

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В E6 СЕТЯХ

Технология E6 [1,2] представляет собой новый подход к организации телекоммуникационных сетей, полностью построенных на основе Ethernet. Современные тенденции развития телекоммуникаций направлены на доминирование Ethernet как на периферии, так и в магистральных. Однако в условиях гомогенной среды двойная адресация IP-МАС и протоколы TCP, IP являются излишними и существенно снижают эффективность работы сети.

Попытки IEEE обеспечить масштабируемость Ethernet с помощью технологии магистральных мостов провайдера PVB (Provider Backbone Bridge) [3] приводят к расширению заголовка кадра и привносят дополнительное отображение МАС адресов пользователя и магистрала.

Преимуществами технологии E6 [1,2] являются: расширение адресного пространства сети; аннулирование протоколов TCP, IP и отображения адресов ARP/RARP, а также соответствующих заголовков пакетов; ускорение алгоритмов работы сетевых устройств.

Для подтверждения работоспособности E6 сетей выполнено их моделирование [4] раскрашенными сетями Петри в среде моделирующей системы CPN Tools [5]. Однако, при построении моделей на основе модифицированных компонентов [6] использованы статические маршрутные таблицы.

Целью настоящей работы является формирование принципов адаптации известных протоколов динамической маршрутизации в E6 сети, а также построение компонентов дистанционно-векторных алгоритмов маршрутизации E6 сетей.

**2. Особенности маршрутизации в E6 сетях.** Адрес E6 представляет собой унифицированный 6-ти байтовый иерархический адрес, который используется на всех уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем. Также как CIDR IP адрес он состоит из адреса сети и адреса хоста с границей, указанной с помощью маски (количества битов адреса сети). Длина 6 байтов обеспечивает непосредственное размещение E6 адреса в поле МАС адреса кадра Ethernet. Интерфейсы пользователя не изменяются при использовании E6-DNS.

На канальном-физическом уровнях использована возможность программной замены МАС-адреса устройства для назначения E6-адреса; для гарантированной доставки информации (аналогичной TCP) задействован Ethernet LLC2. На периферии сети возможно использование обычных коммутаторов Ethernet. Основным сетевым устройством является коммутирующий маршрутизатор КМЕ6.

Отличительной чертой процесса доставки кадра (пакета) в E6 сети является неизменность заголовка кадра, содержащего пару E6 адресов получателя и отправителя; ключевой информацией при выборе маршрута является E6 адрес получателя.

Сеть образована КМЕ6, соединёнными между собой и с терминальными (абонентскими) устройствами. Адресная таблица КМЕ6 имеет следующий формат:

(e6nw, metric, port, options),

где e6nw=(E6A,mask) – идентификатор E6 сети (подсети), E6A – E6 адрес хоста/сети, mask – маска в форме количества битов адреса сети, metric – метрика, port – номер порта для перенаправления кадра, options – дополнительные параметры.

Пара (E6A,mask) может специфицировать как E6 сеть, так и отдельный хост (при mask=48); в таком случае mask задаёт количество битов E6 адреса назначения, подлежащих сравнению при выборе маршрута. При выборе альтернативных маршрутов использованы обычные предпочтения: наибольшая маска, наименьшая метрика.

Преимуществами КМЕ6 в сравнении с традиционными IP-маршрутизаторами являются: отсутствие повторной инкапсуляции пакета в кадр, отсутствие отображения IP-МАС адре-

сов, указание интерфейса и шлюза только с помощью номера порта. Перечисленные особенности приводят также к упрощению алгоритмов динамической маршрутизации. По сравнению с коммутаторами Ethernet КМЕ6 обеспечивают агрегирование Е6 адресов под общей маской и таким образом существенно сокращает количество записей адресной таблицы, позволяя строить глобальные сети.

Предложено выполнить адаптацию известных алгоритмов (протоколов) динамической маршрутизации, в основном стека протоколов TCP/IP, в Е6 сети. Выбор обусловлен иерархической структурой Е6 адреса, аналогичной IP адресу. Альтернатива пассивного прослушивания и широковещания, принятая в Ethernet (и PVB), отвергнута, так как она скачкообразно снижают полезную производительность сети и приводит к временным перегрузкам.

Принципы адаптации алгоритмов динамической маршрутизации TCP/IP в Е6 сети можно сформулировать следующим образом:

- расширить поле адреса с 4 до 6 байтов и увеличить допустимый размер маски с 32 до 48 битов;
- заменить IP-адрес интерфейса и адрес шлюза номером порта КМЕ6;
- модифицировать форматы сообщений и алгоритмы их формирования, передачи, обработки.

**3. Протокол Е6-RIP.** В настоящей работе выполнена адаптация известного дистанционно-векторного протокола динамической маршрутизации RIP [7]. Описания представлены на языке раскрашенных сетей Петри, что позволяет непосредственно использовать их в моделях сетей в среде CPN Tools [5], а также в дальнейшей программно-аппаратной реализации КМЕ6.

Работа алгоритма основана на периодической рассылке полной таблицы маршрутизации соседям (с периодом  $uta$ ) и немедленной (с периодом  $tuta$ ) рассылке триггерных изменений при обновлении маршрутов. Для ликвидации циклических маршрутов использован метод расщепления горизонта, при котором обновление не отправляется соседу, от которого оно получено.

Возможно использование сложных метрик, но в большинстве случаев в качестве метрики рассматривают количество промежуточных узлов (хопов). Выбирают максимальное значение метрики INFINITY, которое ограничивает длину допустимого маршрута. Сети с метрикой INFINITY (и больше) считают недостижимыми.

Сообщение Е6-RIP имеет следующий формат:

(operation, e6nw, metric),

где operation представляет одну из операций: request – запрос, response – ответ. Регулярные обновления отправляются по таймеру обновлений  $uta$  в формате response даже если не было соответствующего запроса.

В таблице маршрутизации выделены необходимые для работы протокола опции:

(e6nw, metric, port, chg, ta, gcta),

где chg – признак изменений, ta – таймаут старения записи, gcta – таймаут сбора мусора.

Таймаут ta переустанавливается при получении маршрута от соседей; по истечении ta запись помечается как недостижимая сеть метрикой INFINITY и устанавливается gcta. По истечению gcta запись удаляется из таблицы.

При получении обновления метрика увеличивается на стоимость соответствующего канала (на единицу). Новый маршрут к достижимой сети добавляется в таблицу; новый маршрут к недостижимой сети ( $metric=INFINITY$ ) игнорируется. Обработка обновлений для известной сети выполняется следующим образом:

- заменить запись при меньшей метрике;

- при получении INFINITY для записи с метрикой меньше INFINITY, установит метрику INFINITY и запустит gcta;
- игнорировать получение INFINITY для записи с метрикой INFINITY;
- игнорировать обновления с большей метрикой (или равной метрикой и другим номером порта);
- при получении обновления с равной метрикой и таким же номером порта переустановит ta.

Признак изменений chg используется для последующей рассылки триггера изменений; он устанавливается при добавлении записи или изменении метрики. Опцией является опережающее сохранение альтернативного маршрута при равной метрике и истекающем таймауте ta.

Стандарт RIP [7] рекомендует следующие величины таймеров: ut=30 с., ta=180 с., gcta=120 с., tuta=1-5 с., которые являлись предметом исследований для E6-RIP. Исследовалась опция расщепления горизонта с отравленным реверсом, когда обновление перенаправляется отправителю с метрикой INFINITY. Кроме того, исследовалось само значение INFINITY (стандартная величина равна 16).

**3. Модель КМЕ6.** В качестве базовой компоненты выбрана модель IP-маршрутизатора [6], которая модифицирована с учётом использования E6 адресов; выделен компонент (аналогично [4]), моделирующий работу отдельного порта, а также использованы рекурсивные функции [8] для работы с адресной таблицей, представленной списковой структурой.

Модель КМЕ6 собирается путём клонирования необходимого числа портов port, дополненного компонентами RIPprocess, RIPupdate и позициями, моделирующими объекты внутренней памяти. Описания основных типов данных, приведены на рис. 1. Пример модели для 4-х портов представлен на рис. 2.

Позиции in\* задают номера соответствующих портов. Позиции p\*IN, p\*OUT моделируют входные и выходные каналы портов соответственно. Внутренняя память КМЕ6 представлена следующими позициями: RT – таблица маршрутизации, Buf – буфер кадров (пакетов), msg-in – входящие сообщения E6-RIP, Bufrt – буфер исходящих сообщений E6-RIP. Таблица маршрутизации RT моделируется контактной позицией (I/O) для отображения на главной странице модели.

---

```

colset e6=product INT*INT*INT*INT*INT*INT;
colset mask=INT;
colset nwt=product e6 * mask timed;
colset b=INT timed;
colset pkt=record e6src:e6 * e6dst:e6 * data:b * dt:INT;
colset operation=with REQUEST | RESPONSE;
colset rtm=record opr:operation*nw:nwt *m:INT;
colset cha=union pk:pkt+rm:rtm timed;
colset rtmin=record opr:operation*nw:nwt *m:INT*ifn:INT;
colset rtr=record nw:nwt *m:INT*ifn:INT*chg:BOOL*ta:INT*gcta:INT;
colset buf=product pkt*INT timed;
colset brtm=product rtm*INT;
colset brtr=product rtr*INT;

```

---

Рис. 1

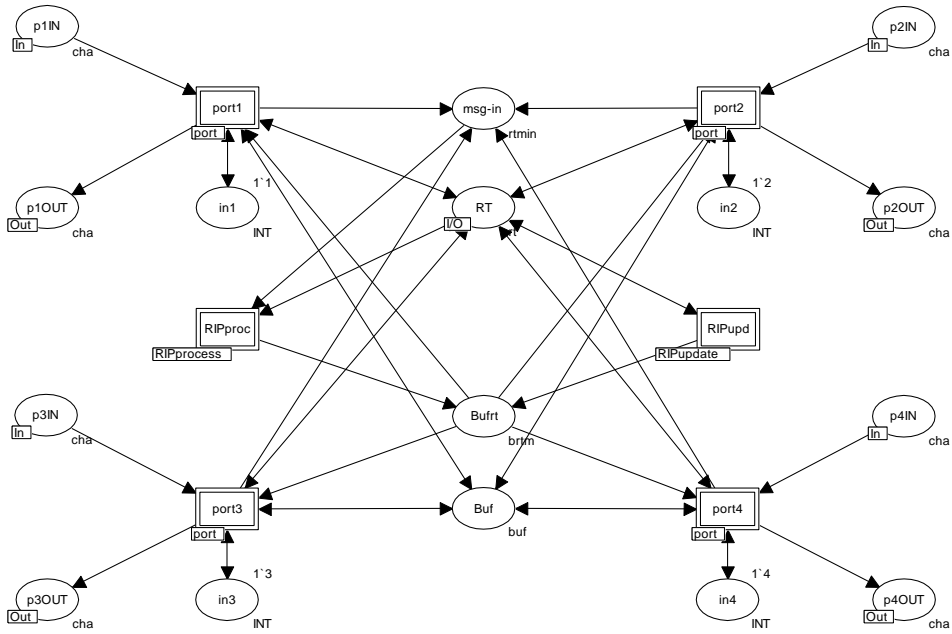


Рис. 2

Модель порта КМЕ6 (port) представлена на рис. 3.

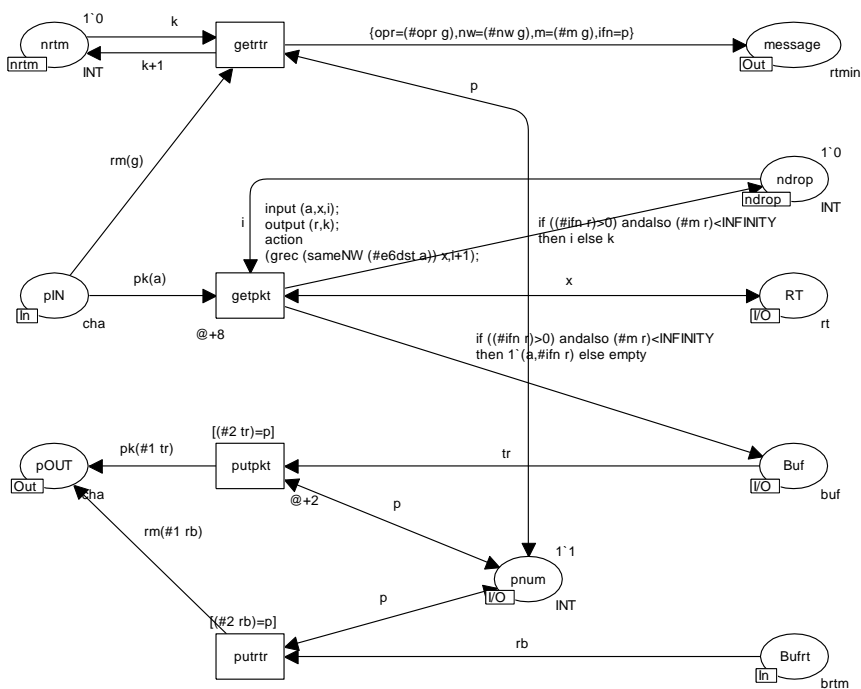


Рис. 3

Нормальная работа порта обеспечивается парой переходов getpkt, putpkt, выполняющих приём входного пакета с размещением в буфере Buf и передачу пакетов из буфера соответственно. При размещении пакета в буфере по таблице маршрутизации RT определяется порт для перенаправления пакета. Рекурсивная функция gres находит подходящую запись таблицы; функция sameNW выполняет сравнение E6 адресов таблицы и адреса назначения пакета (e6dst); записи таблицы с метрикой INFINITY игнорируются. Переход droppkt моделирует потерю пакетов при отсутствии адресной информации; при этом увеличивается счётчик ndrop.

Пара переходов gettr, puttr моделирует получение и отправку сообщений протокола E6-RIP соответственно. Выполняется подсчёт полученных сообщений E6-RIP с помощью счёт-

чика `nrtn`. Для различения информации канала использован тип данных объединения `union`; признак `pk` выделяет обычные пакеты, признак `gm` – сообщения E6-RIP.

Остановимся на описаниях основных типов данных модели (рис. 1). E6 адрес описан кортежем `eb`; тип `nwt` описывает адрес E6 сети/хоста как кортеж, состоящий из E6 адреса `eb` и маски `mask`. Пакет `pkt` состоит из E6 адресов отправителя `ebsrc` и назначения `ebdst`, содержимого `data`, временного штампа `dt` для дальнейшей оценки качества обслуживания. Форматы сообщения `rtm` протокола E6-RIP и записи таблицы маршрутизации `rtr` соответствуют описаниям раздела 3. Тип `cha` описывает информацию канала, которая может быть либо пакетом данных `pk`, либо сообщением E6-RIP `gm`; в более сложных вариантах могут использоваться также признаки доступности канала [5]. Тип `rt` описывает таблицу маршрутизации как список записей `rtr`. Типы `buf`, `brtr` описывают записи выходных буферов пакетов и маршрутной информации соответственно; второе поле задаёт номер порта назначения. Тип `rtmin` использован для внутреннего хранения полученного сообщения типа `rtm` вместе с номером входного порта `ifn`.

**4. Компоненты E6-RIP.** Протокол E6-RIP представлен двумя компонентами `RIPprocess`, `RIPupdate`, изображенными на рис. 4, 5 соответственно. Компонент `RIPprocess` обрабатывает полученные сообщения протокола E6-RIP, компонент `RIPupdate` выполняет формирование обновлений и обработку таймаутов.

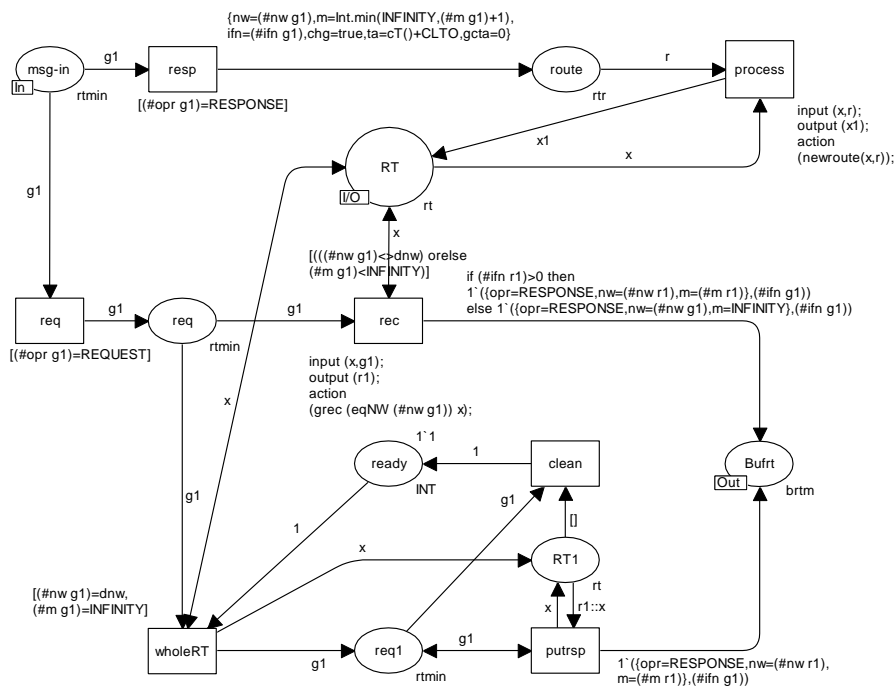


Рис. 4

Сообщения E6-RIP поступают в позицию `msg-in`. Пара переходов `resp`, `req` распознаёт команды ответа и запроса соответственно. При обработке запроса существенно отличаются запрос на передачу всей таблицы `wholeRT` и запрос об отдельной сети (записи) `rec`. При формировании ответа переход `rec` выполняет поиск указанной в запросе сети с помощью функции `gres` и возвращает соответствующую запись; при отсутствии записи указывается метрика `INFINITY`. Для передачи всей маршрутной таблицы она дублируется в позиции `RT1` и передаётся по записям в порт запроса переходом `putrsp`; переход `clean` выполняет очистку пустой таблицы и возвращает признак готовности `ready`. Константа `dnw` соответствует маршруту по-умолчанию.

При обработке ответа (маршрутного обновления) переходом `resp` сообщение преобразуется в формат записи таблицы маршрутизации с увеличением метрики на единицу, установкой признака изменения `chg` и таймаута старения `ta`; запись сохраняется в позиции `route`. Обработка маршрутного обновления реализована функцией `newroute` в атрибутах перехода `proccss`; описания функции `newroute` и вложенной функции обновления записи таблицы `procc` приведены на рис. 6.

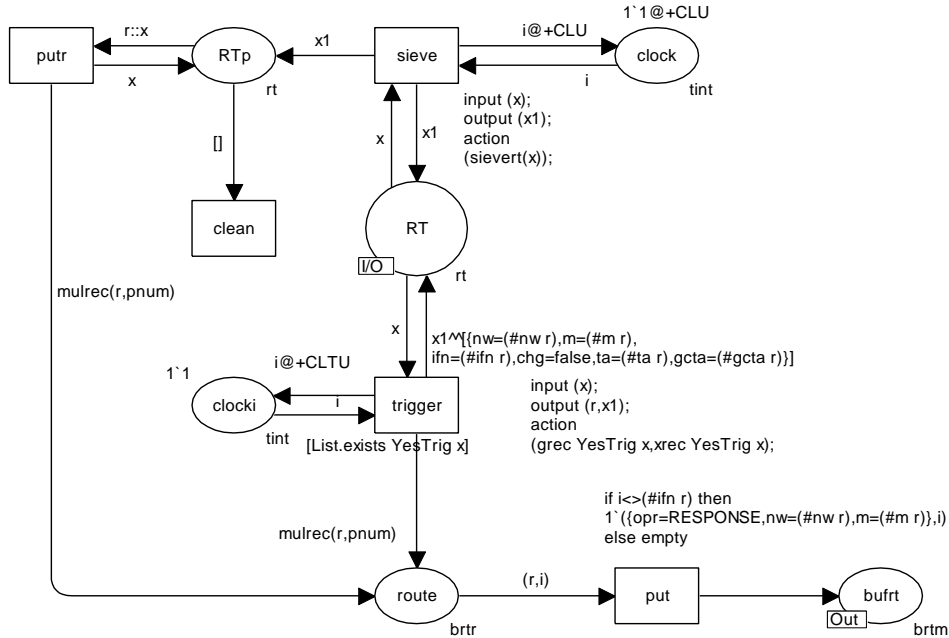


Рис. 5

Работа компоненты RIPupdate (рис. 5) инициируется двумя таймерами: регулярных обновлений `clock` и триггерных обновлений `clocki`. В первом случае ретранслируется вся таблица переходом `putr`, во втором – одна запись (с установленным признаком `chg`) переходом `trigger`. В позиции `RTp` сохраняется копия таблицы для последующей ретрансляции по записям переходом `putr`; переход `clean` очищает пустую таблицу. Функция `mulrec` служит для размножения записи по всем портам. Обновления попадают в позицию `route` откуда передаются в буфер переходом `put` в формате сообщения `rtm`; расщепление горизонта реализовано проверкой на порт источника (`i<>(#ifn r)`).

---

```

fun procr(r0:rtr,r:rtr)=
if (#m r)=INFINITY andalso (#m r0)=INFINITY then r0 else
if (#m r)<INFINITY andalso (#m r0)<INFINITY andalso
  (#ifn r)<>(#ifn r0) andalso (#m r)>=(#m r0) then r0 else
if (#m r)=INFINITY andalso (#m r0)<INFINITY then
  {nw=(#nw r0),ifn=(#ifn r0),m=INFINITY,chg=true,ta=0,gcta=cT()+CLGCTO} else
if (#m r)<INFINITY andalso (#m r)<(#m r0) then r else
if (#m r)<INFINITY andalso(#m r0)<INFINITY andalso
  (#ifn r)=(#ifn r0) andalso (#m r)=(#m r0) then
  {nw=(#nw r0),ifn=(#ifn r0),m=(#m r0),chg=(#chg r0),ta=(#ta r),gcta=0} else r;
fun newroute([],r:rtr)=if (#m r)<INFINITY then [r] else [] |
  newroute(r0:t,r:rtr)=if (#nw r0)=(#nw r) then [procr(r0,r)]^t else [r0]^newroute(t,r);
fun sievert([])=[] |
  sievert(r:t)=if (#gcta r)>0 andalso (#gcta r)<=cT() then sievert(t) else
  if (#ta r)>0 andalso (#ta r)<=cT() then
    ([(nw=(#nw r),m=INFINITY,ifn=(#ifn r),chg=true,ta=0,gcta=cT()+CLGCTO)]^sievert(t))
    else ([r]^sievert(t));
fun mulrec (r,1) = 1'(r,1) | mulrec (r,i)=1'(r,i)++mulrec(r,i-1);

```

---

Рис. 6

При копировании таблицы маршрутизации переходом sieve реализована её фильтрация в соответствии с таймаутами функцией sievert (рис. 6). Дополнительную фильтрацию можно выполнять также в переходе триггерных изменений trigger для более точного отслеживания таймаутов.

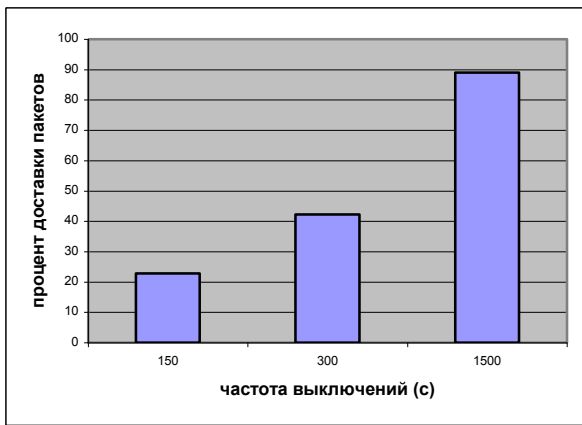
**5. Анализ результатов моделирования Е6 сетей.** Разработанные компоненты использованы для моделирования конкретных заданных Е6 сетей [1,6] совместно с моделями терминальных (абонентских) сетей для генерации трафика [6]. В модель терминальной сети [6] добавлены измерительные фрагменты для оценки максимального и среднего времени доставки пакета и трафика [9]. На сетях с неизменной структурой проверена правильность заполнения маршрутных таблиц. При запаздывающей генерации трафика потерянные пакеты отсутствуют. Для косвенной оценки качества работы протокола Е6-RIP и выбора его параметров использовано количество потерянных пакетов. Для оценки накладных расходов подсчитывалось количество переданных Е6-RIP сообщений и отношение их размера к полезному трафику.

Поскольку адаптация к фиксированной структуре является достаточно тривиальной, основное внимание исследования сконцентрировано на поведении протокола при изменениях структуры сети. Для этих целей описанные модели дополнены средствами выключения отдельных портов и устройств в целом, а также отдельного подсчёта пакетов потерянных при отключении. При включении устройств использованы запросы на передачу полных таблиц маршрутизации от соседей. Реализованы случайные равномерно распределённые выключения устройств с периодом OffPer и продолжительностью OffDur; возможно применение других законов распределения выключений.

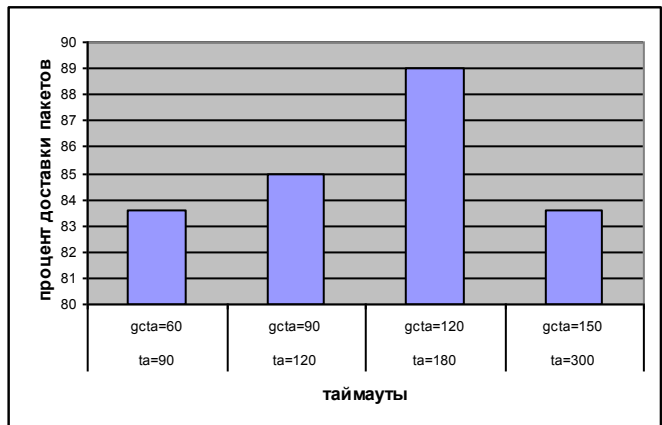
На рис. 7 представлены результаты оценки влияния параметров протокола на процент доставленных пакетов и нагрузку, создаваемую динамической маршрутизацией; при оценке нагрузки в рис. 7 в,г) использована логарифмическая шкала. Продолжительность выключения OffDur установлена равной 100-200 с. Из рис. 7 а) видно, что период выключений с продолжительностью 200-400 с. (среднее 300 с.) является критическим для работы сети; дальнейшие оценки проводились для периода 1000-3000 с. (среднее 1500 с.). При стандартном периоде обновлений, как увеличение, так и уменьшение таймаутов приводят к худшим результатам по сравнению со стандартными таймаутами (рис. 7 б). Существенное влияние на процент доставки пакетов оказывает период регулярных обновлений (рис. 7 в); однако его уменьшение до 10 с. увеличивает нагрузку протокола маршрутизации на сеть до 11%. Достаточно приемлемым является вариант уменьшения периода до 20 с. и пропорционального уменьшения таймаутов старения и сбора мусора до 120 и 80 с. соответственно. Влияние периода триггерных изменений (рис. 7 г) незначительно; уменьшение его значений ниже стандартного равного 1 с. не рекомендовано. Отравленный реверс не даёт существенных преимуществ по сравнению с простым расщеплением горизонта. Исследование влияния величины INFINITY затруднено в текущей версии CPN Tools так как связано с генерацией и обработкой сетевых структур большого размера, что требует значительных ресурсов при моделировании.

Таким образом, предложены принципы адаптации известных протоколов динамической маршрутизации в Е6 сети. Разработаны спецификации и компоненты для моделирования протокола Е6-RIP на языке раскрашенных сетей Петри.

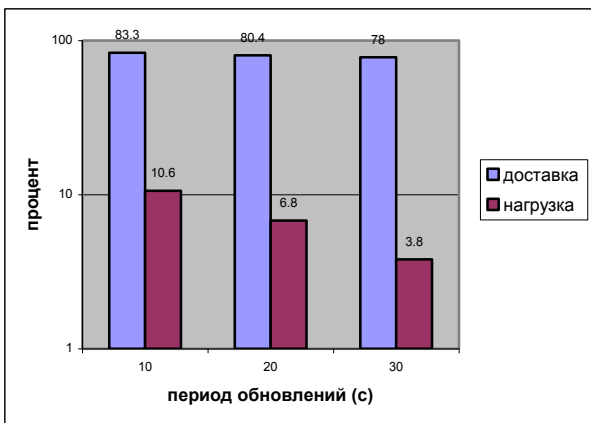
Выполнено моделирование Е6 сетей с выключениями устройств для оценки работы протокола и выбора его параметров. Протокол обеспечивает быструю адаптацию к изменяющейся структуре сети.



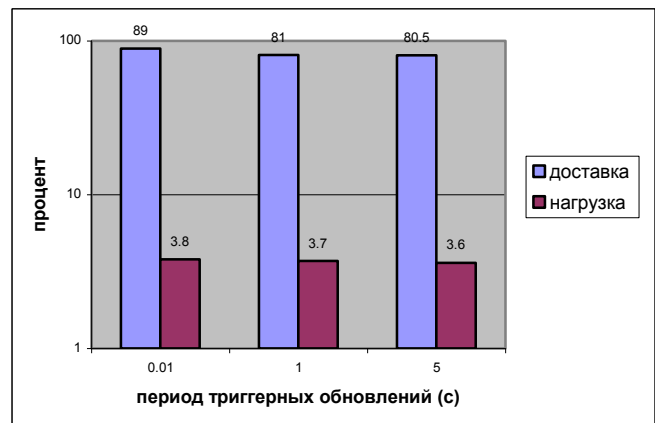
а)



б)



в)



г)

Рис. 7

**Список литературы:** 1. Воробийченко П.П., Зайцев Д.А., Нечипорук О.Л. Всемирная сеть Ethernet? // Зв'язок, 2007, № 5. - С. 14-19. 2. Воробийченко П.П., Зайцев Д.А., Гуляев К.Д. Спосіб передачі даних в мережі із заміщенням мережного та транспортного рівнів універсальною технологією каналного рівня // Патент на корисну модель № 35773, Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 10.10.2008. 3. Fang L., Zhang R., Taylor M. The Evolution of Carrier Ethernet Services – Requirements and Deployment Case Studies // Communications, March 2008, vol. 46, no. 3. – P. 69-76. 4. Guliaiev K.D., Zaitsev D.A., Litvin D.A., Radchenko E.V. Simulating E6 Protocol Networks using CPN Tools // Proc. of International Conference on IT Promotion in Asia, August 22-26, 2008, Tashkent (Uzbekistan), P. 203-208. 5. Зайцев Д.А., Шмелёва Т.Р. Моделирование телекоммуникационных сетей в системе CPN Tools // Одесса, ОНАС, 2009, 64 с. 6. Зайцев Д.А., Сагун А.Л. Исследование эффективности технологии MPLS с помощью раскрашенных сетей Петри // Зв'язок, 2006. Т. 65, №5. – С. 49-55. 7. Routing Information Protocol / C. Hedrick // Network Working Group. – RFC 1058, 1988. – 33 p. 8. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Switched Ethernet Response Time Evaluation via Colored Petri Net Model // Proc. of International Middle Eastern Multiconference on Simulation and Modelling, August 28-30, 2006. - Alexandria (Egypt). - P. 68-77. 9. Зайцев Д.А., Шмелёва Т.Р. Оценка характеристик сетей Ethernet с помощью параметрических моделей Петри // Зв'язок, 2007, № 4. - С. 62-67.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

Поступила в редколлегию