

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО РЕИНЖИНИРИНГА КОРПОРАТИВНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ

С.А. Нестеренко

Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. В работе показано, что энергоэффективный реинжиниринг корпоративной компьютерной сети выполняется за несколько этапов. На каждом этапе реинжиниринг выполняется для некоторого фрагмента сети. Для оценки эффективности выполнения каждого этапа предложены модели для расчета стоимости проведения энергоэффективного реинжиниринга. Предложен метод динамического программирования для построения оптимального плана реинжиниринга корпоративной компьютерной сети.

Ключевые слова: компьютерная сеть, энергоэффективный реинжиниринг, стандарт IEEE 802.3az, математические модели, показатель эффективности, динамическое программирование.

Введение

Одним из основных направлений реинжиниринга современных проводных корпоративных компьютерных сетей (ККС) является перевод их на использование энергоэффективных технологий стандарта IEEE 802.3az – Energy Efficient Ethernet (EEE) [1]. Появление большого количества коммутаторов, маршрутизаторов и сетевых адаптеров, поддерживающих данную технологию, переводит данную проблему из теоретической в практическую плоскость [2]. Реинжиниринг ККС выполняется путем замены действующего коммуникационного оборудования (коммутаторы, маршрутизаторы, сетевые адаптеры), работающего по стандарту IEEE 802.3 на оборудование, поддерживающее энергоэффективный стандарт IEEE 802.3az.

Особенностью ККС является большое количество коммуникационного оборудования, что приводит к тому, что реинжиниринг сети выполняется за несколько этапов, которые могут занимать длительный промежуток времени. На каждый этап реинжиниринга ККС выделяется определенное количество средств. Таким образом, возникает задача выбора оптимального фрагмента ККС для выполнения реинжиниринга, который бы обеспечивал максимальный экономический эффект от внедрения. Например, для сети РГ, содержащей два коммутатора Sw_1 и Sw_2 и набор абонентов S_1, S_2, \dots, S_M , подключенных к первому коммутатору и $S_{M+1}, S_{M+2}, \dots, S_{M+K}$, подключенных ко второму коммутатору, возможны четыре варианта выполнения энергоэффе-

тивного реинжиниринга, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Варианты проведения реинжиниринга РГ

Варианты реинжиниринга	Коммуникационные устройства, для которых выполняется реинжиниринг
Вариант 1	–
Вариант 2	$Sw_1, S_1, S_2, \dots, S_M$
Вариант 3	$Sw_2, S_{M+1}, S_{M+2}, \dots, S_{M+K}$
Вариант 4	$Sw_1, Sw_2, S_1, S_2, \dots, S_M, S_{M+1}, S_{M+2}, \dots, S_{M+K}$

1. Математические модели расчета характеристик ККС

Стоимость затрат на проведение реинжиниринга РГ (C^{PG}) определяется в виде

$$C^{PG} = \sum_{i=1}^N C_{SW_i} + \sum_{j=1}^K C_{NIC_j} \quad (1)$$

где C_{SW_i} – стоимость замены i -го коммутатора, C_{NIC_j} – стоимость замены j -го сетевого адаптера, N – количество коммутаторов в РГ, K – количество абонентов в составе РГ.

Выражение (1) является математической моделью расчета затрат на проведение энергоэффективного реинжиниринга РГ.

Очевидно, что при поэтапном выполнении модернизации величина затрат на проведение реинжиниринга РГ на каждом этапе C^{PG} зависит от выбранного варианта замены коммуникаци-

онного оборудования и лежит в пределах $C_{\text{MIN}}^{\text{PI}} \leq C^{\text{PI}} \leq C_{\text{MAX}}^{\text{PI}}$, где $C_{\text{MIN}}^{\text{PI}} = 0$ и соответствует варианту отсутствия затрат на проведения реинжиниринга (вариант 1 Таблицы 1), а $C_{\text{MAX}}^{\text{PI}}$ – соответствует варианту, когда все коммуникационные устройства и сетевые карты абонентов меняются на энергоэффективные аналоги (вариант 4 Таблицы 1).

Будем полагать, что затраты на обслуживание РГ определяются затратами на оплату потребляемой электроэнергии. Тогда экономический эффект от проведения энергоэффективного реинжиниринга C_3^{PI} можно представить в виде

$$C_3^{\text{PI}} = C_{\text{ОБ}}^{\text{S}} - C_{\text{ОБ}}^{\text{EEE}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{ОБ}}^{\text{S}}$ – затраты на обслуживание РГ при использовании стандартного оборудования (стандарт IEEE 802.3), $C_{\text{ОБ}}^{\text{EEE}}$ – затраты на обслуживание РГ при использовании энергосберегающего оборудования ЕЕЕ (стандарт IEEE 802.3az).

Выражение (2) является математической моделью для расчета экономического эффекта от проведения энергоэффективного реинжиниринга РГ.

С учетом стоимости одного киловатта электроэнергии $C_{\text{к}}$ экономический эффект может быть записан в виде

$$Q^{\text{EEE}} = [Q_{\text{А}} U_i + Q_{\text{ЛПИ}} (1 - U_i)],$$

где $Q_{\text{А}}$ – мощность, потребляемая портом или сетевым адаптером в активном состоянии, $Q_{\text{П}}$ – мощность, потребляемая в состоянии паузы, $Q_{\text{ЛПИ}}$ – мощность, потребляемая в состоянии пониженного энергопотребления стандарта IEEE 802.3az (Low Power Idle – LPI), U_i – нагрузка i -го порта или сетевого адаптера.

В работе [12] предложен набор инструментальных средств для экспериментального измерения необходимых сетевых параметров и технология расчета величины загрузки порта коммутатора и сетевого адаптера.

В качестве инструментальных средств измерения сетевых параметров предложено использовать стандартные SNMP-системы сетевого мониторинга. Примерами таких систем являются AggreGate Network Manager, Zabbix, Nagios, Power SNMP Manager.

Технология расчета величины загрузки порта коммутатора и сетевого адаптера состоит из двух этапов. На первом этапе с использованием инструментальных средств определяется среднее значение интенсивности передачи кадров по

$$C_3^{\text{PI}} = C_{\text{к}}(Q^{\text{S}} - Q^{\text{EEE}}),$$

где Q^{S} – мощность, потребляемая коммуникационным оборудованием РГ при использовании стандарта IEEE 802.3, Q^{EEE} – потребляемая мощность при использовании энергоэффективного оборудования ЕЕЕ.

Расчет потребляемой мощности РГ проводится на уровне каждого порта коммутатора Q_{P} и сетевого адаптера Q_{NIC} в виде [12]

$$Q^{\text{S}} = \sum_{i=1}^N Q_{\text{P}_i}^{\text{S}} + \sum_{j=1}^K Q_{\text{NIC}_j}^{\text{S}},$$

$$Q^{\text{EEE}} = \sum_{i=1}^N Q_{\text{P}_i}^{\text{EEE}} + \sum_{j=1}^K Q_{\text{NIC}_j}^{\text{EEE}}.$$

Аналогичным образом могут быть рассчитаны затраты и экономический эффект от реализации любого из вариантов проведения реинжиниринга РГ (Табл. 1).

Мощность, потребляемая портом коммутатора и картой сетевого адаптера, зависит от величины загрузки канала, к которому они подключены, и определяется в виде [12]

$$Q^{\text{S}} = [Q_{\text{А}} U_i + Q_{\text{П}} (1 - U_i)],$$

каждому i -му порту и сетевому адаптеру λ_i и среднее значение размера передаваемого кадра $L_{\text{К}_i}$.

На втором этапе, с учетом допущения о простейшем потоке поступления заявок на обслуживание кадров в канале и экспоненциальном распределении времени их обслуживания, рассчитывается среднее время передачи кадра

$$T_{\text{ПЕР}_i} = \frac{\lambda_i \cdot T_{\text{ТР}_i}}{\lambda_i (1 - \lambda_i \cdot T_{\text{ТР}_i})}, \quad T_{\text{ТР}_i} = \frac{L_{\text{К}_i} + L_{\text{П}}}{V_{\text{К}_i}},$$

где $T_{\text{ТР}_i}$ – время транзакции кадра по физическому каналу i -го порта (адаптера), $L_{\text{К}_i}$ – средняя длина кадров, передаваемых через i -й порт (адаптер), $L_{\text{П}}$ – минимальный размер паузы между кадрами, равный 96 байт [1], $V_{\text{К}_i}$ – скорость передачи по физическому каналу i -го порта (адаптера).

После этого рассчитывается значение загрузки i -го порта (адаптера) в виде

$$U_i = \lambda_i \cdot T_{\text{ПЕР}_i}.$$

2. Метод выбора оптимального плана энергоэффективного реинжиниринга ККС

В силу большого количества коммуникационного оборудования в составе ККС реинжиниринг сети выполняется за K этапов. На каждый i -й этап реинжиниринга ККС выделяется некоторый допустимый объем средств $C_{\text{ККС}_i}^{\text{доп}}$ для проведения модернизации. Для каждого этапа реинжиниринга необходимо выбрать такой вариант модернизации для каждой РГ, который бы обеспечивал максимальный экономический эффект от эксплуатации ККС и стоимость реализации которого не превышала бы выделенной на данный этап суммы. Очевидно, что показатель эффективности для каждого этапа реинжиниринга можно записать в виде

$$C_{\text{ККС}_i}^{\text{Э}} = \sum_{j=1}^L C_{\text{РГ}_j}^{\text{Э}} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где $C_{\text{ККС}_i}^{\text{Э}}$ – экономический эффект от проведения реинжиниринга ККС на i -ом этапе, $C_{\text{РГ}_j}^{\text{Э}}$ – экономический эффект от проведения реинжиниринга j -й РГ.

При этом должно выполняться ограничение, чтобы стоимость реинжиниринга не превышала объема выделенных на i -ом этапе средств

$$C_{\text{ККС}_i}^{\text{Р}} = \sum_{j=1}^L C_{\text{РГ}_j}^{\text{Р}} \leq C_{\text{ККС}_i}^{\text{доп}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{ККС}_i}^{\text{Р}}$ – затраты на реинжиниринг ККС на i -ом этапе, $C_{\text{РГ}_j}^{\text{Р}}$ – затраты на реинжиниринг j -й РГ, $C_{\text{ККС}_i}^{\text{доп}}$ – объема выделенных на i -ом этапе средств.

Показатель эффективности (3) и ограничение (4) определяют оптимальный вариант реинжиниринга ККС на i -ом этапе.

Очевидно, что показатель эффективности и ограничения для всего процесса реинжиниринга, выполняемого за K этапов, можно представить в виде

$$C_{\text{ККС}}^{\text{Э}} = \sum_{i=1}^K C_{\text{ККС}_i}^{\text{Э}} \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$C_{\text{ККС}}^{\text{Р}} = \sum_{i=1}^K C_{\text{ККС}_i}^{\text{Р}} \leq C_{\text{ККС}}^{\text{доп}},$$

где $C_{\text{ККС}}^{\text{доп}}$ – общий объем средств необходимый для проведения реинжиниринга всей ККС.

В силу адитивности показателя (5) он принимает максимальное значение только при максимальном значении показателя (3). Очевидно, что показатель эффективности (5) определяет оптимальный план реинжиниринга ККС, который осуществляется за K этапов. Следовательно, оптимальный план реинжиниринга обеспечивается за счет выбора оптимального варианта реинжиниринга ККС на каждом этапе модернизации.

Задача выбора оптимального варианта реинжиниринга ККС на каждом этапе модернизации решается с использованием метода динамического программирования [13]. На каждом этапе модернизации метод реализуется за L последовательных шагов, где L равно количеству РГ в составе ККС. На каждом шаге метода, для соответствующей РГ, выбирается оптимальный по показателю (3) вариант реинжиниринга, который обеспечивает максимальный экономический эффект от модернизации РГ. На l -ом шаге для выбора оптимального варианта используется характеристическое уравнение вида

$$F_l = \max [C_{\text{РГ}_q}^{\text{Э}} + F_{l-1}], \forall q, \overline{1, Q},$$

где F_l – функция выигрыша, определяющая значение экономического эффекта за l шагов алгоритма, $C_{\text{РГ}_q}^{\text{Э}}$ – экономический эффект от внедрения q -го варианта реинжиниринга РГ, F_{l-1} – функция выигрыша, определяющая значение экономического эффекта, полученного на предыдущих $l-1$ шагах алгоритма.

Через L шагов метод позволяет определить оптимальный вариант реинжиниринга для всей ККС, стоимость реализации которого не превышает выделенного объема средств (4). В работе [14] приведен алгоритм реализации данного метода.

Таким образом, используя описанный выше метод динамического программирования на каждом из K этапов реинжиниринга ККС мы получаем оптимальный план энергоэффективной модернизации сети, обеспечивающий максимальный экономический эффект от реинжиниринга.

Выводы

В работе предложены модели для расчета стоимости проведения энергоэффективного ре-

инжиниринга произвольного фрагмента сети, модели для расчета экономического эффекта от проведения реинжиниринга. Данные модели используются в методе выбора оптимального плана энергоэффективного реинжиниринга ККС.

Сформулирован показатель эффективности и предложен метод динамического программирования для построения оптимального плана реинжиниринга ККС. Реинжиниринг сети выполняется за K этапов, при этом на каждом этапе с использованием расчетной схемы динамического программирования выполняется оптимальный выбор фрагмента сети, обеспечивающий максимальный экономический эффект от реализуемой энергоэффективной модернизации сети.

Список использованной литературы

1. IEEE 802.3az-2010: Energy Efficient Ethernet, Amendment to IEEE standard 802.3-2008 (CSMA/CD) specifications, IEEE Std. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ieee802.org/3/> (дата доступа (01.02.2017)).
2. ES 1100 switches series. Zexel white paper [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.zyxel.com/products_services/8-16-24-port-FE-Unmanaged-Switch-ES1100-Series/ (дата доступа (01.02.2017)).
3. K. Christensen, P. Reviriego, B. Nordman, M. Bennett, M. Mostowfi, and J. Maestro IEEE 802.3az: the road to Energy Efficient Ethernet, *Communications Magazine, IEEE* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/224189701_IEEE_8023az_The_road_to_energy_efficient_Ethernet (дата доступа (01.02.2017)).
4. S. Nesterenko, R. Langman and O. Makarov [Text] / Nesterenko S., Langman R. and Makarov O. – The WOAS project: Web-oriented Automation systems, *Proceedings of International conference REV-2012* No.1, 2012, pp. 341-345.
5. Kyung Jae Kim, Shunfu Jin, Naishuo Tian, Bong Dae Choi [Text] / J. K. Kyung, N. T. Shunfu Jin, D. C. Bong. – Mathematical analysis of burst transmission scheme for IEEE 802.3az energy efficient Ethernet, *Performance Evaluation*, Vol. 102, 2016, pp. 1-52.
6. J. Meng, F. Ren, W. Jiang, and C. Lin [Text] / Meng J., Ren F., Jiang W., and Lin C. Modeling and understanding burst transmission algorithms for energy efficient Ethernet, in *Quality of Service (IWQoS) IEEE/ACM 21st International Symposium*, 2013, pp. 1–10.
7. S. Herreria-Alonso, M. Rodriguez-Perez, M. Fernandez-Veiga, and C. Lopez-Garcia, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2264658> (дата доступа (01.02.2017)).
8. P. Reviriego, K. Christensen, J. Rabanillo, and J. Maestro An initial evaluation of Energy Efficient Ethernet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5743052/> (дата доступа (01.02.2017)).
9. P. Reviriego, J. A. Hernandez, D. Larrabeiti, and J. A. Maestro Performance evaluation of energy efficient Ethernet, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5282379/> (дата доступа (01.02.2017)).
10. R. Sohan, A. Rice, A. W. Moore, and K. Mansley Characterizing 10 Gbps network interface energy consumption [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:LhQEfK3MBv8J:https://pdfs.semanticscholar.org/019a/591f7edebf3d06817d4f9b1d5a82bf78c085.pdf+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ua> (дата доступа (01.02.2017)).
11. Campus Wired LAN. Cisco Technology design guide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:f2ysUyiBcDUJ:www.cisco.com/c/dam/en/us/td/docs/solutions/CVD/Aug2013/CVD-CampusWiredLANSDesignGuide-AUG13.pdf+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ua> (дата доступа (01.02.2017)).
12. S.A. Nesterenko, (2016), Costs evaluation methodic of energy efficient computer network reengineering [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pratsi.opu.ua/articles/all/year:2016/release:36> (дата доступа (01.02.2017)).
13. С. А. Нестеренко, Выбор оптимального плана внедрения корпоративных компьютерных сетей с учётом динамики их развития [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjMuKyHgIPUAhXnYJoKHWrCDTkQFghGMAc&url=http%3A%2F%2Funiirt.ddns.net%2Fdrupal6%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fsod%2F38_1_41_2005.pdf&usq=AFQjCNEdYjc9FNsagfR5hM0MIo2FOmQZDA&sig2=u5n2ecDOShKodEPip3eeEg (дата доступа (01.02.2017)).
14. С.А. Нестеренко Интегрированная система проектирования корпоративных компьютерных сетей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vXQpIWLn->

LIJ:storage.library.opu.ua/online/periodic/opu_2006_3(sv)/21.pdf+&cd=2&hl=ru&ct=clnk&gl=ua (дата доступу (01.02.2017)

References

1. IEEE 802.3az-2010: Energy Efficient Ethernet, Amendment to IEEE standard 802.3-2008 (CSMA/CD) specifications, IEEE Std., 2010, 125p.
2. ES 1100 switches series. Zexel white paper, 2013, 5p.
3. K. Christensen, P. Reviriego, B. Nordman, M. Bennett, M. Mostowfi, and J. Maestro, (2010), IEEE 802.3az: the road to Energy Efficient Ethernet, *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, no. 11, pp. 50–56, November.
4. S. Nesterenko, R. Langman and O. Makarov (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*, Volume 102, pp. 1–52.
6. J. Meng, F. Ren, W. Jiang, and C. Lin, (2013), Modeling and understanding burst transmission algorithms for energy efficient Ethernet, in *Quality of Service (IWQoS) IEEE/ACM 21st International Symposium*, pp. 1–10.
7. S. Herreria-Alonso, M. Rodriguez-Perez, M. Fernandez-Veiga, and C. Lopez-Garcia, (2012), Optimal configuration of Energy Efficient Ethernet, *Computer Networks*, vol. 56, no. 10, pp. 2456–2467.
8. P. Reviriego, K. Christensen, J. Rabanillo, and J. Maestro, (2011), An initial evaluation of Energy Efficient Ethernet, *Communications Letters, IEEE*, vol. 15, no. 5, pp. 578–580.
9. P. Reviriego, J. A. Hernandez, D. Larrabeiti, and J. A. Maestro, (2009), Performance evaluation of energy efficient Ethernet,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 9, pp. 697–699.
10. R. Sohan, A. Rice, A. W. Moore, and K. Mansley, (2010), Characterizing 10 Gbps network interface energy consumption,” *35th IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 97–105.
11. Campus Wired LAN. Cisco Technology design guide, 97p, 2013.
12. S. A. Nesterenko, (2016), Costs evaluation methodic of energy efficient computer network reengineering”, *Odes'kyi Politechnichniy Universitet. Pratsi*, № 2(49), pp. 70–75.
13. Nesterenko, S. A. (2005), The choice of the optimal implementation plan of corporate computer networks taking into account the dynamics of their development [Vibor optimalnogo plana vnedreniya korporativnih komputernih setey s uchetom dinamiki ih razvitiy], *Prasi UNDIRT*, No 41, pp. 66–68 [In Russian].
14. Nesterenko, S. A. (2006), Integrated system of corporate computer networks design [Integrirovanay sistema proektirovaniy korporativnih komputernih setey], *Trudi Odesskogo politehnicheskogo universiteta*, Spechvipusk, pp. 125–130 [In Russian].

CHOOSING THE OPTIMAL PLAN FOR ENERGY EFFICIENT REENGINEERING OF CORPORATE COMPUTER NETWORK

S.A. Nesterenko

Odessa National Polytechnic University

Abstract. The paper shows that energy efficient reengineering of a corporate computer network is performed in several stages. At each stage, reengineering is performed for a certain fragment of the network taking into account the amount of allocated funds for this phase of network modernization. To assess the effectiveness of each stage in the work model to calculate the cost of implementing an energy-efficient reengineering of an arbitrary network fragment and a model for calculating the economic effect of reengineering are proposed. Calculation of the power consumption of the network is carried out at the level of each switch port and network card. The power consumed by the switch port and the network card depends of the channel load to which they are connected. In the work the technology of port and network card load calculation is offered. The technology consists of two stages. At the first stage, using the instrumental measuring tools, the average value of the frame rate per port and network card and the average value of the transmitted frame size are determined. At the second stage, using the queuing theory models, the average frame transfer time is determined. In the models was made the assumption about the simplest flow of requests for servicing frames in the communication channel of the network and the exponential distribution of their service time.

An efficiency indicator is formulated and a dynamic programming method for constructing an optimal reengineering plan for a corporate computer network is proposed. Reengineering of the network is performed for several stages and at each stage, using the dynamic programming scheme, the optimal network fragment is selected, which ensures the maximum economic effect from the realized of energy-efficient network upgrade.

The proposed method of choosing the optimal plan can be used as a practical tool for network engineers in the work on energy-efficient reengineering of corporate computer networks.

Key words: *computer network, energy-efficient reengineering, IEEE 802.3az standard mathematical models, efficiency indicators, dynamic programming.*

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО РЕІНЖИНІРИНГУ КОРПОРАТИВНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

С.А. Нестеренко

Одеський національний політехнічний університет

Анотація. *В роботі показано, що енергоефективний реінжиніринг корпоративної комп'ютерної мережі виконується за декілька етапів. На кожному етапі реінжиніринг виконується для деякого фрагменту мережі. Для оцінки ефективності виконання кожного етапу запропоновані моделі розрахунку вартості проведення енергоефективного реінжинірингу. Запропоновано метод динамічного програмування для побудови оптимального плану реінжинірингу корпоративної комп'ютерної мережі.*

Ключові слова: *комп'ютерна мережа, енергоефективний реінжиніринг, стандарт IEEE 802.3az, математичні моделі, показник ефективності, динамічне програмування.*

Получено 20.05.17



Нестеренко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных интеллектуальных систем и сетей, Одесского национального политехнического университета,
Email:sa_nesterenko@ukr.net

Sergey Nesterenko, Dr. of Science, professor of computer intellectual systems and networks department, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-3757-6594