

# Анализ потребления мощности в схемах с Ethernet

Майк ДЖОНС (Mike JONES)  
Перевод: Иосиф КАРШЕНБОЙМ  
iosifk@eltech.spb.ru

Сокращение расхода электроэнергии в электронных устройствах становится все более и более важным параметром. И это стимулирует развитие, поскольку всемирное законодательство вынуждает производителей улучшать эффективность энергопотребления и в периоды активной работы, и в периоды ожидания. Расход же электроэнергии продолжает повышаться, поскольку устройства становятся все более быстродействующими и компактными. Исследования показали, что в домах в периоды ожидания может тратиться до 25% мощности электроэнергии. Чтобы помочь сохранить энергию, Международное энергетическое агентство (IEA) предложило к 2010 году довести потребление мощности во всех устройствах, находящихся в периодах ожидания, до не более чем 1 ватт. Это решение получило название «Инициатива на один ватт».

## Введение

Сейчас различные устройства, работающие по Ethernet, появляются не только в офисах и в различных стационарных сетях, но и в новых областях, например, таких как мобильные устройства, работающие от аккумуляторов. Время работы от батареи в большой степени зависит от эффективности потребления мощности электроэнергии как в режиме работы, так и в течение периодов ожидания, что, вероятно, является более критичным. Например, это характерно для автомобильных устройств.

Вычисление расхода электроэнергии для устройств, работающих по Ethernet, не столь очевидно, как это может показаться. Чтобы успешно выполнить проекты, имеющие малое потребление мощности по Ethernet, сначала нам будет важно понять, где эта мощность рассеивается. В любом устройстве с Ethernet главное рассеяние мощности происходит на приемопередатчике PHY. Обычно большинство проектов приемопередатчиков PHY представляют собой драйверы, которые работают в непрерывном «нагруженном»

режиме. Мощность рассеивается как внутри микросхемы PHY, так и снаружи — в трансформаторе (рис. 1).

В даташитах микросхем, работающих по Ethernet, обычно публикуют только текущее потребление тока —  $I_{phy}$ . Для того чтобы вычислить полное потребление тока в схеме, необходимо учесть рассеяние мощности и в трансформаторе. Чтобы учесть ток в трансформаторе —  $I_{trans}$ , разработчик должен обычно добавлять примерно 40 мА для 100Base-TX или 70 мА для PHY 10Base-T. Таким образом, мощность, рассеиваемая вне PHY, является довольно существенной и, как правило, составляет приблизительно 30–50% полного потребления тока схемы PHY.

Новое поколение микросхем, выпускаемых фирмой Micrel, — KSZ8021/31/51 — представляет собой семейство Fast Ethernet PHY-драйверов, в которых применена смешанная

аналогово-цифровая архитектура вместе с запатентованной улучшенной DSP-обработкой. Все это позволило получить самый низкий в отрасли расход электроэнергии. Устройство в целом имеет уровень расхода энергии подобно другим ведущим Ethernet PHY — менее 50 мА. Однако не происходят потери энергии во внешнем трансформаторе, так как драйвер работает в режиме драйвера напряжения, а не в режиме драйвера тока. Следовательно, по сравнению с конкурирующими решениями достигается сохранение 50% расхода электроэнергии по сравнению с полным расходом энергии схемы.

Проект расположения компонентов на PCB также упрощается, снижаются и другие аппаратные затраты благодаря уникальной минимизированной объединенной линейной терминции, предлагаемой в Ethernet PHY KSZ8021/31/51 (рис. 2).

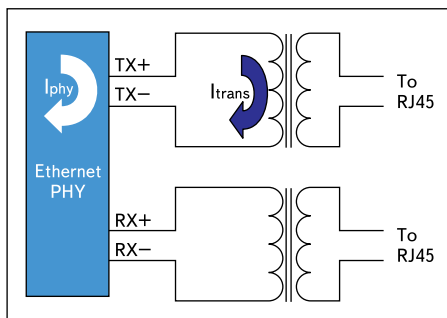


Рис. 1. Рассеяние мощности в цепи Ethernet PHY для режима Current-Mode

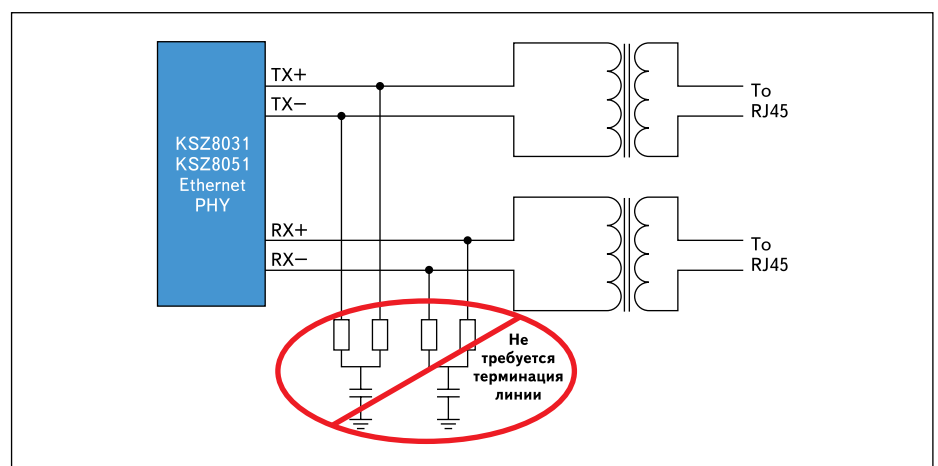


Рис. 2. В микросхемах PHY KSZ8021/31/51 терминирование линии встроено, поэтому нет необходимости в применении дополнительных внешних компонентов

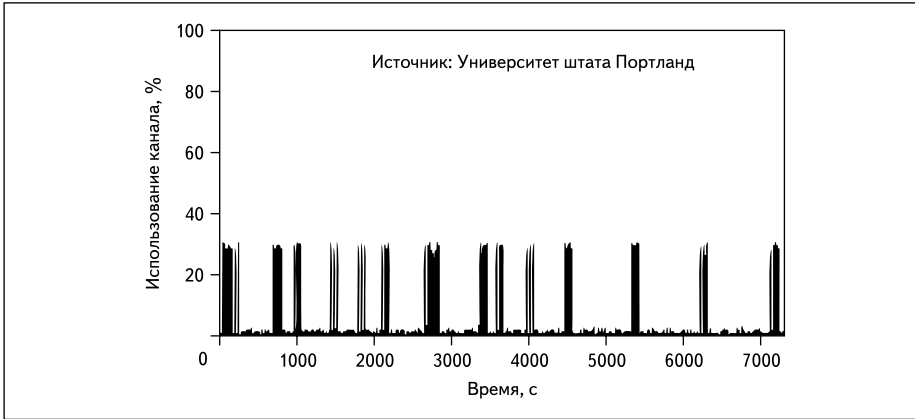


Рис. 3. Пример использования ресурса для линий

**Расход электроэнергии во время рабочего режима**

Определение термина «нормальное функционирование» с точки зрения использования ресурсов линии в процентном отношении будет весьма субъективно. Если мы проведем анализ сетевого трафика, то обнаружим долго длящиеся тихие периоды, которые чередуются с относительно кратковременными «вспышками» трафика. Такой режим работы может быть оценен как менее чем 3%-ное использование ресурса для линий, работающих по 10/100Base-TX, и еще более низкое использование ресурса для гигабитного Ethernet (рис. 3).

В течение этих тихих периодов можно ожидать, что расход энергии Ethernet будет снижен, но оказывается, что это не всегда происходит.

**Период ожидания**

Оба стандарта связи — и 1000Base-TX, и 100Base-TX — разрабатывались так, чтобы абоненты, подключенные к одной линии передачи, непрерывно «синхронизировались» друг с другом. Чтобы это согласование выполнялось в то время, когда никаких данных не передается, PHY автоматически отправляет в линию символы IDLE (11111, или код — 5 В) так, как показано на рис. 4.

Как следствие, в течение любого периода, когда нет данных для передачи по сети, передатчик PHY все еще работает, так же, как и при передаче данных, и поэтому он потребляет примерно такое же количество мощности.

Однако только для режима 10Base-T, в течение периодов, когда нет данных для передачи по сети, есть некоторые отличия. В этом режиме, когда в сети нет трафика, передатчик PHY не передает символы Idle. Вместо этого он отправляет одиночные импульсы в линию, приблизительно каждые 16 мс, как показано на рис. 5.

Такие импульсы, посылаемые в линию, необходимы только для того, чтобы показать,

что линия связи исправна и находится в рабочем состоянии. Расход энергии PHY непосредственно в периоды неактивного состояния линии при операциях 10Base-T не будет значительно уменьшаться, но ток, использо-

ванный во внешнем трансформаторе, уменьшится до незначительной величины.

Если по какой-либо причине Ethernet PHY не будет активно использоваться, то настоятельно рекомендуется уменьшить потребляемую мощность путем переключения бита управления внутренней мощностью — Power Down (смотри регистр 0h бит 11, так, как это определено в IEEE802.3). При этом трансивер KSZ8031/51 понижает полное потребление тока схемы до значения <2 мА.

**Длина кабеля и мощность выходного каскада в драйвере**

Главным препятствием для энергосбережения в исходной спецификации IEEE 802.3 является то, что для выходного сигнала PHY жестко задана форма сигнала. Для соответствия стандарту Ethernet выходной сигнал передатчика PHY не должен выходить за ограничения, заданные маской, показанной на рис. 6.

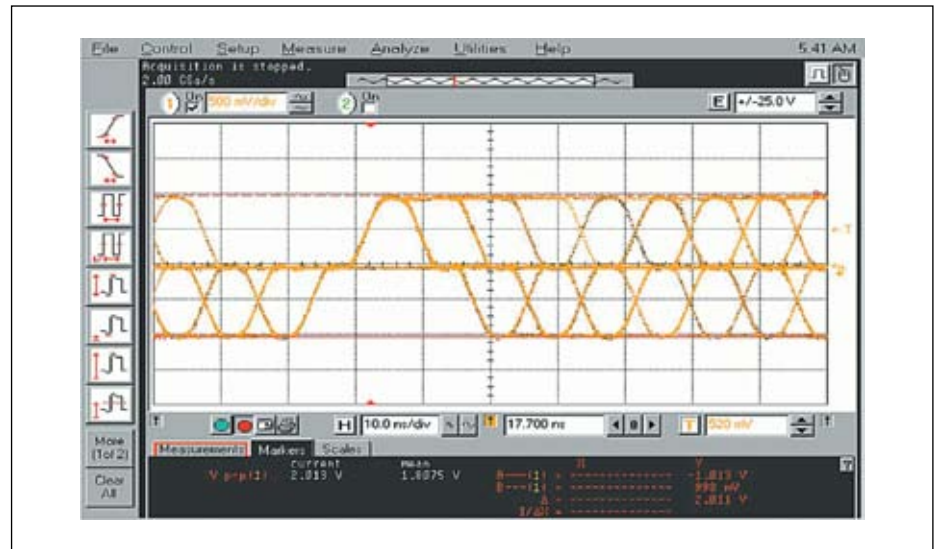


Рис. 4. Паттерн сигнала для 100Base-Tx в состоянии Idle

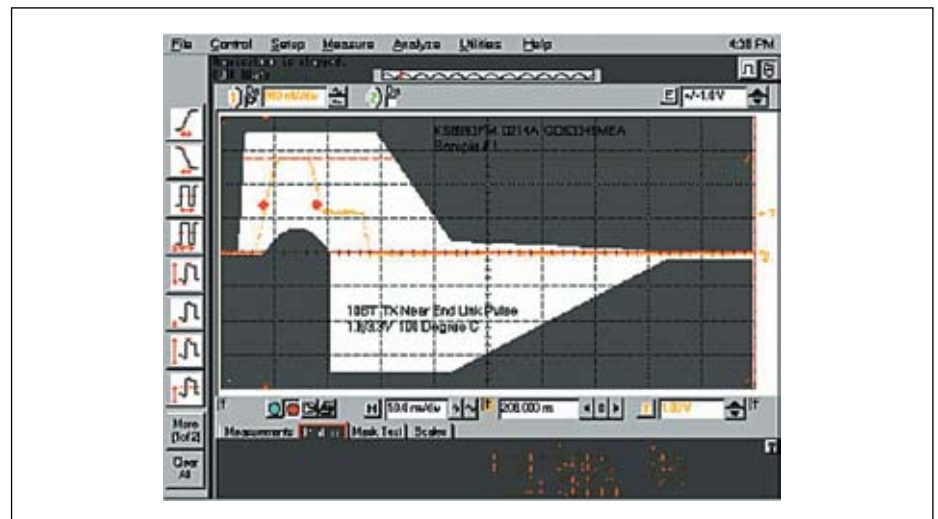


Рис. 5. Импульсы Link Pulse при 10Base-T

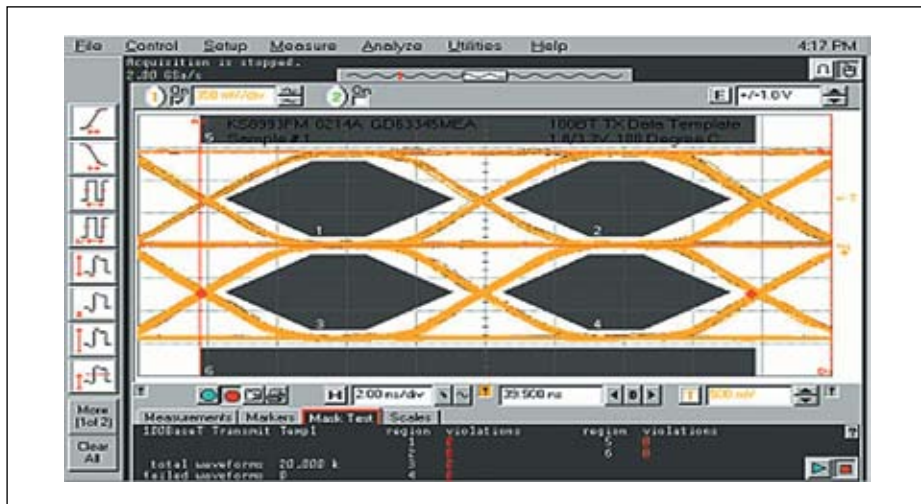


Рис. 6. Глазковая диаграмма сигнала для 100Base-Tx IEEE802.3

Эта форма сигнала была разработана для РНУ, исходя из условия гарантированной работы на расстояние не менее 100 м на кабель класса CAT5. Как следствие, мощность для выходного каскада РНУ задается для работы на такую длину кабеля, и выходной каскад тратит максимальную мощность, независимо от фактической длины подключенного к нему кабеля. В стандарте не было оговорено какого-либо дополнительного условия для того, чтобы адаптивно регулировать мощность для выходного каскада РНУ в зависимости от длины кабеля.

Как мы знаем, есть достаточно много мест, где не требуется возможность работы на такой длинный кабель. Существуют проекты, где линии связи гораздо короче, чем 100 м. Например, в автомобильных бортовых сетях длина кабеля связи никогда не превышает 10–20 м. Таким образом, можно уменьшить мощность передатчика РНУ. Так, для передатчика, работающего по 100Base-TX, можно уменьшить уровень сигнала на 50% от стандартной амплитуды сигнала в  $\pm 1$  В и при этом производить передачу данных без ошибок. Выходной ток передатчика в микросхемах для Ethernet, производимых фирмой Micrel, можно регулировать. Его можно задавать программно, при записи кодового слова в регистры управления или изменения рекомендуемое сопротивление, которое подключается между входом REXT и «землей» (см. даташит для определения значения). Выходной ток передатчика изменится обратно пропорционально к подключенному сопротивлению. Этот метод приводит к наиболее существенным результатам, поскольку ток возбуждения передатчика составляет приблизительно половину полного потребляемого тока схемы для проектов с микросхемами KSZ8031/51, как это показано в таблице 1.

У всех микросхем KSZ8031/51 (кроме тех, что работают на оптоволокно) имеется улучшенная диагностика отказов в кабелях, использующая технологию Micrel LinkMD.

Применение этой технологии также дает возможность измерить длину подключенного к микросхеме кабеля. Теперь выходной ток передатчика можно разумно регулировать согласно измеренной длине кабеля, таким образом, это приводит к улучшению эффективности расхода энергии.

Дополнительной выгодой от уменьшения выходного тока передатчика РНУ является сокращение излучения ЕМІ — электромагнитных помех.

### Напряжение питания

Другая важная для рассмотрения область — это управление электропитанием микросхем для Ethernet. Именно это гарантирует максимальную эффективность энергопотребления. Много современных устройств для работы используют одно напряжение питания, обычно это 3,3 В, и в этих устройствах имеются встроенные линейные регуляторы напряжения для выработки напряжения питания ядра. Это предоставляет клиенту более простую реализацию схемотехники, но не позволяет получить эффективное использование мощности. Поэтому, если возможно (к счастью, весьма часто), отключите внутренний регулятор и подайте более низкое напряжение питания для ядра от внешнего стабилизатора (который зачастую может уже находиться на этой же плате). Чтобы продемонстрировать эту возможность, возьмите, например, однопортовый Ethernet РНУ — KSZ8051MNL компании Micrel.

Таблица 1. Пример потребления тока со стандартным значением REXT для KSZ8051 в режиме 100BT

Питающее напряжение	Напряжение, В	Ток, мА
VDDIO	3,3/2,5/1,8	12
VDDA	3,3	24
VDDC	1,2	12
Итого		48 мА

Полное потребление энергии при использовании внутреннего регулятора будет равно  $3,3 \text{ В} \times 48 \text{ мА} = 158 \text{ мВт}$ . Но если вы отключаете внутренний регулятор и работаете при использовании внешнего источника питания в 1,2 В, то полное потребление энергии будет равно  $3,3 \text{ В} \times 36 \text{ мА} + 1,2 \text{ В} \times 12 \text{ мА} = 133 \text{ мВт}$ .

Семейство РНУ — KSZ8051 — также предлагает гибкий диапазон напряжений ввода/вывода: между 1,71 и 3,465 В, что позволяет провести дальнейшее сокращение расхода энергии до 115 мВт. Улучшение эффективности потребления мощности на внешительную величину — 27%, в дополнение к 132 мВт, сохраненным при использовании драйвера, работающего в режиме напряжения, поэтому ток, протекающий во внешних цепях, равен нулю. Кроме того, ток, выдаваемый буферами ввода/вывода микросхемы, может быть уменьшен от стандартного значения 8 до 4 мА, но, вероятно, более сильно это скажется на снижении эмиссии ЕМІ, возникающей при работе интерфейса МІІ.

### Расход энергии во время состояния ожидания

При рассмотрении спецификации «Инициатива на один ватт» особый интерес представляет раздел, описывающий расход энергии во время состояния ожидания.

Семейство РНУ Ethernet KSZ8031/51 имеет улучшенную технологию “Energy Detect Power Management” (дословно — это управление электропитанием при обнаружении энергии). Такая технология позволяет получить более низкий расход энергии во время работы в состоянии ожидания. Есть четыре полностью конфигурируемых режима работы (таблица 2).

### Режим нормального функционирования

Режимом по умолчанию является Normal Operation — нормальное функционирование. В этом режиме все внутренние блоки подключены к питанию и полностью работают.

Таблица 2. Режимы сбережения мощности и управления электропитанием KSZ8031/51

Режим управления электропитанием	Статус внутренних функциональных блоков	Уменьшение потребления мощности
Power Saving Mode — режим сохранения мощности	Все блоки трансивера выключены, кроме передатчика, блока обнаружения энергии и PLL	30%
Energy Detect Power Down (EDPD) — режим обнаружения энергии	Все блоки трансивера выключены, кроме передатчика и блока обнаружения энергии	50%
Power Down — режим выключения мощности	Все внутренние блоки выключены, кроме интерфейса МІІ (Management interface) и цепей осциллятора — crystal/clock	93%
Slow Oscillator Mode — режим низкой частоты генератора	Все внутренние блоки выключены, кроме интерфейса МІІ (Management interface)	98%



### Режим сохранения мощности

В Power Saving — режиме сохранения мощности, когда сетевой кабель отключается, выключается и приемная часть трансивера, оставляя в работе только схему обнаружения поступления на вход энергии. Передатчик, все синхросигналы от PLL и MAC остаются в работе. Внутренние значения регистров не будут изменяться, и интерфейс готов к связи с хостом. Как только на линии наступит состояние активности, то линия стабилизируется и установится режим нормального функционирования.

### Режим обнаружения энергии

Режим обнаружения энергии — Energy Detect — представляет собой улучшенную версию режима Power Saving — режима сохранения мощности, описанного выше. В этом режиме устройство экономит более чем 50% электроэнергии относительно нормального функционирования. Здесь период от обнаружения ситуации, когда на входе микросхемы «нет энергии», и до ввода режима низкого потребления мощности также можно конфигурировать. Во время режима Energy Detect все внутренние блоки отключаются, за исключением схемы, обнаруживающей энергию. РНУ также передает непрерывную последовательность импульсов 1 импульс в секунду, имеющие длительность 120 нс, а не типовое (энергетическое потребление), как в режиме холостого хода при передаче импульсов с комбинацией Idle.

### Режим Power Down

В Power Down — режиме отключения мощности (регистр управления MII Management Register 0h бит 11) — все функциональные блоки отключаются кроме интерфейса к хосту. Внутренние значения регистров не будут изменяться во время этого режима. Любая операция по доступу к микросхеме от хоста будет вызывать «пробуждение» микросхемы из режима Soft Power Down — программного выключения мощности к режиму нормального функционирования (Normal Operation).

### Режим работы генератора с уменьшенной частотой

Режим работы генератора с уменьшенной частотой (Slow Oscillator) работает вместе с Power Down — режимом отключения мощности. Они переводят устройство в самое низкое состояние по потреблению мощности, это менее чем 2 мА. Этот режим отключает вход XI (вывод 9), связанный с кварцевым резонатором или с опорным генератором, и к схеме подключается внутренний медленный генератор.

### Режим Wake-on-LAN

О термине Wake-on-LAN (WoL) часто говорится, что это средство, позволяющее

«пробудить» систему из режима ожидания во время нахождения этой системы в режиме низкого потребления мощности. Однако действительность такова, что эта функция редко достигает своей цели.

Последовательность импульсов определенного типа направляется к устройству Ethernet. Эта последовательность импульсов обнаруживается приемной частью микросхемы. Получив эти импульсы, РНУ установит сигнал прерывания для хоста в активное состояние. Получив прерывание, хост должен включить питание для остальной части системы. Тем не менее, режим WoL до сих пор не нашел широкого применения. Возможно, причина состоит в том, что описание этой процедуры не закреплено в стандарте. Нет также и совместимости по применяемым для WoL сигналам, поскольку все поставщики оборудования применяют различные последовательности сигналов. Так, например, фирма AMD в качестве сигналов WoL применяет собственный стандарт Magic Packet («волшебный пакет»). Набор сигналов Magic Packet состоит из последовательности сигналов синхронизации, определяемых как 6 байтов кодов 0xFFh, за которыми следуют 16 повторов MAC-адреса устройства. Эта последовательность передается «внутри» стандартного пакета Ethernet, причем расположение байтов в стандартном пакете Ethernet может быть произвольным.

Второе ограничение на WoL, которое имеет место при минимизации мощности потребления для устройств, находящихся в режиме ожидания, состоит в том, что «в деле» участвует не только РНУ, но и MAC. Устройство РНУ является просто приемопередатчиком и «прозрачно» для принимаемых пакетов данных, к их содержанию. С первого взгляда не всегда «заметно», что до того как система «просыпается», и MAC, и РНУ должны работать в нормальном рабочем режиме, а не в режиме низкой потребляемой мощности.

Итак, даже при отсутствии трафика, находясь в состоянии ожидания, в режиме 100Base-TX РНУ потребляет полную мощность. Кроме того, большинство встраиваемых приложений, таких как IP STB и телефоны VoIP, уже имеют в составе своих процессоров встроенный Ethernet MAC, пренебрегая при этом поддержкой WoL. В таком случае процессор не имеет поддержки каких-либо внешних аппаратных средств, и он должен быть разработан так, чтобы он мог обнаруживать пакеты WoL самостоятельно. Поэтому сегодняшние инициативы по сохранению мощности не могут быть достигнуты при использовании WoL.

Технологией WoL обычно обладают только такие устройства, как Ethernet-контроллеры с MAC/РНУ, например, находящиеся в компьютерных картах NIC (в сетевых картах). Хотя, честно говоря, это было скорее «источником происхождения» дан-

ной технологии или, говоря другими словами, только намерением. Однако это может принести пользу другому сетевому устройству, поддерживающему WoL-технологии и сконфигурированному так, чтобы оно имело возможность «проснуться» и перейти из «сна» в рабочее состояние. Но давайте зададим себе вопрос: «А как часто это происходит у нас в доме?»

### Энергосберегающий Ethernet по IEEE 802.3az

Неэффективность расхода энергии в схемах, работающих по интерфейсу Ethernet, уже была понята IEEE. Экспертная группа IEEE 802.3az, также известная как Energy Efficient Ethernet («Энергосберегающий Ethernet»), начала работать над тем, чтобы уменьшить расход энергии в течение периодов малого использования линии (время простоя). Как мы уже видели на рис. 3, типичное использование трафика в линии Ethernet чрезвычайно низко. Чтобы достигнуть этой цели, необходимо произвести изменения в аппаратных средствах, однако они должны быть полностью совместимы с имеющимися аппаратными средствами.

Уменьшая расход энергии в течение периодов низкого использования линии, можно решительно изменить к лучшему эффективность потребления мощности. Этот метод, известный как Low Power Idle (LPI — режим низкой мощности в неактивном состоянии), позволяет отключить части приемопередатчика РНУ, все еще занятые тем, что они поддерживают целостность работы линии, и которые не нужны в режиме неактивного состояния. В этом случае только когда РНУ получит новые кадры из линии, оно пробудится и вернется к нормальному активному состоянию. Во время LPI периодические символы обновления отсылаются из РНУ, что будет гарантировать синхронизацию с получателем. Пример энергосберегающей работы в Ethernet по IEEE 802.3az показан на рис. 7:

- Ts — Sleep Time. Перед тем как попасть в состояние Quiet (спокойное состояние) РНУ посылает импульсы Sleep Symbols.
- Tq — Quiet Duration. Время, в течение которого РНУ находится в состоянии Quiet (спокойное состояние), перед тем как РНУ будет разбужено для периода Refresh.
- Tr — Refresh Duration. Время, в течение которого РНУ посылает Refresh-импульсы для восстановления временных параметров и восстановления коэффициентов.
- Tw\_RНУ — РНУ Wake Time. Время, в течение которого РНУ приходит в активное состояние, если было принято решение о том, что надо «проснуться».
- Tw\_System — System Wake Time. Период ожидания, во время которого данные не передаются, он необходим для того, чтобы приемная часть микросхемы «проснулась».

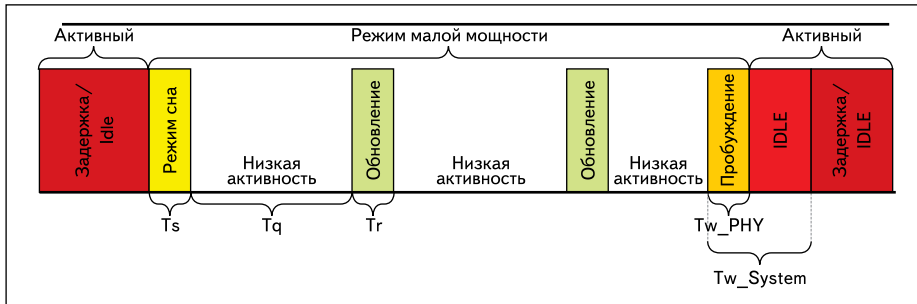


Рис. 7. Пример энергосберегающей работы в Ethernet по IEEE 802.3az

Как показано на рис. 7, когда кадр данных «прибывает» для передачи, но линия находится в режиме низкого потребления мощности, то необходимо ожидать «пробуждения» линии, прежде чем может начаться передача. Это действительно создает дополнительное время ожидания (латентность)  $T_w\_PHY$  в канале передачи данных. Время, предложенное для «пробуждения» линии, для 100Base-TX и 1000-BaseT составляет 30 и 16,5 мкс соответственно.

В настоящий момент временные параметры были рассмотрены только для PHY, работающих на скорости передачи в 100Base-TX (режим — полный дуплекс), 1000Base-T и 10G. Спецификация, вероятно, будет завершена в этом году. Как ожидается, уже вскоре после этого устройства Ethernet, поддерживающие IEEE 802.3az, будут доступны на рынке.

## Заключение

В этой статье показано, что, проведя подробный анализ, можно увидеть, что в схемах, работающих по интерфейсу Ethernet, расход энергии не является эффективным. И его часто довольно сложно бывает вычислить. Устройство, работающее по Ethernet, расходует энергию одинаково, как во время тра-

фика, так и во время неактивных периодов в линии, которые могут иметь длительность более чем 97% по времени. Это открытие делает совершенно очевидным то, где могут быть сделаны улучшения. Комитет IEEE оценил неэффективность такого положения дел и сформировал экспертную группу с целью уменьшить расход энергии в течение периодов низкого использования линии. Эта экспертная группа — IEEE 802.3az — обычно известна как Energy Efficient Ethernet («Энергосберегающий Ethernet»). Группа должна выработать стандарт — энергосберегающий Ethernet, который имеет целью уменьшить неактивную мощность в периоды неактивного состояния линии и предназначается для того, чтобы успешно работать там, где предыдущие попытки не привели к желаемому результату с технологией WoL.

Чтобы осознать преимущества энергосбережения при реализации устройств для

Ethernet, в этой статье показано, что дополнительные сбережения мощности могут быть сделаны только при тщательном выборе устройства и понимании того, как и где эта мощность используется.

Новое семейство PHY для Ethernet — KSZ8031/51, выпущенное фирмой Micrel, имеет самое низкое в отрасли потребление мощности при нормальном функционировании и множество усовершенствований, а также перестраиваемые режимы управления электропитанием для работы в состоянии ожидания. Такие «зеленые» решения для Ethernet сохраняют энергию и имеют более низкую эмиссию EMI.

Микросхемы семейства Fast Ethernet PHY KSZ8031/51 могут быть в корпусе MLF с 32 выводами и в корпусе 48-LQFP. Они имеют совместимость выводов с семейством KSZ8041 и предлагаются в новых крошечных 24-FN корпусах, имеющих размеры всего 4×4 мм. Эти корпуса применяются для проектов с интерфейсом RMII. Различные варианты микросхем и корпусов показаны в таблице 3.

Для получения дополнительной информации обратитесь на сайт Micrel в раздел Ethernet [2].

## Литература

1. Исследование Ethernet Портлендского университета.
2. [www.micrel.com/page.do?page=product-info/ether\\_over.jsp](http://www.micrel.com/page.do?page=product-info/ether_over.jsp)

Таблица 3. Семейство микросхем KSZ8031/51

Название микросхемы	Режим работы линии	MAC	Корпус	Совпадает ли с KSZ8041 PHY по выводам
KSZ8031RNL	10Base-T / 100Base-TX Internal Line Termination LinkMD Support	RMII	24-pin QFN (4×4 мм)	Нет
KSZ8051MNL		MII	32-pin QFN (5×5 мм)	KSZ8041NL
KSZ8051RNL		RMII		KSZ8041RNL
KSZ8051MLL		MII	48-pin LQFP (7×7 мм)	KSZ8041MLL
KSZ8051FLL	100Base-FX	MII	48-pin LQFP (7×7 мм)	KSZ8041FTL