

# Тестирование производительности ПЛИС-прототипа встроенного контроллера гигабитного Ethernet при работе с ТСП

Д.И. Слинкин

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, г. Москва,

slin@nm.ru

**Аннотация** — Современные микропроцессоры имеют одно или несколько ядер и могут включать в себя встроенные контроллеры периферийных интерфейсов. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) используются для тестирования проектов микросхем в качестве их электрических макетов с пониженной частотой, обычно 100-200 МГц. Оценка производительности ПЛИС-прототипа контроллера Ethernet 1 Гбит/с, предназначенного для встраивания в микропроцессор с архитектурой КОМДИВ64, была одной из задач его тестирования. Следствием высокой пропускной способности Гигабитного Ethernet является загрузка микропроцессора, которая может стать «бутылочным горлышком» для всей системы. Непосредственное встраивание модели контроллера в ПЛИС-прототип микропроцессора не обеспечивает высоких результатов в силу ограниченной частоты ядра. Предлагается оценивать производительность прототипа контроллера Ethernet в составе IBM-PC совместимой ЭВМ. В статье приводятся информация о факторах, влияющих на производительность при работе Ethernet, а также сведения о программных и аппаратных методах разгрузки процессора. Представлены результаты теста производительности ТСП в сравнении с иностранным аналогом и серийно выпускаемым микропроцессором. Выполнена оценка эффективности средств аппаратной разгрузки микропроцессора.

**Ключевые слова** — Гигабитный Ethernet, производительность, тестирование, микропроцессор, ПЛИС, Linux, netperf.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Сетевой контроллер функционирует в системе, состоящей из аппаратных средств, ОС, драйвера, и прикладных программ. Каждый компонент оказывает влияние на общую производительность. На скорости 1 Гбит/с через сетевой контроллер за 1 секунду может пройти до 1488 тысяч пакетов длиной 64 байта или 81 тысяча пакетов по 1512 байт. При традиционной модели для каждого пакета будет выставлено прерывание, что создаст значительную нагрузку на систему. Известно эмпирическое правило: для работы с протоколом ТСП на скорости 1 Гбит/с требуется 1 ГГц частоты процессора. Для микропроцессоров с частотой порядка 800 МГц производительность контроллеров периферийных интерфейсов будет ограничена. Пропускная способность канала 1000Base-T равна 125 Мбайт/с. Для встроенных в микропроцессор контроллеров с шиной AXI пропускная способность шины, составляющая 1

Гбайт/с, вполне достаточна. Для модулей с шиной PCI 33 МГц доступные 132 Мбайт/с могут стать ограничением при одновременном подключении нескольких устройств. Реальная скорость работы сетевого контроллера может оказаться ниже номинальной пропускной способности канала. В процессе разработки встроенного контроллера Ethernet 1 Гбит/с было актуальным экспериментальное исследование производительности его ПЛИС-прототипа.

## II. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Рассмотрим ситуацию «Receive livelock». При получении пакета контроллер Ethernet выставляет аппаратное прерывание, имеющее высший приоритет по сравнению с функциями интерфейса ядра ОС и прикладными программами. Процессор сохраняет контекст (значения регистров и конвейера) в зарезервированную область ОЗУ и передает управление обработчику прерываний. Операции сохранения и восстановления контекста трудно поддаются оптимизации. Обработчик прерывания, входящий в состав драйвера, передает принимаемые пакеты в очередь более высокого уровня. Для снижения накладных расходов драйвер обрабатывает все пакеты с «открытыми» дескрипторами.

После очистки приемного буфера обработчик прерываний вызывает планировщик ядра, который вызывает процедуру верхнего уровня для обработки принятых пакетов. Если пакеты предназначены для прикладных процессов, ядро ОС копирует их в ОЗУ и продолжает планировать свои задачи. Здесь факторами, влияющими на эффективность, являются затраты на копирование в ОЗУ и пересечение границы уровня ядра.

Если новое прерывание выставляется во время работы процедуры верхнего уровня, имеющей нормальный приоритет, то её выполнение приостанавливается, а управление снова передается обработчику прерываний. При большом темпе прерываний процедуры обработки пакетов верхнего уровня и прикладные процессы не смогут продвигаться. Очередь переполнится и в ней не остается свободных буферов. Обработчик прерываний не сможет передавать пакеты на верхние уровни. Статистика счетчиков приема будет увеличиваться, но фактически все пакеты будут отброшены, а система перестанет выполнять полезные функции.

Реальная система обладает ограниченной пропускной способностью, и способна обрабатывать пакеты, частота поступления которых ниже определенного максимума. В западной литературе используется термин MLFRR (Maximum Loss-Free Receive Rate), предложенный К.К. Ramakrishnan. Зависимость пропускной способности системы от входной нагрузки представлена на рис. 1.

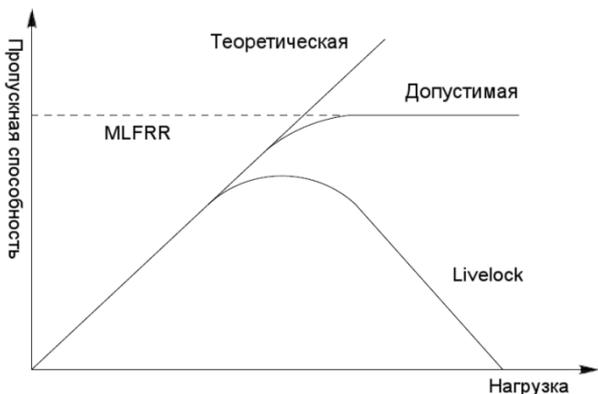


Рис. 1. Зависимость пропускной способности от входной нагрузки, по материалам [1]

Частота MFLRR рассчитывается по формуле:

$$MLFRR = \frac{1}{2 * T_{intr} + t_p + t_a^{sw} + t_a},$$

$$T_{intr} = (t_i^{sw} + t_i)$$

где:

$t_i^{sw}$  — время переключения контекста для обработчика прерывания;

$t_i$  — время обработки прерывания;

$t_p$  — время обработки пакета протоколом приема;

$t_a^{sw}$  — время переключения контекста для пользовательского приложения;

$t_a$  — время обработки входящего пакета прикладной программой.

В формуле не учитываются промахи в кэш-памяти. Рассматриваемая модель использует два прерывания на один входящий пакет. Сетевой контроллер выставляет аппаратное прерывание, когда пакет принят и помещен в список дескрипторов. Вторым является асинхронное программное прерывание (softirq), связанное с передачей данных, представленных в форме Socket Buffer (SKB), ядру ОС Linux на обработку. В модели наиболее значимы времена  $t_p$  (от 45% до 77%) и  $t_a$  (от 14% до 39%) в зависимости от загрузки системы.

Для контроллеров со скоростью 10 Гбит/с и выше, промахи при работе с кэш памятью играют существенную роль. Авторы [2] выяснили, что для сервера с про-

цессором Intel Xeon Quad-Core и сетью 10 Гбит/с, работающего под управлением ОС Linux, основными «бутылочными горлышками» являются: работа драйвера (>26%), копирование данных из буферов SKB в пользовательские буферы (до 34% в зависимости от размера данных), и восстановление буферов SKB после копирования (> 20%).

Для уменьшения количества прерываний используются программный метод опроса или аппаратное объединение прерываний. Метод опроса заключается в отключении прерываний и передаче ОС контроля над приемом пакетов. Система сама решает, сколько пакетов она способна принять и обработать, а сколько ресурсов следует уделить ядру ОС и прикладным процессам. Если приходит слишком много пакетов, они отбрасываются еще в сетевом адаптере.

Метод опроса для ОС Linux, называемый «NAPI» (от английского New API) [3] работает следующим образом:

- сетевая карта работает в обычном режиме, по прерыванию;
- при получении первого пакета, драйвер регистрирует устройство в poll списке и отключает прерывания;
- ОС время от времени, проверяет poll список и обрабатывает пакеты;
- после того, как все пакеты были обработаны, устройство удаляется из poll списка, и снова включаются прерывания.

Аппаратный метод объединения прерываний называется «Interrupt moderation». Некоторые сетевые карты имеют автоматическую настройку этого механизма. При ручной настройке программисту доступны два таймера: абсолютный и пакетный.

Абсолютный таймер стартует после получения первого пакета данных. Последующие пакеты не влияют на его работу. После истечения таймера генерируется прерывание и начинается новый отчет. ОС обрабатывает несколько пакетов сразу в момент получения прерывания. Недостаток абсолютного таймера состоит в том, что, если придет всего один пакет, его прием будет отложен до наступления таймаута. Поэтому из-за высокой латентности абсолютный таймер не подходит для низкого сетевого трафика.

Объединение прерываний, при высоком входном трафике, представлено на рис 2.

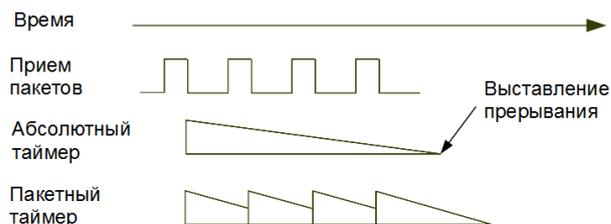


Рис. 2. Работа абсолютного таймера при высоком входном трафике, по материалам [4]

Пакетный таймер стартует в момент приема или отправки пакета. Если до его истечения контроллер успевает обработать еще один пакет, таймер сбрасывается и перезапускается. Прерывание генерируется по истечению времени. Пакетный таймер минимизирует задержки, но при высоком сетевом трафике он бесполезен – прерываний может не быть очень долго, так как таймер сбрасывается всякий раз при получении или отправке пакета.

При использовании механизма временного опроса за каждую секунду система может принимать не более  $(Q/2 * T)$  пакетов. Частота MLFRR будет минимумом между скоростью приема пакетов и отношением процессорного времени, свободного от обработки прерываний, к сумме времен работы протокола приема и прикладной программы [1] (адаптировано):

$$MLFRR = \min \left( \frac{Q}{2 * T}, \frac{1 - \frac{T_{intr}}{T}}{T_p + T_a} \right),$$

$$T_a = (k_p t_a + t_a^{sw}),$$

$$T_p = k_p t_p$$

где:

Q – максимальное число (квота) пакетов, объединяемых за одно аппаратное прерывание;

T – период таймера;

$k_p$  – число пакетов, принимаемых из списка дескрипторов за одно программное прерывание,  $k_p \leq Q$ .

Временная диаграмма обработки входящих пакетов при временном опросе и асинхронном программном прерывании (softirq) для ОС Linux представлена на рис. 3. Время простоя процессора обозначено:  $t_f$ .

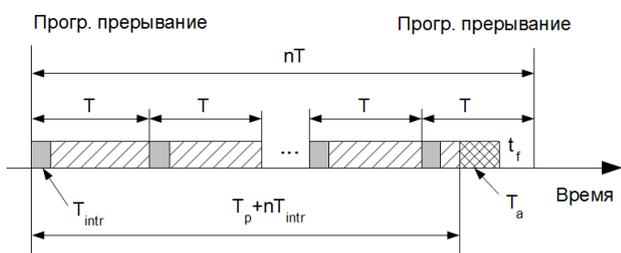


Рис. 3 Диаграмма обработки пакета, по материалам [5]

Рекомендуется совместное использование пакетного и абсолютного таймеров. В случае высокого трафика абсолютный таймер обеспечит доставку пакетов. А при среднем и низком трафике пакетный таймер снизит задержки. Недостаток метода опроса – трудность подбора параметров Q и T.

Решением может быть выбор одной из трех политик объединения прерываний: снижение латентности,

максимальная разгрузка процессора, обеспечение максимальной производительности. Подбор правильной политики управления прерываниями, актуален и для контроллеров Ethernet 40 Гбит/с и 100 Гбит/с[6].

### III. МЕТОДЫ РАЗГРУЗКИ ПРОЦЕССОРА

Для разгрузки центрального процессора производители включают в свои сетевые адаптеры аппаратные механизмы расчета контрольных сумм для TCP, UDP и IP. Механизм «TCP segmentation offload» разбивает крупные блоки данных на пакеты меньшего размера. Эффективность аппаратной разгрузки КС оценивается в 10%. Технология «Zero-Copy» предполагает прямую передачу данных с использованием DMA между сетевым контроллером и прикладной программой, минуя промежуточные буферы в пространстве ядра ОС. При этом сокращаются операции копирования данных и экономится процессорное время. Авторами [7] предложен модуль TOE (TCP/IP Offload Engine) для ОС Linux, использующий Zero-Copy. Тестирование показало снижение времени TCP/IP на 11% при приеме, и 10-20% при передаче.

Программный интерфейс MSG\_ZEROCOPY, предложенный Willem de Bruijn, включенный в состав ядра ОС Linux 4.14, предназначен для работы с TCP, UDP, RAW и пакетными сокетами. Эксперименты показали, что для теста «netperf», TCP\_STREAM, 10Гбит/с, интерфейс MSG\_ZEROCOPY позволяет сэкономить 92% циклов (процессора) и 39% общих системных циклов. Экономия при выполнении некоторых реальных задач составила 8% времени и 5% запросов в секунду[8].

Функция «Flow control» используется для регулирования трафика в зависимости от пропускной способности принимающего адаптера. При угрозе переполнения буфера партнеру передается специальный код паузы. «Flow control» работает только в режиме полного дуплекса. В полудуплексном режиме используется метод «Back pressure», предполагающий отправку на передающий порт сигнала коллизии и приостановку передачи. В результате процессор не тратит ресурсы на повторную пересылку данных.

В ходе работы протоколов высокого уровня и прикладных программ может возникнуть проблема «недостаточной передачи» (англ. Starvation of transmits), связанная с более высоким приоритетом приема пакетов по сравнению с передачей. Снижение приоритета передачи обусловлено желанием сократить потерю пакетов при высоком входном трафике. Ситуация может возникнуть, если прерывания от трансмиттера имеют меньший приоритет по сравнению с приемом, если события от приемника обрабатываются драйвером первыми, и, если механизм роолинг для передачи задается с низким приоритетом. При длительной перегрузке системы, низкий приоритет передатчика приводит к уменьшению или даже полной остановке процесса передачи - пакеты могут ожидать отправки в то время как интерфейс трансмиттера свободен.

#### IV. МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Экспериментальная оценка производительности ПЛИС-прототипа является частью тестирования проекта контроллера Ethernet. Параллельно выполняется интеграционное тестирование ПЛИС-прототипа в составе ЭВМ под управлением ОС Linux и драйвера. Вторая задача состоит в сравнении быстродействия с иностранными аналогами. Третьей целью является оценка эффективности средств аппаратной разгрузки процессора, реализованных в ПЛИС-прототипе. Рассмотрим возможные подходы для тестирования производительности:

1. Установка ПЛИС-прототипа в виде РМС-мезонина в серийно выпускаемый процессорный модуль. В этом случае производительность будет ограничена частотой микропроцессора, составляющей сотни МГц.

2. Встраивание контроллера Ethernet в ПЛИС-прототип микропроцессора в виде функционального блока. В свою очередь ПЛИС распаивается на «плате исследовательской», специально спроектированной для отладки микропроцессора, и имеющей все периферийные интерфейсы. Преимуществом является использование шины AXI и близость к условиям работы встроенного сетевого контроллера. Однако производительность будет ограничена частотой ПЛИС, порядка 100 МГц, которой явно недостаточно.

3. Установка ПЛИС-прототипа в виде РМС-мезонина в IBM-PC совместимую ЭВМ (далее ПЭВМ), рис. 4. В этом случае производительность микропроцессора, заявленная производителем в 2-3ГГц, не станет «бутылочным горлышком». Частота ПЛИС является достаточной для оценки производительности будущего контроллера Ethernet при скорости до 1 Гбит/с. Имеется возможность сравнения прототипа контроллера Ethernet с иностранными аналогами при работе под управлением ОС Linux, так как в дистрибутив входят соответствующие драйверы. Дополнительным плюсом, является интеграционное тестирование ПЛИС-прототипа с ОС Linux и ПЭВМ.

Основные результаты были получены при установке ПЛИС-прототипа в ПЭВМ. Для краткости в статье приводятся только результаты теста «netperf», TCP\_STREAM под ОС Linux. Максимальная длина пакета MTU 1500 является общепринятой для компьютерных сетей. Общая загрузка процессора оценивалась программой «gnome-system-monitor» для ПЭВМ, и командой «top -b |grep CPU» для платы на основе микропроцессора с архитектурой КОМДИВ64. Встроенная функция «-c» теста «netperf» позволяет оценить загрузку процессора конкретной программой (тестом), её результаты приведены в скобках.

Использовалась ПЭВМ с процессором Intel Pentium 3.2 GHz, чипсет SiS 655FX, ОЗУ DIMM DDR-400, 1ГБ. частота шины PCI 33МГц. Механизм Hyper-threading был отключен - процессор работал как одноядерный. Так как измерения проводились в разное время, версии ядра ОС Linux отличались.



Рис. 4. ПЛИС-прототип контроллера Ethernet 1Гбит/с, установленный в IBM-PC совместимую ЭВМ

#### V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

ПЛИС-прототип контроллера Ethernet был установлен в PCI-разъем ПЭВМ. Тестирование показало зависимость результатов от чипсета. Увеличение MTU до 9000 («Jumbo Frames») повысило производительность [9]. Оценивалась эффективность встроенного механизма объединения прерываний, для которого были применены следующие настройки: 4000 прерываний в секунду, пакетный таймер 40мкс. Ядро ОС Linux 2.6.32. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты теста объединения прерываний для ПЛИС-прототипа в составе ПЭВМ

Объединение прерываний отключено		
	Скорость, Мбит/с	Загрузка ЦП
Передача	457	27%
Прием	644	50%
Объединение прерываний включено		
	Скорость, Мбит/с	Загрузка ЦП
Передача	465	30%
Прием	591	35%

Для оценки эффективности механизма аппаратного подсчета контрольных сумм TCP использовался обновленный драйвер, задействовавший NAPI и ОС

Linux, ядро 3.2.54. Механизм объединения прерываний был отключен. Результаты представлены в табл.2.

Таблица 2

*Результаты теста подсчета контрольных сумм для ПЛИС-прототипа в составе ПЭВМ*

Аппаратный подсчет контрольных сумм TCP отключен.		
	Скорость, Мбит/с	Загрузка ЦП
Передача	402	31% (49%)
Прием	570	54% (98%)
Аппаратный подсчет контрольных сумм TCP включен.		
	Скорость, Мбит/с	Загрузка ЦП
Передача	405	32% (50%)
Прием	648	44% (99%)

Подсчет контрольной суммы TCP на прием увеличил производительность на 12%. Для передачи данных подсчет контрольной суммы не повлиял на производительность. Однако прироста производительности в сравнении с табл. 1 не получено.

Для сравнения с иностранным аналогом в инструментальную ЭВМ на место ПЛИС - прототипа был установлен сетевой контроллер Marvell 88E8003. Драйвер использовал механизм NAPI. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

*Результаты теста для Marvell в составе ПЭВМ*

	Скорость, Мбит/с	Загрузка ЦП
Передача	551	34% (37%)
Прием	654	42% (99%)

Для сетевых карт иностранного производства можно получить результат теста TCP\_STREAM порядка 940-960Мбит/с. Но для имеющейся конфигурации стенда производительность ПЛИС-прототипа оказалась сравнимой с Marvell 88E8003.

После изготовления серийных образцов микропроцессора с архитектурой КОМДИВ64, работающих на частоте 800МГц, было выполнено измерение производительности встроенного сетевого контроллера. Использовалась ОС Linux с ядром 4.14.26. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

*Результаты теста встроенного контроллера Ethernet 1 Гбит/с в составе платы на основе микропроцессора*

	Скорость, Мбит/с	Загрузка ЦП
Передача	688	98% (100%)
Прием	714	98% (100%)

Скорость приема близка к скорости ПЛИС-прототипа на ПЭВМ, а скорость передачи существенно выше. При запуске теста «netperf» UDP\_STREAM на плате с микропроцессором был получен результат: 962Мбит/с для передачи (из них 944Мбит/с принято партнером) и 541Мбит/с для приема (результат передачи партнера 962 Мбит/с.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования был опробован метод тестирования производительности ПЛИС-прототипов встроенных контроллеров Гигабитного Ethernet. Стандартным подходом является использование ОС Linux и теста «netperf». Обычно, для тестирования в НИИСИ РАН, используются отладочные платы собственной разработки. Поэтому, установка ПЛИС-прототипа в ПЭВМ является необычным для нас решением. Она позволила обойти проблему малой частоты процессорных модулей, первоначально доступных для тестирования. Автор статьи подготовил аппаратно-программный стенд для измерения пропускной способности контроллеров Ethernet. Совместно с разработчиком была определена задача оценки эффективности аппаратных средств разгрузки процессора. Выполнена адаптация драйвера для работы с ядром ОС Linux 2.6.32, компиляция ОС Linux и запуск тестов. В настоящее время выпущены образцы микропроцессоров, со встроенным контроллером Ethernet 1Гбит/с. Готовится серийное производство модулей на их основе. Скорость работы сетевого контроллера в составе микросхемы превысила ожидаемые величины.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность Алексею Крыницкому – за консультации по аппаратной части. Антону Павлову, Петру Мамонову и Алексею Кулешову за консультации в части драйверов и ОС Linux.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Indiresan, A. Mehra, and K. G. Shin, Receive Livelock Elimination via Intelligent Interface Backoff // TCL Technical Report// University of Michigan. 1998. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.31.41> (дата обращения: 18.03.2018)
- [2] G. Liao, L. Bhuyan Analyzing performance and power efficiency of network processing over 10 GbE// Journal of Parallel and Distributed Computing. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2012.02.016> (дата обращения: 18.03.2018)
- [3] «NAPI» / The Linux Foundation. URL: <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/napi> (дата обращения 18.03.2018)
- [4] Interrupt Moderation Using Intel®GbE Controllers/ Intel Corporation. 2007. URL: <http://www.intel.com/content/dam/doc/application-note/gbe-controllers-interrupt-moderation-appl-note.pdf> (дата обращения: 18.03.2018)
- [5] X. Chang, J. K. Muppala, Z. Han, J. Liu Analysis of Interrupt Coalescing Schemes for Receive-Livelock Problem in Gigabit Ethernet Network Hosts // IEEE International Conference on Communications , 2008, p. 1835-1839/ URL: <http://repository.ust.hk/ir/bitstream/1783.1-3229/1/045333881.pdf> (дата обращения: 18.03.2018)

- [6] K. Liang, A. Kleen, J. Brandenburg Improve network performance by setting per-queue interrupt moderation in Linux / 01.org (Intel open source). 2017. URL: <https://01.org/linux-interrupt-moderation> (дата обращения: 18.03.2018)
- [7] L. Tianhua, Z. Hongfeng, L. Jie, Z. Chuansheng Design and Implementation of Zero-Copy for Linux / International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications (IJCSIM). 2011. p.9-18. URL: [http://www.mirlabs.org/ijcsim/regular\\_papers\\_2011/Paper2.pdf](http://www.mirlabs.org/ijcsim/regular_papers_2011/Paper2.pdf) (дата обращения: 18.03.2018)
- [8] W. de Bruijn Sendmsg copy avoidance with MSG\_ZEROCOPY. draft. 2017. URL: <https://netdevconf.org/2.1/papers/netdev.pdf> (дата обращения: 18.03.2018)
- [9] Д.И.Слинкин Тестирование производительности прототипа контроллера Ethernet 1 Гбит/с //Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сборник научных трудов/ Под ред. В.Я. Стенина. М:МИФИ–2013. С. 208–210.

## Testing the Performance of the Embedded Gigabit Ethernet Controller's FPGA Prototype when Working with TCP

D.I. Slinkin

Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Moscow,  
slin@nm.ru

**Abstract** — Modern microprocessors have one or more cores. Also they can contain embedded controllers of peripheral interfaces. Field-programmable gate arrays (FPGAs) used for testing designs of microcircuits as their electric prototypes with reduced frequency, which is usually 100-200 MHz. The microprocessor with KOMDIV64 architecture includes an embedded Gigabit Ethernet controller. Performance evaluation of the FPGA-prototype of that controller was one of the testing tasks. The consequence of the high bandwidth of Gigabit Ethernet is the CPU loading, which can become a "bottle neck" for the entire system. At the beginning of the article, information is presented to understand the factors which affects the Ethernet performance, based on the of the English-language materials. Also, some information about software and hardware CPU offloading methods is given. The task is an experimental performance evaluation of the Gigabit Ethernet Controller's FPGA prototype to confirm the absence of internal delays in the project. In addition, efficiency of hardware CPU offloading features is of interest. The direct including of the Ethernet controller project into FPGA prototype of whole microprocessor can't provide for good results due to limited core frequency. It is proposed to evaluate the performance of the Gigabit Ethernet controller project by installing a board with its FPGA prototype into the PCI slot of an IBM-PC compatible computer. For brevity, only the results of netperf TCP\_STREAM test under Linux are given. The CPU load was estimated with the "gnome-system-monitor" program, or the netperf built-in function. The results are presented, in comparison with an analog by Marvell and with a microprocessor after its manufacturing. As a result, the receive speed of the CPU embedded Ethernet is almost equal to the FPGA prototype on IBM PC, but the transmission speed is much higher.

**Keywords** — Gigabit Ethernet, performance, testing, microprocessor, FPGA, Linux, netperf.

### REFERENCES

- [1] A. Indiresan, A. Mehra, and K. G. Shin, Receive Livelock Elimination via Intelligent Interface Backoff/ TCL Technical Report/ University of Michigan. 1998. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.31.41> (access date: 18.03.2018)
- [2] G. Liao, L. Bhuyan Analyzing performance and power efficiency of network processing over 10 GbE // Journal of Parallel and Distributed Computing. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2012.02.016> (access date: 18.03.2018)
- [3] «NAPI» / The Linux Foundation. URL: <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/napi> (access date: 18.03.2018)
- [4] Interrupt Moderation Using Intel®GbE Controllers / Intel Corporation. 2007. URL: <http://www.intel.com/content/dam/doc/application-note/gbe-controllers-interrupt-moderation-appl-note.pdf> (access date: 18.03.2018)
- [5] X. Chang, J. K. Muppala, Z. Han, J. Liu Analysis of Interrupt Coalescing Schemes for Receive-Livelock Problem in Gigabit Ethernet Network Hosts / IEEE International Conference on Communications. 2008. p. 1835-1839. URL: <http://repository.ust.hk/ir/bitstream/1783.1-3229/1/045333881.pdf> (access date: 18.03.2018)
- [6] K. Liang, A. Kleen, J. Brandenburg Improve network performance by setting per-queue interrupt moderation in Linux / 01.org (Intel open source). 2017. URL: <https://01.org/linux-interrupt-moderation> (access date: 18.03.2018)
- [7] L. Tianhua, Z. Hongfeng, L. Jie, Z. Chuansheng Design and Implementation of Zero-Copy for Linux / International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications (IJCSIM), 2011, p.9-18/URL: [http://www.mirlabs.org/ijcsim/regular\\_papers\\_2011/Paper2.pdf](http://www.mirlabs.org/ijcsim/regular_papers_2011/Paper2.pdf) (access date: 18.03.2018)
- [8] W. de Bruijn Sendmsg copy avoidance with MSG\_ZEROCOPY. draft. 2017/ URL: <https://netdevconf.org/2.1/papers/netdev.pdf> (access date: 18.03.2018)
- [9] D. Slinkin Testirovanie proizvoditel'nosti prototipa kontrollera Ethernet 1 Gbit/s (Testing the performance of a 1 Gbps Ethernet controller prototype) // Elektronika, mikro- i nanoelektronika. Sbornik nauchnyh trudov.Pod red. V.Ja. Stenina. Moscow. 2013. S. 208-210. (rus).