

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ E6 СЕТЕЙ

ОЦІНКА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ E6 МЕРЕЖ

E6 NETWORKS QUALITY OF SERVICE EVALUATION

Аннотация. Разработана методика оценки времени доставки пакета в E6 сетях. На основе анализа архитектурных особенностей современных маршрутизаторов (коммутаторов) и их алгоритмов обработки (переключения) пакетов получены соотношения для сравнительной оценки времени доставки пакета в TCP/IP и E6 сетях. Для оценки влияния очередей использованы цепи Маркова. Результаты оценок, представленные графически, подтверждают преимущества технологии E6.

Анотація. Розроблено методику оцінки часу доставки пакета в E6 мережах. На основі аналізу архітектурних особливостей сучасних маршрутизаторів (комутаторів) і їх алгоритмів обробки (переключення) пакетів отримано співвідношення для порівняльної оцінки часу доставки пакета в TCP/IP та E6 мережах. Для оцінки впливу черг використано ланцюг Маркова. Результати оцінок, подані графічно, підтверджують переваги технології E6.

Summary. A technique of packet delivery time evaluation in E6 networks was developed. On the base of the modern routers (switches) architectural peculiarities and their packet processing (switching) algorithms analysis the expressions for the packet delivery time comparative evaluation in TCP/IP and E6 networks were obtained. For the queues influence evaluation, the chains of Markov were applied. Graphically represented evaluation results acknowledge the advantages of E6 technology.

Технология E6 [1 ... 3] предназначена для улучшения качества обслуживания, повышения производительности и расширения адресного пространства локальных и глобальных сетей. Преимущества технологии E6 могут быть раскрыты в полной мере лишь при использовании новых аппаратных средств (сетевых устройств) – коммутирующих маршрутизаторов E6 (КМЕ6). В связи с этим возникает научная проблема оценки качества обслуживания E6 сети.

Традиционно для оценки производительности и качества обслуживания телекоммуникационных сетей применяют марковские процессы и сети массового обслуживания [4]. Основным параметром используемых моделей является время обработки пакета на устройстве – время обслуживания, либо некоторый закон его распределения. Однако, известные модели абстрагируются от алгоритмов обработки пакета и архитектурных особенностей устройств. Поскольку основные преимущества технологии E6 достигаются на архитектурах с непосредственной передачей пакета между портами, необходимы оценки времени обслуживания, учитывающие одновременность процессов приема пакета в исходный порт и его ретрансляции в порт назначения.

Целью настоящей работы является разработка методов сравнительной оценки времени доставки пакета в TCP/IP и E6 сетях, в особенности на архитектурах с непосредственной передачей пакетов между портами (без обязательной буферизации целого пакета).

1. Анализ алгоритмов доставки пакетов. Схемы доставки пакетов между конечными узлами (хостами) сети для E6 и IP сетей представлены в [3]. Если не рассматривать влияние сеансовых и транспортных протоколов, алгоритмы работы хостов аналогичны алгоритмам работы промежуточных маршрутизаторов. Алгоритмы обработки пакетов в традиционных IP-маршрутизаторах (IPR) и коммутирующих маршрутизаторах E6 (КМЕ6) существенно отличаются, что обуславливает улучшение характеристик пропускной способности и качества обслуживания E6 сетей в сравнении с IP-сетями.

Анализ архитектурных особенностей современных маршрутизаторов [5] позволяет выделить следующие основные классификационные признаки:

1. Буферизация пакета.
 - 1.1. Обязательная буферизация (store-and-forward).
 - 1.2. Непосредственная передача между портами (cut-through).
2. Кэш маршрутов.
 - 2.1. Без кэширования маршрутной информации.
 - 2.2. Использование кэша маршрутной информации.

3. Форма представления маршрутной информации.

3.1. Хэш таблица.

3.2. 256-деревья.

Поскольку современные высокопроизводительные маршрутизаторы в основном реализуют следующий набор возможностей: кэширование маршрутной информации в портах, непосредственная передача пакетов между портами, хранение маршрутной информации в форме 256-деревьев, – основные сравнения будут выполнены для указанного набора признаков; в противном случае признаки будут указаны явно.

Для сравнения алгоритмов рассмотрим более подробно архитектурные особенности маршрутизаторов, представленные на рис. 1, 2.

а) прием пакета в буфер

б) обработка пакета

в) передача пакета из буфера

Рисунок 1 – Порядок прохождения пакета в маршрутизаторе с обязательной буферизацией пакета

Таким образом, задержка пакета при прохождении маршрутизатора с обязательной буферизацией складывается из времени приема пакета в буфер и времени обработки. При этом время обработки включает в себя время принятия маршрутного решения (переключения) и время ожидания пакетом освобождения порта.

На рис. 2 представлена схема прохождения пакета в маршрутизаторе с непосредственной передачей между портами. В отличие от повторителя, который ретранслирует принимаемый пакет практически без задержек, маршрутизатор должен принять решение о выборе порта переадресации. Для принятия такого решения необходимо иметь заголовок пакета, по крайней мере, его часть, содержащую адрес назначения. Так, например, кадр Ethernet содержит адрес назначения в первых шести октетах. Таким образом, буферизуется начало кадра, включающее адрес назначения и некоторое количество байтов, которое будет получено за время принятия маршрутного решения. В случае, если порт назначения свободен, кадр начинает ретранслироваться одновременно с процессом его принятия в буфер. Минимальный размер буфера равен длине адреса назначения плюс количество битов, поступающих за время принятия маршрутного решения в соответствии со скоростью передачи данных в канале. В случае, если порт назначения занят, используется ранее рассмотренная схема с буферизацией целого пакета.

а) прием заголовка пакета в буфер

б) ретрансляция принимаемого пакета

в) ретрансляция пакета из буфера

Рисунок 2 – Порядок прохождения пакета в маршрутизаторе с непосредственной передачей пакета между портами

Выберем обозначения для рассмотренных временных характеристик в соответствии с табл. 1 для дальнейших расчетов.

Таблица 1 – Обозначение временных параметров буферизации

Обозначение	Описание
τ_{Pkt}	Время приема пакета
τ_{PktHdr}	Время приема заголовка пакета
τ_{RtDc}	Время принятия маршрутного решения

Принятие маршрутного решения может выполняться центральным узлом и может быть распределенным по портам. В основе алгоритмов принятия маршрутного решения лежит адресная таблица маршрутизатора. В распределенном подходе используются копии адресной таблицы и репликации основной таблицы по портам. Размер адресной таблицы может быть значительным – десятки тысяч строк, что существенно увеличивает время принятия маршрутного решения.

Для сокращения времени принятия маршрутного решения используется кэширование маршрутной информации в специальной быстрой памяти порта, именуемом кэш. Организация алгоритмов заполнения кэша основана на вытеснении старых и неиспользуемых записей. Работы посвящены оценкам эффективности кэширования указаны в [5]; результаты могут быть кратко сформулированы следующим образом: кэш эффективен в маршрутизаторах близких к периферии, при передаче длинных последовательностей пакетов (мультимедиа) между фиксированными узлами сети. В этом случае для каждого следующего пакета из кэша извлекается результат маршрутного решения, сохраненный для некоторого предыдущего (первого) пакета. Сначала порт выполняет быструю проверку в кэше и при отсутствии соответствующей записи обращается к центральному узлу маршрутизации, который анализирует полную адресную таблицу. Однако в магистральных сетях эффективность кэша существенно снижается из-за разнородной адресной информации пакетов и неизбежного быстрого вытеснения записи.

Дальнейшие оценки времени принятия маршрутного решения τ_{RtDc} будут выполнены на основе характеристик, приведенных в табл. 2.

Таблица 2 – Обозначение параметров маршрутного решения

Обозначение	Описание
τ_{Cash}	Время обращения к кэшу
τ_{Rt}	Время обращения к полной адресной таблице
p_{Cash}	Вероятность наличия записи в кэше

При работе с маршрутной информацией существенным фактором, влияющим на время принятия маршрутного решения, является форма представления маршрутной информации. Наиболее простой является организация маршрутной информации в форме неупорядоченной таблицы, тогда время поиска пропорционально половине длины таблицы. Упорядоченные таблицы и хэширование являются более эффективным способом, который применялся в некоторых ранних моделях маршрутизаторов CISCO [5]. Практически все современные маршрутизаторы используют для представления маршрутной информации 256-дерева [5]. В некоторых случаях кэш может быть организован на основе ассоциативной памяти с параллельным поиском по всем записям.

Рассмотрим 256-дерева как основную форму представления маршрутной информации. Адрес разбивается на октеты; каждый из последовательно занумерованных октетов задает соответствующий уровень древовидной структуры. В таком случае время поиска записи фиксировано и пропорционально количеству уровней дерева – количеству октетов адреса. Оценки времени поиска маршрута в дальнейшем изложении будут выполнены для представления информации в форме 256-деревьев.

Для дальнейшего сравнительного анализа представим алгоритмы (рис. 3, а,б) прохождения пакетов (кадров) для маршрутизаторов работающих по технологиям:

- IPoverEthernet (IPoE);
- E6.

Выделим для сравнения основные 4 варианта (табл. 3), которые получаются в результате комбинации выделенных архитектурных особенностей современных маршрутизаторов.

Таблица 3 – Обозначения типов архитектур и сетевых технологий

		Технология	
		IPOverEthernet	E6
Тип архитектуры	Store-and-forward	sfIPoE	sfE6
	Cut-through	ctIPoE	ctE6

Основное отличие ct алгоритмов состоит в том, что на шаге 2 в буфер принимается только начальная часть пакета. Прием в буфер оставшейся части пакета выполняется параллельно с остальными шагами алгоритмов. При попадании в заключительный блок (14 – IPoE, 8 – E6) передача пакета из буфера выполняется параллельно с его приемом.

Две технологии существенно отличаются длиной начальной части пакета (кадра), необходимой для запуска алгоритма обработки пакета, описание которой приведено в табл. 4.

Таблица 4 – Стартовая часть пакета (кадра)

Технология	Заголовки		Длина (октетов)
IPoE	EH	IPH	14+20=34
E6	EH (DA)		6

Где EH – заголовок Ethernet; IPH – заголовок IP; DA – поле адреса назначения заголовка EH.

Таким образом, из анализа табл. 4 можно сделать вывод об определенных преимуществах технологии E6, связанных с сокращением стартовой задержки в 5,6 раз по сравнению с IPoE, что позволяет существенно сократить время доставки пакета при использовании Cut-through архитектур.

а) технология IPOverEthernet (sfIPoE)

б) технология E6 (sfE6)

Рисунок 3 – Алгоритмы обработки (переключения) пакета

2. Оценка времени доставки пакетов. На оценку времени доставки пакета существенно влияет фактор наличия очередей в сетевых устройствах (коммутаторах, маршрутизаторах). Первоначальные оценки выполним в предположении отсутствия очередей; в этом случае достигается минимально возможное время доставки пакета. Отличия времени доставки при отсутствии очередей связаны с наличием либо отсутствием маршрутной записи в кэше, что обуславливает необходимость использования минимальных, максимальных и средних значений.

Оценим время обработки пакета сетевым устройством:

$$\begin{aligned}
 \tau_{IPoE}_{min} &= 2 \cdot \tau_{Enc} + \tau_{CashIP}, \\
 \tau_{IPoE}_{max} &= 2 \cdot \tau_{Enc} + \tau_{CashIP} + \tau_{RtIP} + \tau_{ARP} + \tau_{ARPr eq}, \\
 \tau_{IPoE}_{avr} &= 2 \cdot \tau_{Enc} + \tau_{CashIP} + (1 - p_{Cash}) \cdot (\tau_{RtIP} + \tau_{ARP} + (1 - p_{ARP}) \cdot \tau_{ARPr eq}), \\
 \tau_{ARPr eq} &= 2 \cdot \tau_{Seg} + 2 \cdot \tau_{Enc}, \\
 \tau_{E6}_{min} &= \tau_{CashE6}, \\
 \tau_{E6}_{max} &= \tau_{CashE6} + \tau_{RtE6}, \\
 \tau_{E6}_{avr} &= \tau_{CashE6} + (1 - p_{Cash}) \cdot \tau_{RtE6}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Необходимым условием для начала обработки пакета в sf маршрутизаторах является буферизация целого пакета, которая выполняется за время τ_{Seg} ; для маршрутизаторов st – буферизация адресной части: τ_{SegDA} и τ_{SegIPE} . Наиболее простые оценки получаем для sf маршрутизаторов; в этом случае время обработки пакета маршрутизатором суммируется со временем передачи в сегменте и умножается на общее число сегментов. Количество промежуточных сетевых устройств обозначим как qR . Тогда время доставки может быть оценено как:

$$\begin{aligned}
 \tau_{sfIPoE} &= \tau_{Seg} + (\tau_{Seg} + \tau_{IPoE}) \cdot qR, \\
 \tau_{sfE6} &= \tau_{Seg} + (\tau_{Seg} + \tau_{E6}) \cdot qR.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Для маршрутизаторов st оценки несколько видоизменяются: время передачи пакета в сегменте учитывается один раз, а затем суммируются лишь времена обработки на маршрутизаторах:

$$\begin{aligned}
 \tau_{stIPoE} &= \tau_{Seg} + (\tau_{SegIPE} + \tau_{IPoE}) \cdot qR, \\
 \tau_{stE6} &= \tau_{Seg} + (\tau_{SegDA} + \tau_{E6}) \cdot qR.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

На основе построенных формул (1), (2) могут быть выполнены оценки времен доставки пакетов для выбранных технологий и типов маршрутизаторов. Однако, наиболее сложной частью расчетов является получение исходной информации, связанной с характеристиками выполнения отдельных этапов обработки пакетов в маршрутизаторах. Как правило, производитель предоставляет информацию либо о максимальной производительности маршрутизатора в пакетах в секунду, которая достигается при полностью сбалансированной передаче пакетов минимальной длины между парами портов, либо о производительности внутренней шины маршрутизатора.

Для получения относительных оценок в более простой форме используем дополнительные допущения. Пусть производительность сегмента равна BR битов в секунду, а производительность сетевого устройства в k раз больше и равняется $k \cdot BR$. Примем за единицу количество операций N_{op} , которые необходимо выполнить при маршрутизации одного пакета в технологии IPoE. Используем экспертные оценки относительной трудоемкости отдельных этапов обработки пакета, представленные в табл. 5.

Таблица 5 – Оценки трудоемкости выполнения операций

Этап	Enc	$CashIP$	$RtIP$	ARP
Трудоемкость	0,1	0,1	0,5	0,2
Обозначение	k_{Enc}	k_{CashIP}	k_{RtIP}	k_{ARP}

При хранении информации в форме 256-дерева время выполнения операции пропорционально количеству уровней дерева, поэтому при сравнении времен выполнения соответствующих операций IPoE и E6 технологий будем использовать следующий коэффициент: $k_{E6} = 6/4 = 1,5$. Тогда из (1) получим:

$$\begin{aligned}
 \tau_{1IPoE_{\min}} &= \frac{2 \cdot Nop \cdot k_{Enc} + Nop \cdot k_{CashIP}}{k \cdot BR} = \frac{Nop}{k \cdot BR} \cdot (2 \cdot k_{Enc} + k_{CashIP}), \\
 \tau_{1E6_{\min}} &= \frac{Nop}{k \cdot BR} \cdot k_{CashIP} \cdot k_{E6}, \\
 \tau_{1IPoE_{\max}} &= \frac{Nop}{k \cdot BR} \cdot (4 \cdot k_{Enc} + k_{CashIP} + k_{RIP} + k_{ARP}) + 2 \cdot \frac{Lpkt}{BR}, \\
 \tau_{1E6_{\max}} &= \frac{Nop}{k \cdot BR} \cdot (k_{CashIP} + k_{RIP}) \cdot k_{E6}, \\
 \tau_{1IPoE_{avr}} &= \frac{Nop}{k \cdot BR} \cdot (2 \cdot k_{Enc} + k_{CashIP} + (1 - p_{Cash}) \cdot (k_{RIP} + k_{ARP})) + \\
 &(1 - p_{Cash}) \cdot (1 - p_{ARP}) \cdot \left(\frac{Nop}{k \cdot BR} \cdot 2 \cdot k_{Enc} + 2 \cdot \frac{Lpkt}{BR} \right), \\
 \tau_{1E6_{avr}} &= \frac{Nop}{k \cdot BR} \cdot (k_{CashIP} + (1 - p_{Cash}) \cdot k_{RIP}) \cdot k_{E6}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Для расчета общего времени доставки подставим (4) в (2), (3) и получим следующие формулы:

$$\begin{aligned}
 \tau_{sfIPoE} &= \frac{Lpkt}{BR} + \left(\frac{Lpkt}{BR} + \tau_{1IPoE} \right) \cdot qR, \\
 \tau_{sfE6} &= \frac{Lpkt}{BR} + \left(\frac{Lpkt}{BR} + \tau_{1E6} \right) \cdot qR, \\
 \tau_{ctIPoE} &= \frac{Lpkt}{BR} + \left(\frac{Lipe}{BR} + \tau_{1IPoE} \right) \cdot qR, \\
 \tau_{ctE6} &= \frac{Lpkt}{BR} + \left(\frac{Lda}{BR} + \tau_{1IPoE} \right) \cdot qR.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Для сравнительной оценки следует найти отношения времен доставки пакета (5) технологии E6 и IPoE; обозначим соответствующие отношения как $\rho = \tau_{E6} / \tau_{IPoE}$.

3. Оценка влияния очередей. Наличие очередей пакетов в сетевом устройстве увеличивает время обработки пакета. Для грубой оценки влияния очередей предложено использовать следующее соотношение:

$$\tau_{1}^{Total} = \tau_{1}^{Proc} + \tau_{1}^{Queue}, \tag{6}$$

где τ_{1}^{Total} – общее время обработки, τ_{1}^{Proc} – время выполнения операций обработки (4), τ_{1}^{Queue} – время пребывания в очереди.

Для оценки времени пребывания пакета в очереди к порту назначения τ_{1}^{Queue} предложено использовать марковские процессы с дискретным временем [4]. В качестве такта времени Δt выберем время обработки пакета в случае отсутствия очередей. Основными параметрами цепи Маркова, моделирующей работу выходного канала некоторого порта, являются: n – общее количество портов устройства; Q – вероятность поступления пакета с входного канала некоторого порта устройства. Состояние $s_i, i \geq 0$ в этом случае полностью характеризуется количеством пакетов i ; при этом пакет пребывает в очереди в состояниях $s_i, i > 1$.

Пример цепи Маркова при $n = 4$ представлен на рис. 4. Отметим, что поступление пакетов из каждого порта рассматривается независимо и невозможно поступление более одного пакета из порта за такт времени; поэтому число пакетов поступивших за такт времени не превышает $n - 1$ (перенаправление пакета в порт прибытия исключается).

Марковская цепь является бесконечной в случае отсутствия ограничений на размер буфера пакетов и может быть представлена в параметрической форме (табл. 6). В графе примечания не

указано событие завершения обработки текущего пакета, которое имеет место во всех состояниях кроме s_0 .

Рисунок 4 – Пример цепи Маркова выходного канала порта (при $n = 4$)

Таблица 6 – Параметрическое представление цепи Маркова

Исходное состояние	Следующее состояние	Вероятность перехода	Событие
s_0	s_0	$(1 - q)^{n-1}$	Отсутствует
s_0	$s_j, j = \overline{1, n-1}$	$q^j \cdot (1 - q)^{n-j-1}$	Поступило j пакетов
$s_i, i > 0$	s_{i-1}	$(1 - q)^{n-1}$	Отсутствует
$s_i, i > 0$	$s_{i+j-1}, j = \overline{1, n-1}$	$q^j \cdot (1 - q)^{n-j-1}$	Поступило j пакетов

Вычисление вероятности наличия очереди $p_{Queue} = 1 - \pi_0 - \pi_1$ (где π_i – стационарная вероятность нахождения в состоянии s_i) позволяет выполнить дальнейшую оценку среднего времени пребывания пакета в очереди [4].

4. Анализ результатов сравнительной оценки. Сравнительная оценка технологий Е6 и IPoE выполнена с помощью полученных соотношений (5). При значении параметров, указанных в табл. 7, с помощью программы Excel получены оценки времени доставки пакета, приведенные в табл. 8.

Таблица 7 – Выбранные значения параметров

kEnc	kCashIP	kRtIP	kARP	kE6	pCash	pARP	k	Lpkt	BR	qR	Nop	Lipe	Lda
0,1	0,1	0,5	0,2	1,5	0,6	0,6	10	12208	10 ⁹	10	10 ³	272	48

Таблица 8 – Оценки времени доставки пакета

	τ_{IPoE}	τ_{E6}	ρ	τ_{sfIPoE}	τ_{sfE6}	ρ	τ_{ctIPoE}	τ_{ctE6}	ρ
Max	24,5 мкс	90 нс	273	379,7 мкс	135,2 мкс	2,8	260,3 мкс	13,6 мкс	19,2
Min	30 нс	15 нс	2	134,6 мкс	134,4 мкс	1,001	15,23 мкс	12,84 мкс	1,19
Avg	3,97 мкс	45 нс	88	174 мкс	134,8 мкс	1,3	54,61 мкс	13,14 мкс	4,16

Таким образом, технология Е6 имеет наибольшие преимущества по сравнению с IPoE в приложениях реального времени с жесткими временными ограничениями. Оценка максимального времени обработки кадра устройством в 273 раза меньше, что обусловлено отсутствием ARP запросов в сети во время доставки кадра; в результате общее время доставки кадра уменьшается в 19 раз.

Следующей по значимости областью применения является IP-телефония и телеконференции, где основным ограничением на возможность предоставления услуг является среднее время доставки. В этом случае получаем выигрыш в 88 раз на устройстве и в 4 раза для общего времени доставки.

Отметим, что наибольшие преимущества технологии Е6 могут быть получены в случае использования устройств с типом архитектуры cut-through, что обуславливает необходимость аппаратной реализации КМЕ6.

На графиках, изображенных на рис. 5, представлено влияние основных параметров на среднее время доставки пакета для архитектуры cut-through; значения остальных параметров (кроме указанного на горизонтальной оси) сохранены в соответствии с табл. 8 ($\rho = 4,16$). Анализ графиков позволяет сделать вывод, что преимущества технологии Е6 усиливаются при:

- увеличении длины маршрута – $\rho = 6,9$ на 20 хопах;
- увеличении производительности устройства – $\rho = 4,24$ при $k = 50$;
- уменьшении эффективности кэша – $\rho = 7,7$ при $pCash = 0,1$ (что соответствует расположению в магистральных).

Отметим, что уменьшение длины пакета приводит к некоторому ухудшению показателей – $\rho = 3,82$ на пакетах минимальной длины.

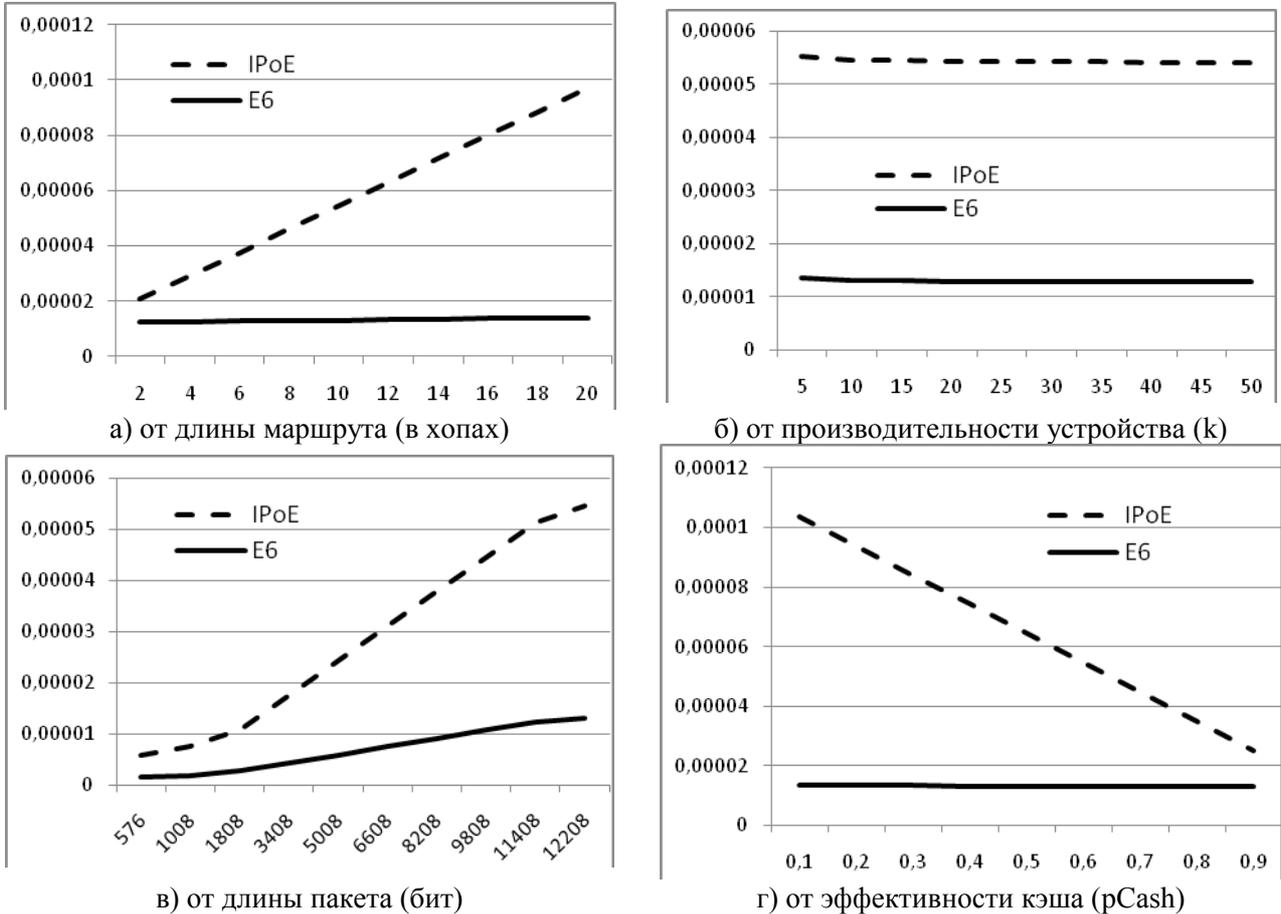


Рисунок 5 – Зависимость среднего времени доставки пакета (с) от основных параметров

Таким образом, в настоящей работе на основе анализа архитектурных особенностей сетевых устройств и алгоритмов обработки пакетов получены соотношения для оценки времени доставки пакета в TCP/IP и E6 сетях. Первоначально оценки получены для случая отсутствия очередей, затем построены цепи Маркова для исследования влияния очередей. Результаты сравнительных оценок подтверждают существенные преимущества технологии E6 перед традиционной технологией «TCP/IP поверх Ethernet».

Литература

1. Воробієнко П.П. Всемирная сеть Ethernet? / П.П. Воробієнко, Д.А. Зайцев, О.Л. Нечипорук // Зв'язок.– 2007. – № 5.– С. 14-19.
2. Воробієнко П.П. Спосіб передачі даних в мережі із заміщенням мережного та транспортного рівнів універсальною технологією каналного рівня / П.П. Воробієнко, Д.А. Зайцев, К.Д. Гуляєв / Патент України на корисну модель № 35773, u2008 03069, Заявл. 11.03.08; Опубл. 10.10.08, Бюл. № 19.
3. Guliaiev K.D. Simulating E6 Protocol Networks using CPN Tools / K.D. Guliaiev, D.A. Zaitsev, D.A. Litvin, E.V. Radchenko // Proc. of Int. Conference on IT Promotion in Asia. – Tashkent (Uzbekistan), 2008. – P. 203–208.
4. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / Вишнеvский В.М. / М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
5. Боллапрагада В. Структура операционной системы Cisco IOS / Боллапрагада В., Мэрфи К., Уайт Р. – М.: Вильямс, 2002. – 208 с.