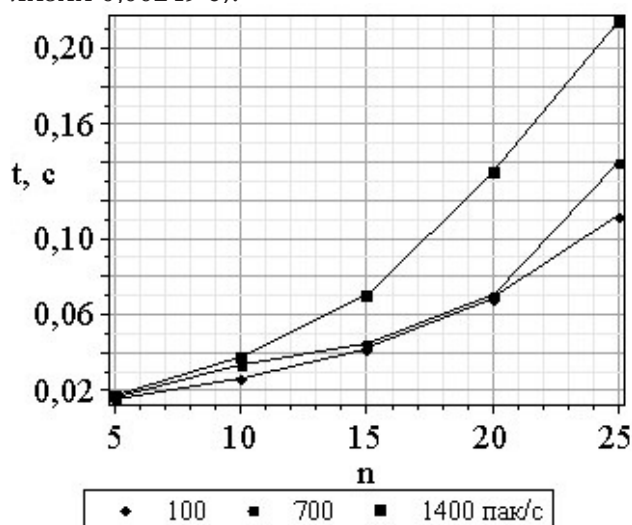


Рис. 3 Зависимость максимального времени обслуживания сообщения от интенсивности формирования заявки и количества устройств

Исследование представленных зависимостей позволяет сделать следующие выводы: при увеличении интенсивности формирования сообщений и количества устройств в системе наблюдается значительное увеличение максимального времени передачи данных.

Рассмотрим зависимость временных характеристик от изменения времени разрешения произошедших в канале коллизий и размера пакета (рис. 4).

Анализ данных зависимостей показывает, что при увеличении времени, затрачиваемого на разрешение возникшей коллизии, время обслуживания заявки значительно увеличивается, при этом размер пакета оказывает не столь значительное влияние.

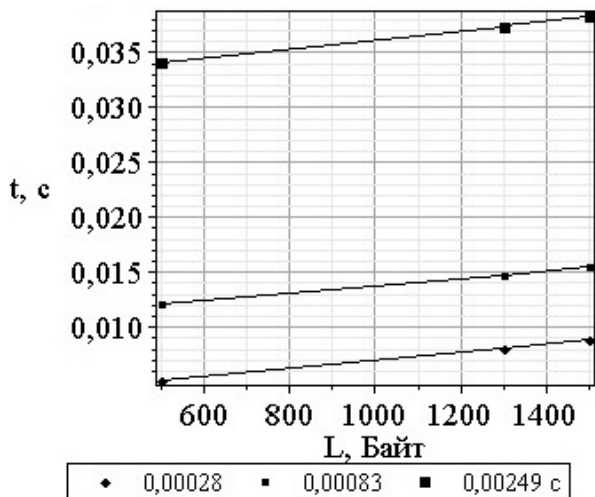


Рис. 4 Зависимость максимального времени передачи сообщения от времени разрешения коллизии и размера пакета

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что разработанная математическая модель позволяет рассчитывать такие параметры сети как закон распределения времени передачи информации между устройствами сети и время доставки информации от конкретного устройства с заданной вероятностью при возможных коллизиях в сети. Численные эксперименты показывают, что наличие коллизий в сети передачи данных приводит к задержкам в доли секунды и не является препятствием для использования в системах ИЗ. Однако, возможны режимы, при которых работоспособность может быть нарушена и их

необходимо исключить. Это возможно при проектировании или модернизации информационных систем «умного дома». Предложенная модель позволяет выбрать структуру сети и рассчитать режимы ее функционирования, при которых случайные задержки не будут превышать заданных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Г. В. Анализ функционирования системы управления энергопотреблением / Г. В. Абрамов, И.В. Желтоухов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – Воронеж : 2013. – № 4 (58) – С. 79–81.
2. EtherNet/IP: Industrial Protocol White Paper. – Режим доступа: [http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/enet-wp001\\_-en-p.pdf](http://samplecode.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/enet-wp001_-en-p.pdf)
3. FF HSE – Fieldbus FOUNDATION. – Режим доступа: <http://ethernet.industrial-networking.com/protocols/ffhse.asp?type=intro>
4. Modbus Application Protocol. – Режим доступа: [www.modbus.org](http://www.modbus.org) (Modbus\_Application\_Protocol\_V1\_1a.pdf)
5. Лопухов И. Новые реалии промышленных сетей Ethernet / И. Лопухов. – Режим доступа: <http://www.prosoft.ru/cms/f/381587.pdf>
6. Абрамов Г. В. Обоснованность использования стандарта Ethernet в промышленных распределенных системах управления / Г. В. Абрамов, А. Е. Емельянов, А. Н. Рязанов, А. Л. Ивашин // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия, 2010. – № 6. – С. 27–30.
7. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 5-е изд. / Э. Таненбаум // СПб. : Питер, 2012. – 960 с.
8. Лопухов И. Сети Real-Time Ethernet: от теории к практической реализации / И. Лопухов // Современные технологии автоматизации. – 2010. – № 3. – С. 8–15.
9. Абрамов Г. В. Математическая модель информационной системы с множественным доступом к каналу передачи данных / Г. В. Абрамов, А. Е. Емельянов, К. Ч. Колбая // Системы управления и информационные технологии. – Москва – Воронеж, 2006. – №4(26) – С. 5–8.

10. **Абрамов Г. В.** Определение закона распределения времени обслуживания заявки информационной системы с множественным доступом к каналу передачи / Г. В. Абрамов,

А. Е. Емельянов, К. Ч. Колбая // Системы управления и информационные технологии. – Москва – Воронеж, 2008. – № 3 (33) – С. 49–51.

**Абрамов Г. В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры математического и прикладного анализа, факультет прикладной математики, информатики и механики, Воронежский государственный университет.

E-mail: agwl@yandex.ru

**Abramov G. V.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mathematics and Applied Analysis, Applied Mathematics, Informatics and Mechanics Faculty, Voronezh State University.

E-mail: agwl@yandex.ru

**Емельянов А. Е.** – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем, факультет управления и информатики в технологических системах, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: emalexeg@yandex.ru

**Emelyanov A. E.** – Candidat of Technical Sciences, associate Professor, Department of Information and Control Systems, Control and Informatics in Technological Systems Faculty, Voronezh State University of Engineering Technology.

E-mail: emalexeg@yandex.ru

**Колбая К. Ч.** – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий моделирования и управления, факультет управления и информатики в технологических системах, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: kolbaya-kamila@rambler.ru

**Kolbaya K. Ch.** – Candidat of Technical Sciences, associate Professor, Department of Information Technology Modeling and Management, Control and Informatics in Technological Systems Faculty, Voronezh State University of Engineering Technology.

E-mail: kolbaya-kamila@rambler.ru