

## **Функциональная модель ненагруженных Ethernet-коммутаторов**

**М.К. Бойченко, И.П. Иванов, А.Ю. Кондратьев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: noc@bmstu.ru; ivanov@bmstu.ru

*Обоснована математическая модель Ethernet-коммутаторов, полученная на основе анализа структуры передаваемых кадров, которые используются на физическом уровне методов кодирования сигналов, и принципов непрерывности процессов коммутации кадров с учетом их целостности в современных транспортных системах компьютерных сетей. Модель проверена сравнением расчетных результатов с результатами экспериментальных исследований штатных коммутаторов Cisco Catalyst 3750 и D-Link DGS 1100-08.*

**Ключевые слова:** Ethernet, коммутатор, задержка, интерфейс, транспортная система, компьютерная сеть.

## **Functional Model of Unloaded Ethernet-Switches**

**M.K. Boychenko, I.P. Ivanov, A.Yu. Kondrat'ev**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: noc@bmstu.ru; ivanov@bmstu.ru

*In the article we offer the rationale for the mathematical model of the Ethernet-switch, obtained from the structure analysis of the transmitted frames used in the physical layer of the signal coding methods and principles of continuous process of frame switching based on their integrity in the current transport systems of computer networks. This model is verified by comparing the calculation results and the results of experimental studies of existing switches such as Cisco Catalyst 3750 and D-Link DGS 1100-08.*

**Keywords:** Ethernet, switch, delay, interface, transport system, computer network.

**Введение.** На современном этапе развития информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) большинство компьютерных сетей строят по принципу Ethernet-коммутации, в соответствии с которым основным протоколом на втором уровне эталонной модели ISO/OSI является Ethernet, на третьем уровне — протокол IP, а транзитными узлами транспортной системы — коммутаторы различных уровней [1–3]. Транспортные системы корпоративных компьютерных сетей реализуют по иерархической схеме, в которой предусматривают уровень ядра (магистраль), распределительный уровень и уровень доступа. Каждый уровень транспортной системы сети реализуют с использованием Ethernet-коммутаторов с различной производительностью, порты или интерфейсы которых соединяются медными или

оптоволоконными кабелями. Отдельные сегменты могут быть основаны на базе беспроводных технологий (Wi-Fi). В любом случае выбор определенных типов коммутаторов зависит, прежде всего, от потребных характеристик реализуемой транспортной системы: требуемой производительности системы; пропускной способности отдельных сегментов сети; времени реакции сети и т. д. Вместе с тем фирмы-производители коммутаторов предоставляют недостаточно информации о параметрах предлагаемых моделей коммутаторов, что затрудняет процесс разработки транспортной системы создаваемой корпоративной сети. Обычно указывают число интерфейсов (портов) конкретной модели, их режимы функционирования (как правило, full duplex), пропускные способности интерфейсов и, в лучшем случае, общую производительность коммутатора.

Пропускные способности интерфейсов регулируются (10 Мбит/с, 100 Мбит/с, 1000 Мбит/с и т. д.) и устанавливаются либо по результатам специальной «переговорной» процедуры взаимодействующих в сети смежных узлов, либо принудительно сетевым администратором. Максимальные пропускные способности интерфейсов (например, 1 Гбит/с) имеют размерность бит в секунду, а производительность коммутатора — число обрабатываемых кадров в единицу времени. Число обрабатываемых кадров при определенной пропускной способности портов зависит от их размеров (для технологии Ethernet стандартная длина передаваемой полезной информации колеблется в диапазоне 46...1500 байт в одном кадре), поэтому в рекламных целях производительность указывают для наиболее коротких кадров. Кроме того, умалчивается тот факт, что заявленная производительность достижима лишь для определенных топологий информационных потоков, пересекающих коммутатор, при которых конкретный выходной порт востребован лишь одним потоком информации, поступающим на определенный входной интерфейс коммутатора. В этом случае коммутатор работает как несколько параллельных мостов, число которых в 2 раза превышает число его портов, а информационные потоки не пересекаются, вследствие чего ресурсы каждого порта задействуются только одним входным и только одним выходным потоками в полнодуплексном режиме. Подобное пересечение потоками информации коммутатора не реально для транспортных систем корпоративных сетей, характерной особенностью которых является использование общих ресурсов различного иерархического уровня. Однако даже в этом случае среди рекламных характеристик коммутаторов нет информации о времени передачи кадров с порта на порт, что не позволяет разработчикам транспортной системы установить время передачи пакета через канал (Transmit Time), время реакции сети (Delay), колебание (вариация) задержки при передаче пакетов (Jitter) и пр., т. е. многие показатели качества обслуживания (QoS).

**Характерная особенность корпоративных сетей.** Мультисервисность, для реализации которой все в большем объеме используют интер-

активный трафик реального времени, представляет собой характерную особенность корпоративных сетей предприятий и организаций. В связи с этим способность сети обеспечить необходимый сервис заданному трафику в определенных технологических рамках рассматривают как один из важнейших вопросов, решаемых в процессе создания транспортных систем компьютерных сетей.

**Функциональная модель Ethernet-коммутатора.** Для построения функциональной модели Ethernet-коммутатора прежде всего необходимо определить длину передаваемого кадра  $L_K$ . Как правило, полезной нагрузкой для кадра является IP-пакет [1, 3]. В зависимости от версии IP-протокола переносимая в нем информация предваряется заголовком, размер которого для IPv4 в штатном режиме занимает 20 байт. Ethernet-кадр включает в себя 6 байт MAC-адреса назначения, 6 байт MAC-адреса источника, 2 байт размера кадра (EthernetDIX) [1, 3], 4 байт контрольной суммы (CRC). Следовательно, длина кадра равна  $L_K = L_P + 18$ , где  $L_P$  — размер полезной нагрузки Ethernet-кадра (размер пакета), байт.

В соответствии со стандартом для синхронизации источника и приемника перед каждым кадром передают 7 байт преамбулы и один стартовый байт. Поэтому передача кадра длиной  $L_K$  требует  $(L_K + 8)$  передаваемых байтов:  $L_t = L_K + 8 = L_P + 26$ . После каждого кадра (т. е. передачи 4 байт контрольной суммы) выдерживают межкадровый интервал (IPG) длиной 12 байт. Другими словами, каждый кадр длиной  $L_K$  передают в технологическом «окне» (фрейме) длиной  $L_f = L_t + 12 = L_P + 38$ .

**Механизм передачи фрейма.** Рассмотрим более детально механизм передачи фрейма длиной  $L_f$  последовательно из выходного аппаратного буфера в кабельный сегмент. При пропускной способности интерфейсов  $R = 10$  Мбит/с на физическом уровне эталонной модели ISO/OSI и технологии Ethernet применяют манчестерский код [3], в соответствии с которым на каждый бит передаваемой полезной информации приходится один бит физического кода. Длительность одного бит-тайма такой пропускной способности составляет  $\tau = 100$  нс, поэтому длительность передачи кадра длиной  $L_f$ , нс, будет определяться как

$$\tau_{10} = 8L_f\tau = 800L_f. \quad (1)$$

Для Fast Ethernet пропускная способность равна  $R = 100$  Мбит/с, а длительность одного бит-тайма —  $\tau = 10$  нс, однако на физическом уровне используют код 4В/5В [1], для которого каждые четыре бита полезной информации требуют передачи в линию связи пяти бит, поэтому

$$\tau_{100} = \frac{5}{4} \cdot 8L_f \tau = 100L_f. \quad (2)$$

Пропускной способности Gigabyte Ethernet  $R = 1000$  Мбит/с соответствует длительность бит-тайма  $\tau = 1$  нс. Для оптоволоконных кабелей связи на физическом уровне используют код 8B/10B, т. е. каждый байт передаваемой информации требует отправки в линию связи десяти бит. Для медных кабелей применяют код PAM5 [3], в соответствии с которым 8 бит полезной информации на физическом уровне приводят к десяти отправляемым в линию битам, тогда

$$\tau_{1000} = \frac{10}{8} \cdot 8L_f \tau = 10L_f. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) необходимы для определения задержки коммутаторов при разработке их функциональных математических моделей.

**Алгоритм работы коммутатора.** Рассмотрим более детально алгоритм работы коммутатора в ненагруженном режиме.

1. Кадр побитно из кабельного сегмента поступает в буфер входного интерфейса.

2. После поступления первых четырнадцати байтов кадра в буфер (8 байт преамбулы, стартовый байт и 6 байт MAC-адреса приемника) по таблице коммутации устанавливается номер выходного порта коммутатора.

3. В случае ненагруженного режима функционирования коммутатора для поступающего в буфер входного интерфейса кадра отсутствует конкуренция за выходной интерфейс с другими входными интерфейсами, поэтому после установления номера выходного интерфейса может быть реализована порционная передача информации из буфера входного интерфейса в буфер выходного интерфейса.

4. При коммутации «на лету» после поступления первой порции информации из буфера входного интерфейса в буфер выходного возможно ее дальнейшее побитное продвижение в сегмент транспортной системы, подключенный к выходному интерфейсу [1]. Однако в большинстве современных коммутаторов используется тип коммутации с полной буферизацией поступающего кадра [1, 3]. Это объясняется, во-первых, возможной разностью пропускных способностей входного и выходного интерфейсов, что характерно при иерархическом построении транспортной системы компьютерных сетей и, во-вторых, желанием повысить производительность всей транспортной системы компьютерной сети (разрешение на эвакуацию кадра из выходного интерфейса в подключенный к нему сегмент сети только после установления факта приема в буфер входного интерфейса неискаженного кадра, т. е. после приема последних четырех байтов коммутируемого кадра, в которых содержится контрольная сумма CRC. Принятая сумма CRC сравнивается с аппаратно-подсчитываемой суммой во входном интерфейсе по

мере поступления входного побитного потока. В случае расхождения значений CRC информация в частично заполненном буфере выходного интерфейса удаляется (буфер очищается), предотвращая тем самым распространение по транспортной сети заведомо ложных Ethernet-кадров.

5. При получении разрешения на эвакуацию, которое соответствует реализуемой политике приоритетов организации очередей в аппаратном буфере выходного интерфейса, начинается побитная передача кадра кабельному сегменту транспортной системы компьютерной сети. Для ненагруженного режима функционирования коммутатора к этому моменту времени аппаратная очередь выходного интерфейса, как правило, оказывается пустой (если только длина предшествующего передаваемого кадра не существенно превосходит длину коммутируемого кадра). В любом случае за межкадровый интервал длиной 96 бит должна завершиться передача части коммутируемого кадра и его суммы CRC, оставшейся в буфере входного интерфейса, буферу выходного интерфейса, а входной интерфейс должен быть подготовлен к приему следующего Ethernet-кадра из транспортной системы сети.

С учетом изложенного, задержка кадра коммутатором при отсутствии самоблокировки будет равна длительности приема фрейма, которую для различных пропускных способностей рассчитывают по формулам (1)–(3). Отметим, что длительность эвакуации кадра из буфера выходного интерфейса может быть определена по тем же зависимостям, что и длительность их приема в буфер входного интерфейса. Это позволяет сделать вывод о том, что переполнение буфера выходного интерфейса возможно только при превышении пропускной способности входного интерфейса пропускной способности выходного интерфейса. В этом случае «обрубание хвостов» приводит к потере кадров даже в ненагруженном режиме функционирования коммутатора.

**Эксперимент.** В качестве функциональной модели ненагруженных коммутаторов с  $N$  интерфейсами, каждый из которых работает в режиме full duplex, допустимо использовать модель независимых параллельных одноканальных систем массового обслуживания с длительностью обслуживания, прямо пропорциональной длине поступающих на коммутацию Ethernet-кадров. Число систем массового обслуживания составляет  $2N$ .

Формулы (1)–(3) определяют минимальные значения задержки кадров Ethernet-коммутатором при различных значениях пропускной способности его входных интерфейсов. Достоверность формул (1)–(3) может быть проверена экспериментально путем использования методики измерений, рекомендованной в работах [4, 5]. В соответствии с этой методикой утилитой *nanoping* измеряют время двойного оборота (Round Trip Time, RTT). Предварительно определяют *RTT* для опорного эксперимента, т. е. для кроссового соединения компьютера-источника и компьютера-приемника.

Серии экспериментов выполнены передачей ICMP-пакетов (эхо-запросов) длиной 18...1472 байт. Это при длине заголовка ICMP-пакета 8 байт и длине заголовка IP-пакета 20 байт перекрывает весь диапазон значений длины полезной нагрузки Ethernet-кадра (46...1500 байт). В процессе измерений было проведено 100 тыс. передач ICMP-пакетов и вычислены математические ожидания  $RTT$  для разных значений длин ICMP-пакетов. Далее методом наименьших квадратов проведена линейная аппроксимация  $RTT$  в зависимости от длины фрейма [6, 7]. При пропускной способности сетевых адаптеров 10 Мбит/с значение  $RTT$ ,нс, аппроксимируется по формуле

$$RTT_{0,10} = 1622L_f + 228056. \quad (4)$$

Для пропускной способности сетевых адаптеров 1000 Мбит/с аппроксимирующая зависимость имеет вид

$$RTT_{0,1000} = 42L_f + 195838. \quad (5)$$

Зависимости (4), (5) характеризуют временные затраты операционных систем взаимодействующих компьютеров на формирование эхо-запроса, его передачи через программно-аппаратный тракт сетевого адаптера компьютера-источника кроссовому кабелю и сетевому адаптеру компьютера-приемника, на формирование соответствующего эхо-ответа операционной системой компьютера-приемника, его обратную пересылку в компьютер-источник, проверку полученного эхо-ответа на целостность информации, измерение  $RTT$ . На выполнение программных процедур тратится около 0,2 мс при любых значениях пропускной способности сетевых адаптеров (см. (4) и (5)), что является характеристикой пары взаимодействующих компьютеров. Строго говоря, все необходимые пересылки эхо-запросов и эхо-ответов при их обработке операционными системами компьютеров требуют временных затрат, пропорциональных их длинам. Однако для 64-разрядных общих шин время на одну их пересылку в 64 раза меньше времени их передачи из сетевого адаптера кабельному сегменту транспортной системы. Поэтому даже при нескольких передачах внутри компьютера этой составляющей можно пренебречь, тем более, что она учтена в аппроксимирующих зависимостях (4) и (5).

Теоретически при сетевом подключении адаптеров компьютера-источника и компьютера-приемника к портам Ethernet-коммутатора значение  $RTT$  должно увеличиться на время задержки коммутатором кадра эхо-запроса и время задержки кадра эхо-ответа. С учетом этого для пропускной способности интерфейсов 10 Мбит/с при разных значениях длин эхо-запросов и эхо-ответов получим

$$RTT_{T10,10} = RTT_{0,10} + 2\tau_{10} = 3222L_f + 228056, \quad (6)$$

для пропускной способности 1000 Мбит/с —

$$RTT_{T1000,1000} = RTT_{0,1000} + 2\tau_{1000} = 62L_f + 195838. \quad (7)$$

Проверка линейных аппроксимаций (4), (5) проведена для двух моделей коммутаторов Cisco Catalyst 3750 и D-Link DGS 1100-08. Выполнено сравнение экспериментальных результатов ( $RTT_3$ ) с теоретическими значениями ( $RTT_T$ ), вычисленными по формулам (6) и (7), относительная погрешность каждой длины эхо-запроса утилиты *nanoping* рассчитана по формуле  $\delta = (RTT_3 - RTT_T) / RTT_3 \cdot 100 \%$ .

Результаты вычислений погрешности для нескольких опорных значений длин эхо-запросов в коммутаторах Cisco Catalyst 3750 и D-Link 1100-08 при значениях пропускной способности интерфейсов 10 и 1000 Мбит/с представлены в таблице. Опорные значения длин эхо-запросов и эхо-ответов приняты одинаковыми для рассматриваемых коммутаторов.

Относительная погрешность определения ожидаемого теоретического значения  $RTT_T$  достаточно велика, особенно для коротких эхо-запросов, что свидетельствует о превышении реального времени задержки кадров в коммутаторе  $RTT_3$ , рассчитываемого по формуле (6).

Использование теоретически ожидаемого времени задержки кадров коммутатором (см. (7)) приводит к заниженному результату при расчете значений  $RTT$ , особенно для коротких эхо-запросов.

Относительная погрешность определения ожидаемого теоретического значения  $RTT_T$  для коротких эхо-запросов в коммутаторе D-Link DGS 1100-08 превосходит это же значение для более длинных эхо-запросов, т. е. существует закономерность, аналогичная закономерности, полученной при экспериментальных исследованиях коммутатора Cisco Catalyst 3750.

Все представленные результаты вполне объяснимы, если учесть факт предварительного определения интерфейса назначения для поступающего во входной интерфейс коммутатора кадра, содержащего эхо-запрос, и кадра, включающего эхо-ответ. Номер выходного интерфейса устанавливаются по таблице коммутации после прочтения первых шести байтов с MAC-адресом назначения, т. е. первых четырнадцати байтов (с учетом семи байтов преамбулы и стартового байта) фрейма. Это требует дополнительных временных затрат операционной системы коммутатора, которые при длинных кадрах можно компенсировать конвейеризацией и параллелизацией обработки байтов, поступающих во входной интерфейс коммутатора из соответствующего сегмента транспортной системы компьютерной сети.

Если учесть тенденцию к увеличению длин пакетов [3, 7], передаваемых в корпоративных сетях в целях уменьшения накладных информационных затрат и увеличения общей производительности транспортной системы, то можно рекомендовать предложенные теоретические зависимости для необходимых расчетов при проектировании и модернизации транспортных систем, построенных на Ethernet-коммутаторах второго уровня эталонной модели ISO/OSI.

**Значения погрешности определения времени  $RTT$  для коммутаторов Cisco Catalyst 3750 и D-Link DGS 1100-08 при значениях пропускной способности интерфейсов  $R = 10$  Мбит/с (числитель) и  $R = 1000$  Мбит/с (знаменатель)**

$L$ , байт	$L_f$ , байт	Cisco Catalyst 3750			D-Link DGS 1100-08		
		$RTT_s$ , нс	$RTT_r$ , нс	$\delta$ , %	$RTT_s$ , нс	$RTT_r$ , нс	$\delta$ , %
18	84	532 651/211894	498 703/201046	7,26/5,12	619432/289939	498703/201046	19,49/1,42
32	98	577 772/212148	543 811/201914	6,18/4,82	659299/289156	543811/201914	17,52/1,45
64	130	680 905/213287	646 915/203 898	4,62/4,40	755684/278156	646915/203898	14,39/1,58
128	194	887 172/215008	853 123/207 866	3,48/3,32	962421/228845	853123/207866	11,36/1,83
256	322	1 299705/223574	1 265539/215802	2,58/3,48	1388369/215705	1265539/215802	8,85/-0,05
512	578	2 124771/236548	2 090371/231674	1,60/2,06	2292184/228845	2090371/231674	8,80/-1,24
1024	1090	3 774903/272084	3 740035/263418	0,87/3,19	4198369/278156	3740035/263418	10,92/5,30
1460	1526	5 180094/298094	5 144827/290450	0,76/2,56	5159710/289156	5144827/290450	0,29/-0,45
1472	1538	5 218769/300744	5 183491/291194	0,63/3,18	5192224/289939	5183491/291194	0,17/-0,43



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2011. 944 с.
2. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Основы компьютерных сетей. СПб.: Питер, 2009. 352 с.
3. *Таненбаум Э., Уэзеролл Д.* Компьютерные сети. СПб.: Питер, 2012. 960 с.
4. *Бойченко М.К., Иванов И.П.* Оценка задержек коммутаторов в компьютерных сетях // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 11.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2014-11-1312 URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/network/1312.html>
5. *Иванов И.П., Кондратьев А.Ю., Лохтуров В.А.* Модернизация процесса измерений интервалов времени в операционных системах современных компьютеров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. № 4. С. 44–59.
6. *Бойченко М.К., Иванов И.П.* Теоретическая модель Ethernet-коммутатора // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 10.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2014-10-1311  
URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/network/1311.html>
7. *Филимонов А.* Построение мультисервисных сетей Ethernet. СПб.: БХВ, 2007.

## REFERENCES

- [1] Olifer V.G., Olifer N.A. Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. St. Petersburg, Piter Publ., 2011. 944 p.
- [2] Olifer V.G., Olifer N.A. Osnovy kompyuternykh setey [Basics of Computer Networks]. St. Petersburg, Piter Publ., 2009, 352 p.
- [3] Tanenbaum A., Wetherall D. Computer Networks. 5th ed. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2011.
- [4] Boychenko M.K., Ivanov I.P. Evaluation of delays in switches in computer networks. *Jelektr. nauchno-tekhn. izd. "Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii"* [El. Sci.-Tech. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation"], 2014, iss. 11.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2014-11-1312  
Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/it/network/1312.html>
- [5] Ivanov I.P., Kondrat'ev A.Yu., Lokhturov V.A. Modernization of process of measuring time intervals in operating systems of contemporary computers. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2012, no. 4, pp. 44–59 (in Russ.).
- [6] Boychenko M.K., Ivanov I.P. Theoretical model of Ethernet-switch. *Jelektr. nauchno-tekhn. izd. "Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii"* [El. Sci.-Tech. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation"], 2014, iss. 10.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2014-10-1311  
Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/it/network/1311.html>
- [7] Filimonov A. Postroenie mul'tiservisnykh setey Ethernet [Construction of multi-service Ethernet networks]. St. Petersburg, BKhV Publ., 2007.

Статья поступила в редакцию 12.11.2015

Бойченко Максим Константинович — начальник информационного центра  
Управления информатизации — Вычислительный центр МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Boychenko M.K. — Head of Information Control and Computing Center, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Иванов Игорь Потапович — проректор по информатизации и модернизации, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретическая информатика и компьютерные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Ivanov I.P. — Dr. Sci. (Eng.), Head of Theoretical Informatics and Computer Technology Department, Pro-rector of Information and Modernization, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Кондратьев Александр Юрьевич — начальник отдела вычислительной техники Управления информатизации МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Kondrat'ev A.Yu. — Head of Computer Technology Department, Information Control, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Бойченко М.К., Иванов И.П., Кондратьев А.Ю. Функциональная модель ненагруженных Ethernet-коммутаторов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 3. С. 129–138.

DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-129-138

**Please cite this article in English as:**

Boychenko M.K., Ivanov I.P., Kondrat'ev A.Yu. Functional Model of an Unloaded Ethernet-Switches. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 3, pp. 129–138. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-129-138