УДК 004.732

С. А. Нестеренко, *д.т.н., профессор*
Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина
e-mail: sa_nesterenko@ukr.net

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

Рассмотрена актуальная научно-техническая проблема, связанная с оценкой эффективности использования новых энергоэффективных технологий стандарта IEEE 802.3az в коммуникационных системах компьютерных сетей. Показано, что оценку эффективности применения энергоэффективных технологий в компьютерной сети целесообразно проводить на уровне каждого порта ее коммуникационной системы.

Проведена разработка математических моделей для расчета потребляемой мощности портом коммуникационного устройства, работающим по стандарту IEEE 802.3 и стандарту IEEE 802.3az. В качестве моделей для расчета мощности, потребляемой портом, используются стохастические модели массового обслуживания. Модели учитывают вероятность нахождения канала в активном состоянии (передача данных) и в состоянии паузы (отсутствие передачи данных). Проведена верификация моделей, которая подтвердила достаточную для инженерных расчетов точность получаемых результатов.

С использованием полученных моделей предложены аналитические зависимости, позволяющие рассчитывать экономическую эффективность проведения модернизации компьютерной сети по снижению потребления электроэнергии и определять сроки окупаемости затрат на оборудование для модернизации.

Ключевые слова: *стандарт IEEE 802.3az, математическая модель, компьютерная сеть, снижение потребления электроэнергии.*

Введение. Появление в 2010 г. новой модификации стандарта для проводных сетей Ethernet, ориентированного на существенное уменьшение потребления энергии в коммуникационных системах, – энергосберегающего стандарта IEEE 802.3az – Energy Efficient Ethernet (EEE) [1] положило начало новому этапу в развитии компьютерных сетей (КС). Данный этап получил название Green Networks и связан с построением энергоэффективных коммуникационных систем КС [2]. Появление в последнее время большого количества коммуникационных устройств и сетевых адаптеров, поддерживающих технологию EEE, переводит этот вопрос из теоретической в практическую плоскость [3]. Появление модификации стандарта EEE под названием EEE+ позволяет строить энергоэффективные КС путем замены только коммуникационного оборудования без замены сетевых адаптеров абонентов сети, что делает этот процесс менее затратным и более привлекательным для широкого класса сетей – от домашних до корпоративных и производственных сетей [4].

При принятии решения о переходе на энергосберегающие технологии перед сетевыми инженерами возникает задача оценки экономической эффективности данного перехода. Экономическая эффективность определяется двумя показателями: затратами на проведение модернизации и экономией средств, связанных с внедрением энергосберегающих технологий. Расчет затрат на внедрение новой технологии выполняется тривиальным образом и определяется стоимостью покупки энергосберегающего оборудования. Расчет экономии средств от внедрения энергосберегающего оборудования является нетривиальной задачей и требует наличия соответствующих моделей для проведения данных расчетов.

Анализ известных работ в данной области показывает, что исследования, проведенные в работах, посвященных анализу EEE, можно разделить на две группы. К первой группе относятся работы, которые посвящены разработке и анализу эффективности различных алгоритмов управления состояниями канала, работающего по технологии EEE, а

именно, переключению в режим пониженного энергопотребления и возвращению в активный режим. В работах, как правило, с использованием имитационных систем моделирования, исследуются режимы без группирования кадров [2], режимы с группированием кадров [5, 6], режим адаптивного управления переключениями [7], а также различные их комбинации [8]. По результатам исследований делается вывод об эффективности того или иного алгоритма, с точки зрения минимизации потребления энергии, в зависимости от интенсивности поступления кадров, их размера и пропускной способности канала.

Вторая группа работ посвящена практическому исследованию эффективности использования энергосберегающего оборудования на базе технологии EEE [9, 10]. Основной вывод данных работ связан с подтверждением того факта, что технология EEE уменьшает потребление электроэнергии в канале Ethernet на 40–80 % в зависимости от его загрузки.

Таким образом, в работах, посвященных анализу EEE, отсутствуют модели, позволяющие сетевому инженеру ответить на вопрос об эффективности и сроках окупаемости внедрения энергоэффективных сетевых технологий. Это, во многих случаях, является замедляющим фактором в принятии решения о проведении Green Networks модернизации КС.

В статье предлагаются модели расчета экономической эффективности внедрения энергосберегающих технологий. Модели используют простые аналитические зависимости, что позволяет проводить требуемые расчеты, связанные с оценкой эффективности и сроков окупаемости затрат на модернизацию КС, быстро и без использования сложных систем моделирования или разработки программ расчета сложных аналитических зависимостей. Простота расчетов и достаточная для инженерных расчетов точность предлагаемых моделей делают их удобным инструментом при принятии решений о проведении энергоэффективной модернизации КС.

Расчет стоимости эксплуатации коммуникационного устройства. Расчет стоимости эксплуатации проводится для типового коммуникационного устройства (КУ), в качестве которого в современных КС используются *N*-портовые коммутаторы или маршрутизаторы [11]. Расчет потребляемой мощности КУ проводится на уровне его портов. Суммарная потребляемая мощность КУ рассчитывается в виде

$$P_{\text{К}} = \sum_{i=1}^{N} P_i ,$$

где $P_{\text{К}}$ – мощность, потребляемая КУ, P_i – мощность, потребляемая *i*-м портом.

При использовании стандартной технологии 802.3 канал может находиться в двух состояниях: активном (Active) при передаче кадра данных и паузы (Idle), когда передача данных отсутствует (рис. 1). Типовые значения потребляемой мощности в каждом из возможных состояний для двух реализаций канала 100 и 1000 Мбит Ethernet приведены в табл. 1 [9].

Рис. 1. Диаграмма работы стандартного канала IEEE 802.3

Таблица 1

Потребляемая портом мощность в различных состояниях канала IEEE 802.3

Реализации технологии IEEE 802.3	Потребляемая мощность (Вт·10^{-3})
1000 Mbps Active	541
1000 Mbps Idle	529
100 Mbps Active	215
100 Mbps Idle	208

Потребляемая портом мощность зависит от величины загрузки канала U, которая определяется в виде

$$U = \frac{\lambda}{\mu},$$

где λ – интенсивность передачи кадров в канале, μ – пропускная способность канала.

Пропускная способность канала определяется максимальным количеством кадров, которое может пропустить канал в единицу времени.

С учетом допущения о Пуассоновском распределении интервалов между кадрами и допущения об экспоненциальном распределении времени обслуживания кадров в канале

порт КУ можно представить в виде системы M/M/1. Тогда пропускную способность канала, работающего в стандартном режиме стандарта IEEE 802.3, можно представить в виде [12]

$$\mu = \frac{1}{T_{\text{ПЕР}}},\ T_{\text{ПЕР}} = \frac{\lambda \cdot T_{\text{ТР}}}{\lambda\left(1 - \lambda \cdot T_{\text{ТР}}\right)},$$

$$T_{\text{ТР}} = \frac{L_{\text{К}} + L_{\text{П}}}{V_{\text{К}}}, \qquad (1)$$

где $T_{\text{ПЕР}}$ – среднее время передачи кадра в канале, которое учитывает время ожидания кадра в очереди на передачу, $T_{\text{ТР}}$ – время транзакции кадра по физическому каналу, $L_{\text{К}}$ – размер кадра в битах, $L_{\text{П}}$ – минимальный размер паузы в битах, который определен стандартом IEEE 802.3 в 96 бит [1], $V_{\text{К}}$ – скорость передачи битов в физическом канале связи.

Мощность, потребляемую i-м портом, работающим по стандарту IEEE 802.3, можно записать в виде

$$P_i^S = \left[P_{\text{А}} U_i + P_{\text{П}}\left(1 - U_i\right)\right], \qquad (2)$$

где $P_{\text{А}}$ – мощность, потребляемая портом в активном состоянии, $P_{\text{П}}$ – мощность, потребляемая в состоянии паузы.

Выражение (2) является моделью потребления мощности портом КУ, работающим по стандарту IEEE 802.3.

Количество энергии Q_i^S, потребленное i-м портом, работающим по стандарту IEEE 802.3, за время T выразится в виде

$$Q_i^S = P_i^S \cdot T.$$

Количество энергии Q^S, потребленное N-входовым КУ, работающим по стандарту IEEE 802.3, за время T, запишется как

$$Q^S = Q_i^S \cdot N.$$

Стоимость эксплуатации КУ, работающего по стандарту IEEE 802.3, за время T будет равна

$$C^S = Q^S \cdot C_{\text{К}}, \qquad (3)$$

где $C_{\text{К}}$ – стоимость 1 КВт/час электроэнергии.

Расчет стоимости эксплуатации коммуникационного устройства в режиме EEE. Работа канала в режиме EEE описывается временной диаграммой, представленной на рис. 2 [1].

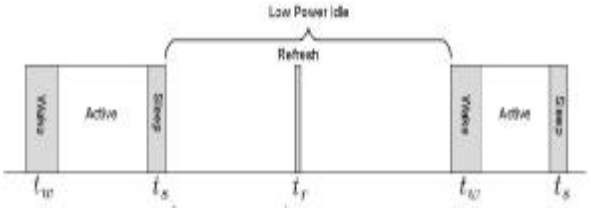

Рис. 2. Временная диаграмма работы канала в режиме EEE

После завершения передачи кадра следует процедура (Sleep), выполняющая переход канала из активного состояния (Active) в режим пониженного энергопотребления (Low Power Idle – LPI). В этом состоянии канал находится до появления следующего кадра для передачи. При появлении кадра выполняется процедура пробуждения канала (Wake), после чего канал вновь переходит в активное состояние и выполняется процедура передачи кадра. Типовые значения потребляемой энергии для различных состояний режима EEE для 100 и 1000 Мбит/с стандарта IEEE 802.3az приведены в табл. 2 [8].

Таблица 2

Потребляемая мощность в различных состояниях канала IEEE 802.3az

Реализации технологии IEEE 802.3az	Потребляемая мощность ($Вт \cdot 10^{-3}$)
1000 Mbps Active	535
1000 Mbps Low Power Idle	152
100 Mbps Active	208
100 Mbps Low Power Idle	139

Для расчета потребляемой портом КУ мощности надо учесть диаграмму переходов между состояниями канала. Для реализаций 100 и 1000 Мбит/с стандарта IEEE 802.3az диаграмма переходов приведена на рис. 3. Очевидно, что время передачи кадра зависит от того, в каком состоянии будет находиться канал в момент прихода кадра. Если канал находится в активном состоянии или в состоянии переключения из активного состояния в состояние пониженного энергопотребления, то, как следует из диаграммы, время передачи минимально и определяется в виде

$$T_{\text{ПЕР}}^{\min} = \frac{\lambda \cdot T_{\text{ТР}}}{\lambda\left(1 - \lambda \cdot T_{\text{ТР}}\right)},$$

где $T_{\text{ТР}}$ – время транзакции кадра по физическому каналу связи.

Очевидно, что при таком определении $T_{\text{ПЕР}}^{\min}$ мы получим верхнюю границу потребления мощности в режиме EEE, что соответствует моменту прихода кадра в конце периода t_S.

В противном случае время передачи кадра максимально и равно

$$T_{\text{ПЕР}}^{\max} = T_{\text{ПЕР}}^{\min} + t_W,$$

где t_W – время возврата в активное состояние. Значения времени переключения для реализаций 100 и 1000 Мбит/с, определенные в стандарте IEEE 802.3az, приведены в табл. 3 [1].

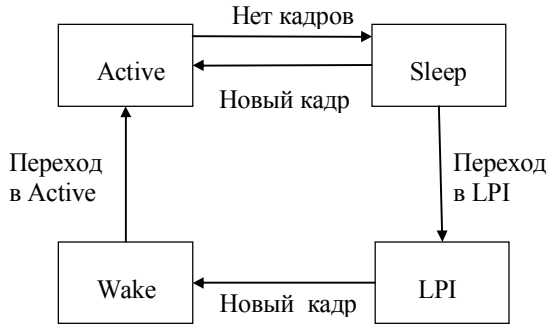

Рис. 3. Диаграмма переходов канала стандарта IEEE 802.3az для реализаций 100 и 1000 Мбит/с

Очевидно, что среднее время передачи кадра можно представить в виде

$$T_{\text{ПЕР}}^{avr} = T_{\text{ПЕР}}^{\min} \cdot P_1 + T_{\text{ПЕР}}^{\max} \cdot P_2,$$

где P_1 – вероятность прихода следующего кадра в момент передачи предыдущего, когда канал находится в активном состоянии, либо в момент времени до завершения фазы t_S, когда канал не успел переключиться в состояние пониженного энергопотребления, P_2 – вероятность противоположного события.

Таблица 3

Временные параметры работы стандарта IEEE 802.3az

Реализации технологии IEEE 802.3az	t_S, мкС	t_W, мкС
1000 Mbps	182	16
100 Mbps	200	30

В предположении, что интервалы времени между приходом кадров распределены по закону Пуассона, вероятность того, что за время передачи кадра и времени t_S не придет ни одного нового кадра, будет равна

$$P_0 = \frac{(\lambda \cdot T)^0}{0!} e^{-\lambda T} = e^{-\lambda T}, \quad T = T_{\text{ПЕР}}^{\min} + t_S,$$

где λ – интенсивность поступления кадров в канал, t_S – время переключения канала из активного состояния в состояние пониженного энергопотребления.

Тогда вероятности P_1 и P_2 будут равны

$$P_1 = T_{\text{ПЕР}}^{\min} \cdot \left(1 - e^{-\lambda T}\right),$$

$$P_1 = T_{\text{ПЕР}}^{\min} \cdot e^{-\lambda T},$$

Загрузка i-го порта коммутатора U_i, работающего в режиме EEE, в соответствии с выражением (1) запишется в виде

$$U_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \lambda_i \cdot T_{\text{ПЕР}_i}^{avr}.$$

Мощность, потребляемую i-м портом в режиме EEE, можно записать в виде

$$P_i^{EEE} = \left[P_A U_i + P_{LPI}\left(1 - U_i\right)\right], \qquad (4)$$

где P_{LPI} – мощность, потребляемая в режиме пониженного энергопотребления.

Выражение (4) является моделью потребления мощности портом КУ, работающим по стандарту IEEE 803.3az.

Для оценки точности предложенных моделей проведено сравнение данных, полученных с использованием моделей (2) и (4), с экспериментальными данными измерений потребляемой мощности, приведенными в [8]. Максимальная погрешность расчетных результатов не превышает 8 %, что говорит о достаточной точности предложенных моделей.

Количество энергии Q^{EEE}, потребленное N-входовым КУ, работающим в режиме EEE, за время T запишется как

$$Q^{EEE} = \sum_{i=1}^{N} Q_i, \quad Q_i = P_i^{EEE} \cdot T.$$

Стоимость эксплуатации КУ, работающего в режиме EEE, за время T будет равна

$$C^{EEE} = Q^{EEE} \cdot C_{\text{К}}. \qquad (5)$$

Очевидно, что экономия средств $C_Э$, связанная с эксплуатацией КУ, работающего в режиме EEE, за период времени T будет равна

$$C_Э = C^S - C^{EEE}.$$

Из (3) и (4) срок окупаемости затрат $T_{ОК}$ на покупку КУ, работающего в стандарте IEEE 802.3az, можно выразить в виде

$$T_{ОК} = \frac{C_{КУ}}{N \cdot \left(P_i^S - P_i^{EEE}\right)},$$

где $C_{КУ}$ – стоимость КУ, работающего в стандарте IEEE 802.3az.

При выполнении модернизации КС, связанной с заменой M КУ, работающих в стандарте IEEE 802.3, на их энергоэффективные аналоги, суммарная экономия средств $C_Э^C$, связанная с эксплуатацией модернизированной сети, работающей в режиме EEE, за период времени T будет равна

$$C_Э^C = \sum_{i=1}^{M} C_i^S - \sum_{i=1}^{M} C_i^{EEE}.$$

Срок окупаемости затрат $T_{ОК}$ на покупку M КУ, работающих в стандарте IEEE 802.3az, можно выразить в виде

$$T_{ОК} = \frac{\sum_{i=1}^{M} C_{КУ_i}}{\sum_{i=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} P_i^S - \sum_{i=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} P_i^{EEE}}.$$

Заключение. В работе предложены простые аналитические модели расчета потребления мощности портом КУ, работающим по стандартной сетевой технологии IEEE 802.3 и технологии с пониженным энергопотреблением IEEE 802.3az. На основании данных моделей получены аналитические выражения для расчета экономического эффекта от внедрения энергосберегающих технологий и расчета срока окупаемости затрат на модернизацию сети, связанную с внедрением данных технологий. Проведенная верификация моделей подтвердила достаточную для инженерных расчетов точность получаемых результатов. Наличие простых выражений, не требующих для проведения расчетов привлечения специализированных систем моделирования, существенно облегчает работу сетевых инженеров при принятии решения о проведении энергоэффективной модернизации КС.

Список литературы

1. IEEE 802.3az-2010: energy efficient Ethernet, Amendment to IEEE standard 802.3-2008 (CSMA/CD) specifications, IEEE Std., 2010.
2. Christensen, K., Reviriego, P., Nordman B. et al. (2010) IEEE 802.3az: the road to energy efficient Ethernet. *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, No. 11, November, pp. 50–56.
3. ES 1100 switches series. Zexel white paper (2013), 5 p.
4. Nesterenko, S., Langman, R. and Makarov, O. (2012) The WOAS project: Web-oriented automation systems. *Proceedings of International conference REV-2012*, No. 1, pp. 341–345.
5. Kyung Jae Kim, Shunfu Jin, Naishuo Tian, Bong Dae Choi (2016) Mathematical analysis of burst transmission scheme for IEEE 802.3az energy efficient Ethernet. *Performance Evaluation*, vol. 102, pp. 1–52.
6. Meng, J., Ren, F., Jiang, W. and Lin, C. (2013) Modeling and understanding burst transmission algorithms for energy efficient Ethernet. *Quality of Service (IWQoS), IEEE/ACM 21st International Symposium on June 2013*, pp. 1–10.
7. Herreria-Alonso, S., Rodriguez-Perez, M., Fernandez-Veiga, M. and Lopez-Garcia, C. (2012) Optimal configuration of energy efficient Ethernet. *Computer Networks*, vol. 56, No. 10, pp. 2456–2467.
8. Reviriego, P., Christensen, K., Rabanillo, J. and Maestro J. (2011) An initial evaluation of energy efficient Ethernet. *IEEE Commun. Letters,* vol. 15, No. 5, pp. 578–580, May.
9. Reviriego, P., Hernndez, J. A., Larrabeiti, D. and Maestro, J. A. (2009) Performance evaluation of energy efficient Ethernet. *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, No. 9, pp. 697–699, Sept.
10. Sohan, R., Rice, A., Moore A. W. and Mansley K. (2010) Characterizing 10 Gbps network interface energy consumption. *35th IEEE Conference on Local Computer Networks*, Oct.
11. Campus Wired LAN. Cisco Technology design guide (2013), 97 p.
12. Nesterenko S. A. (2016) Costs evaluation methodic of energy efficient computer network reengineering. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi,* No. 2 (49), pp. 70–75.

S. A. Nesterenko, *D.Sc., professor*
Odessa National Polytechnic University
Shevchenko ave., 1, Odessa, 65044, Ukraine
e-mail: sa_nesterenko@ukr.net

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION IN COMPUTER NETWORKS

Actual scientific and technical problem, associated with evaluation of the effectiveness of new IEEE 802.3az energy efficient technology used in communication systems of computer networks, is considered. It is shown that evaluation of the effectiveness of energy efficient technologies in computer network is advisable to be carried out on the level of every port of its communications system.

Mathematical models to calculate power consumption by communication device port, running on IEEE 802.3 and IEEE 802.3az standards, are developed.

As models for calculation of port power consumption stochastic queuing models are used. Proposed models take into account the probability of channel being in active state (data transmission) and in pause state (no data transmission). The verification of models has confirmed the sufficient accuracy of the results for engineering calculations.

Using the obtained models analytical dependences for calculating the cost-effectiveness of computer network upgrading to reduce energy consumption and to determine payback period for equipment modernization are offered.

Keywords: *IEEE 802.3az standard, mathematical model, computer network, energy consumption reducing.*

*Статтю представляє С. А. Нестеренко, д.т.н.***,** *професор, Одеський національний політехнічний університет.*