

50. Bottacchi S. *Multi-Gigabit transmission over multimode optical fibre. Theory and design methods for 10GbE systems*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 2006. 654 p.
51. Burdin A.V. *Malomodovyy rezhim peredachi opticheskikh signalov po mnogomodovym voloknam: prilozheniya v sovremennykh infokommunikatsiyah* [The Malomodovy mode of transfer of optical signals on multimode fibers: applications in modern infokommunikation]. Samara, PSUTI Publ., 2011. 274 p.
52. Noordegraaf D. P.M. Skovgaard, M.D. Nielsen, J. Bland-Hawthorn Efficient multi-mode to single-mode coupling in a photonic lantern. *Optics Express*. 2009. vol. 17. no. 3. pp. 1988 – 1994. doi: 10.1364/OE.17.001988
53. Leon-Saval S.G., Argyros A., Bland-Hawthorn J. Bland-Hawthorn Photonic lanterns: a study of light propagation in multimode to single-mode converters. Bland-Hawthorn. *Optics Express*. 2010. vol. 18. no. 8. pp. 8430 – 8439. doi: 10.1364/OE.18.008430.

Received 25.09.2017

УДК 621.39

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОЙ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ В ПАССИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ TDM-PON

Росляков А.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ  
E-mail: aros1@mail.ru

Одной из главных целей создания сетей будущего (Future Networks) является снижение энергозатрат на их функционирование за счет использования различных энергосберегающих технологий. Важнейшими компонентами настоящих и будущих сетей являются пассивные оптические сети (Passive Optical Network), которые широко используются для построения широкополосных сетей доступа. В статье рассмотрена методика измерения энергопотребления оборудования пассивных оптических сетей с мультиплексированием с временным разделением каналов, основанная на материалах рекомендаций Международного союза электросвязи Y.3021 и Y.3022. Получены оценки возможной экономии энергопотребления в пассивной оптической сети на базе оборудования российской компании Eltex при использовании дремлющего режима и режима циклического сна.

**Ключевые слова:** будущие сети, пассивная оптическая сеть TDM-PON, энергопотребление, энергосбережение, дремлющий режим, режим циклического сна

### Введение

Экологические аспекты являются одним из четырех целевых сегментов, учитываемых при разработке концепции будущих сетей (Future Networks) [1], активно разрабатываемой Международным союзом электросвязи (МСЭ) [2]. Вклад телекоммуникационных технологий в снижение негативного воздействия будущих сетей на окружающую среду может быть реализован прежде всего через энергосбережение [3-5]. Но прежде чем определять пути и методы энергосбережения в будущих сетях, нужно знать величину энергии, потребляемой соответствующим телекоммуникационным оборудованием, и от чего она зависит. На этапах разработки, внедрения и последующей эксплуатации будущих сетей необходимо учитывать три уровня, каждому из которых соответствует своя технология энергосбережения [6]:

– уровень устройств: технологии, которые применяются для электронных устройств, таких как большие интегральные схемы и запоминающие устройства;

– уровень оборудования: технологии, которые применяются к одной единице оборудования (набору устройств), например маршрутизатору или коммутатору;

– уровень сети: технологии, которые применяются к оборудованию в рамках всей сети (например протокол маршрутизации, применяемый к нескольким маршрутизаторам).

Будущие сети должны задействовать эти технологии и обладать гибкостью при внедрении результатов их развития и эволюции в целях повышения эффективности энергосбережения.

На основе комбинации указанных технологий могут быть определены два основных пути энергосбережения в будущих сетях (см. рис. 1).

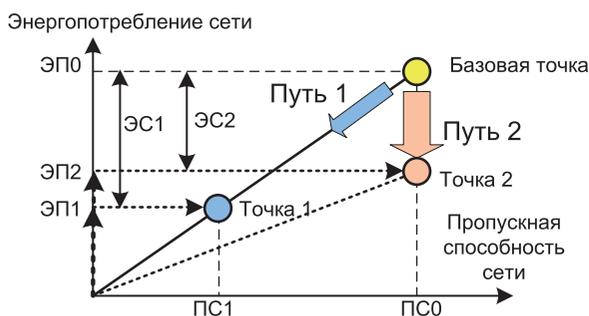


Рис. 1. Пути снижения энергопотребления сети

Путь 1. Снижение требуемой пропускной способности (ПС) будущих сетей. Очевидно, что если объем сетевого трафика снижается, то необходимые сетевые ресурсы и требуемая пропускная способность сети также уменьшаются, и, как следствие, снижается энергопотребление (ЭП) с ЭП0 до ЭП1, и получается энергосбережение ЭС1 (см. рис. 1, стрелка «Путь 1»).

Снизить требуемую пропускную способность будущей сети можно двумя способами. Во-первых, за счет уменьшения нагрузки на сеть. Этот подход является статическим и направлен на снижение объемов передаваемого сетевого трафика. Во-вторых, снизить максимальную пропускную способность сети можно за счет сдвига трафика в часы пиковой нагрузки (ЧНН) или даже урезания пиковых выбросов трафика. Этот подход является динамическим и направлен на оптимальное перераспределение сетевого трафика во времени.

Путь 2. Повышение энергоэффективности будущих сетей. При данном подходе повышение энергоэффективности сети реализуется на различных архитектурных уровнях, при этом предполагается, что требуемая пропускная способность сети остается неизменной (рис. 1, стрелка «Путь 2»), а энергопотребление снижается с ЭП0 до ЭП2, создавая энергосбережение ЭС2. В общем случае энергоэффективность сети может быть определена как пропускная способность сети, деленная на потребляемую мощность, (то есть бит•сек/Ватт), и определяется для максимальной пропускной способности.

Повысить энергоэффективность будущих сетей также можно двумя способами. Во-первых, за счет управления работой устройств и/или оборудования в соответствии с изменениями величины передаваемого трафика. Этот подход является динамическим. Существующие сетевые устройства и оборудование, как правило, работают с полной пропускной способностью и на полной скорости независимо от колебаний трафика. Данный подход заключается в управлении работой сетевых

устройств или оборудования в соответствии с колебаниями трафика.

Одной из базовых технологий, основанных на динамике трафика, является управление спящим режимом сетевых устройств. Такой режим способствует энергосбережению путем перевода устройства в спящий режим, если отсутствует передаваемый трафик. Эта технология позволяет экономить больше энергии, если многие из узлов сети находятся в спящем режиме. По этой причине метод управления спящим режимом эффективен, если он применим к сетям, в которых имеется большое количество устройств для обеспечения широкой зоны покрытия, высокая потребность в трафике в часы пик при малом среднем объеме трафика и, следовательно, при низких коэффициентах использования устройств. Одна из проблем управления спящим режимом касается метода обработки управляющего трафика, в частности сведений о необходимости перевода устройства из спящего режима в активный. В статье рассмотрена методика оценки энергопотребления пассивной оптической сети PON для различных режимов работы оконечного оборудования.

### Обобщенная модель измерения энергопотребления сети PON

Эталонная модель измерения энергопотребления будущих сетей, представленная в Рекомендации МСЭ-T Y.3022 [6], состоит из сетевого и серверного доменов. Сетевой домен включает различные узлы (например, коммутатор, маршрутизатор, беспроводный узел и др.) в сетях доступа и в магистральной транспортной сети. Одной из перспективных сетей проводного доступа для построения сетей будущего является технология пассивной оптической сети PON (Passive Optical Network).

Сеть PON содержит один оптический линейный терминал OLT (Optical Line Terminal), устанавливаемый на стороне станции, и несколько оптических сетевых устройств ONU (Optical Network Unit), устанавливаемых у пользователей (см. рис. 2). Эти устройства связаны между собой с помощью оптических волокон (ОВ), обеспечивающих двухстороннюю передачу информации в оптическом виде. К OLT подключается одно ОВ, а далее в соответствующих точках сети для реализации определенной сетевой топологии устанавливаются оптические сплиттеры (ОС), которые осуществляют деление (или объединение) оптической мощности сигналов разных ОВ, идущих к другим ОС или ONT. Сеть PON может

быть построена на основе трех основных топологий: «дерево», «звезда», «шина» – и их комбинаций.

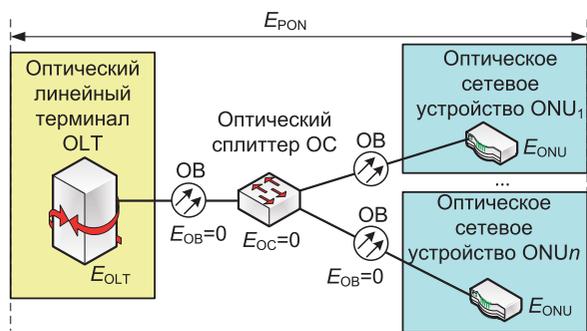


Рис. 2. Обобщенная модель PON для измерения энергопотребления

Оптические волокна и оптические сплиттеры пассивные, и, следовательно, они не учитываются при оценке энергопотребления PON. Поэтому потребляемая PON энергия  $E_{PON}$  является суммой энергопотребления OLT и всех ONT, входящих в состав сети:

$$E_{PON} = E_{OLT} + \sum_i E_{ONT,i},$$

где  $E_{OLT}$  – энергопотребление OLT;  $E_{ONT,i}$  – энергопотребление  $i$ -го ONT. Сети PON реализуются с использованием двух основных технологий мультиплексирования каналов: мультиплексирование с временным разделением каналов (TDM-PON) и спектральное разделение каналов (WDM-PON), каждая из которых имеет свои особенности при измерении энергопотребления.

### Измерение энергопотребления в сети TDM-PON

В системе TDM-PON терминал OLT имеет передатчик OLT-Tx, приемник OLT-Rx и общий модуль OLT-CM (см. рис. 3). Эти компоненты OLT всегда включены, поэтому энергопотребление всеми компонентами OLT в системе TDM-PON равно [4; 6]:

$$E_{OLT}^{TDM} = \sum_0^T \left\{ P_{OLT-CM} + P_{OLT-Tx}(\rho_{DL}, n) + P_{OLT-Rx}(\rho_{UL}, n) \right\}, \quad (1)$$

где  $P_{OLT-CM}$  – мощность, потребляемая общим модулем OLT;  $P_{OLT-Tx}(\rho_{DL}, n)$  – мощность, потребляемая передатчиком OLT;  $P_{OLT-Rx}(\rho_{UL}, n)$  – мощность, потребляемая приемником OLT;  $\rho_{DL}$  – нагрузка вниз DL (DownLink) к устройству ONU;  $\rho_{UL}$  – нагрузка вверх UL (UpLink) от устройства

ONU;  $n$  – число ONU, обслуживаемых OLT;  $T$  – время измерения.

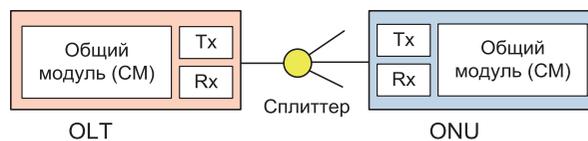


Рис. 3. Обобщенная схема сети TDM-PON

Из (1) видно, что энергопотребление OLT зависит от нагрузки к устройствам и от устройств ONU, а также от их количества, подключенных к OLT. Устройство ONU также имеет передатчик ONU-Tx, приемник ONU-Rx и общий модуль ONU-CM. Так как эти компоненты ONU всегда включены, то общее энергопотребление ONU равно [4; 6]:

$$E_{ONU}^{TDM} = \sum_0^T \{ P_{ONU-CM} + P_{ONU-Tx}(\rho_{UL}) + P_{ONU-Rx}(\rho_{DL}) \}, \quad (2)$$

где  $P_{ONU-CM}$  – мощность, потребляемая общим модулем ONU;  $P_{ONU-Tx}(\rho_{UL})$  – мощность, потребляемая передатчиком ONU;  $P_{ONU-Rx}(\rho_{DL})$  – мощность, потребляемая приемником ONU;  $\rho_{DL}$  – трафик вниз к устройству ONU;  $\rho_{UL}$  – трафик вверх от устройства ONU.

Из (2) видно, что мощность, потребляемая передатчиком ONU, зависит от нагрузки из сети к пользователю, а мощность, потребляемая приемником ONU, зависит от трафика от пользователя в сеть. Для экономии энергопотребления в ONU МСЭ-Т предлагает использовать два режима сна: дремлющий режим и режим циклического сна [7].

В дремлющем режиме ONU выключает свой передатчик и держит всегда включенным приемник [8]. В результате OLT может передавать нисходящий трафик к ONU. Для передачи трафика от пользователя в сеть ONU включает передатчик и передает информацию в OLT во время специального интервала передачи по восходящему каналу. Так как в дремлющем режиме приемник и общий модуль всегда включены, потребляемая энергия этих компонентов постоянная. Потребление же энергии передатчиком в этом режиме зависит в основном от трафика восходящего канала связи  $\rho_{UL}$ , размеров пакетов  $l_{size}$  и состояния дремлющего режима  $s_{Doze}$ . Таким образом, потребление энергии ONU в дремлющем режиме равно [6]:

$$E_{ONU-Doze}^{TDM} = \sum_0^T \left\{ P_{ONU-Rx} + P_{ONU-CM} + P_{ONU-Tx}(\rho_{UL}, l_{size}, s_{Doze}) \right\}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ONU-T}_x}$  – мощность, потребляемая передатчиком ONU;  $P_{\text{ONU-R}_x}$  – мощность, потребляемая приемником ONU;  $P_{\text{ONU-CM}}$  – мощность, потребляемая общим модулем ONU.

В режиме циклического сна ONU периодически просыпается, включив как передатчик, так и приемник, чтобы проверить, имеется ли трафик на передачу или прием [9]. В данной модели предполагается, что общий модуль ONU всегда включен, а передатчик и приемник периодически включаются в конце каждого периода сна  $T_s$ . Таким образом, потребляемая энергия только этих двух модулей зависит от поступающего трафика  $\rho_{\text{DL}}$ ,  $\rho_{\text{UL}}$  и длины интервала сна  $T_s$  в состоянии циклического сна  $s_{\text{CycleSleep}}$ . Следовательно, энергопотребление ONU в режиме циклического сна равно [6]:

$$E_{\text{ONU-CycleSleep}}^{\text{TDM}} = \sum_0^T \{P_{\text{CM}} + P_{\text{T}_x}(\rho_{\text{UL}}, l_{\text{size}}, T_s, s_{\text{CycleSleep}})\} + P_{\text{R}_x}(\rho_{\text{DL}}, l_{\text{size}}, T_s, s_{\text{CycleSleep}}).$$

### Пример оценки энергосбережения в сети GPON

Оценим величину энергосбережения в сети TDM-PON на примере оборудования российской компании Eltex. В качестве OLT используется мультисервисный узел доступа и агрегации MA4000-PX [10], предназначенный для построения сетей доступа по технологии GPON. Система позволяет строить масштабируемые, отказоустойчивые сети «последней мили», обеспечивающие высокие требования безопасности, как в сельских, так и в городских населенных районах. Узел доступа осуществляет управление абонентскими устройствами, коммутацию трафика и соединение с транспортной сетью. Центральным элементом MA4000-PX является масштабируемый Ethernet коммутатор уровня L2+ (модуль PP4X), работающий во взаимодействии с интерфейсными модулями оптического доступа PLC8 для подключения абонентских устройств по технологии GPON. В состав MA4000-PX входят два модуля управления и коммутации PP4X и до 16 модулей PLC8, каждый из которых поддерживает до 8 интерфейсов GPON 2,5 Гбит/с. К каждому модулю PLC8 можно подключить максимально 512 абонентских устройств ONU. Потребляемая мощность модуля PP4X – 70 Вт, модуля PLC8 – 40 Вт, вентиляторы потребляют 53 Вт. Таким образом, общее энергопотребление MA4000-PX в полной комплектации равно

$$P_{\text{MA4000-PX}} = 2P_{\text{PP4X}} + 16P_{\text{PLC8}} + P_{\text{fan}} = 338, \text{ Вт.}$$

В качестве ONU используются multifunctionальные абонентские терминалы ONT NTP, предназначенные для доступа к современным услугам телефонии и высокоскоростному интернету [11]. Потребляемая мощность одного устройства ONT NTP составляет 12 Вт. При максимальной комплектации к MA4000-PX можно подключить до 4096 ONU. Таким образом, максимальное энергопотребление сети GPON составит:

$$P_{\text{GPON}} = P_{\text{MA4000-PX}} + 4096P_{\text{ONT NTP}} = 49490, \text{ Вт.}$$

Как правило, энергопотребление приемников и передатчиков OLT и ONU зависит линейно от величины загрузки и при отсутствии трафика равно энергопотреблению общих блоков. Для MA4000-PX такими блоками являются модули PP4X и вентиляторы. ONT NTP при отсутствии нагрузки потребляет не более 2 Вт.

В дремлющем режиме в ONU приемник постоянно включен, а передатчик работает только при наличии трафика. Пусть приемник и передатчик в ONT NTP потребляют по 5 Вт каждый. Тогда энергопотребление сети GPON в дремлющем режиме равно

$$P_{\text{GPON}}^{\text{Doze}} = 20480 \rho + 28672, \text{ Вт.}$$

Как было указано выше в режиме циклического сна ONU периодически просыпается, включив как передатчик, так и приемник, чтобы проверить, имеется ли трафик на передачу или прием. Допустим, ONU тратит 1% энергии на периодическую проверку наличия трафика. Тогда энергопотребление сети GPON в режиме циклического сна равно

$$P_{\text{GPON}}^{\text{Sleep}} = 40960 \rho + 8530, \text{ Вт.}$$

Графики зависимостей энергопотребления рассматриваемой сети GPON от загрузки для различных режимов приведены на рис. 4.

Результаты анализа показывают, что при средней загрузке энергопотребление сети GPON может быть снижено до 30% при использовании дремлющего режима и до 50% в режиме циклического сна. При этом необходимо учитывать, что данные режимы в определенной степени влияют на качество обслуживания и возможны дополнительные задержки при передаче трафика от пользователя и от сети, так как необходимо время для перевода ONU из дремлющего режима или режима циклического сна в активный режим.

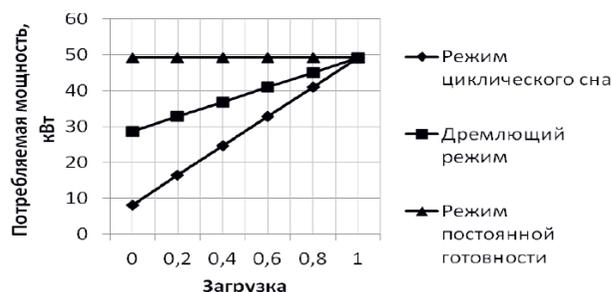


Рис. 4. Энергопотребление сети GPON при различных режимах работы

## Выводы

Представленная в рекомендации МСЭ-T Y.3022 обобщенная методика измерения энергопотребления пассивных оптических сетей позволяет определить только направления энергосбережения в сетях доступа на базе технологий PON. Для практического использования данной методики необходимо проведение дальнейших теоретических исследований, так как представленные в методике формулы требуют определения зависимостей энергопотребления конкретного оборудования TDM-PON от передаваемого трафика в различных направлениях и от используемых режимов работы оконечных устройств OLT и ONU.

## Литература

1. Росляков А.В., Ваняшин С.В. Будущие сети (Future Networks). Самара: Изд-во ПГУТИ, 2015. – 274 с.
2. Recommendation ITU-T Y.3001: Future Networks: Objectives and design goals (05/2011).
3. Recommendation ITU-T Y.3021: Framework of energy saving for future networks (01/2012).

**Росляков Александр Владимирович**, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой автоматической электросвязи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. (8-846) 333-69-25. E-mail: arosl@mail.ru

## ENERGY SAVING POTENTIAL ESTIMATION FOR TDM-PON

Roslyakov A.V.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

*E-mail: arosl@mail.ru*

Energy saving in the information and communication technology field is an important problem identified while designing Future Networks. To reduce energy consumption, it is important to analyze it at each stage of the lifecycle. In case of networks the in-use mode is primarily considered because energy consumption in this mode is usually the major issue for always-on network equipment. The energy consumption of this mode can be controlled by network architecture, capabilities and operations. The article describes the method of measuring power consumption of passive optical network (PON) equipment with time division multiplexing (TDM). Analysis method is based on the ITU Recommendations Y.3021 and Y.3022. Evaluation of potential energy savings is performed for the Gigabit Passive Optical Network equipment of Eltex Russian company using sleep

4. Росляков А.В. Оценка энергопотребления будущих сетей // Электросвязь. №8, 2016. – С. 44-51.
5. Росляков А.В. Оценка энергоэффективности будущих сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. Вып. 3 (11), 2015. – С. 54-64.
6. Recommendation ITU-T Y.3022: Measuring energy in networks (08/2013).
7. Zhang Y., Chowdhury P., Tornatore M. et al. Energy Efficiency in Telecom Optical Networks, IEEE Communication Surveys and Tutorials. Vol. 12, №4, 2010. – P. 441-458.
8. Li J., Lee K-L., Chan C. et al. Dynamic Power Management at the Access Node and Customer Premises in Point-to-Point and Time-Division Optical Access // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014, Vol. 32, №8, 2014. – P. 1575-1584.
9. Kubo R., Kani J., Ujjikawa H. et al. Hybrid Power-saving Mechanism with Cyclic Sleep and Adaptive Link Rate Functions for 10G-EPON Systems // Electronics Letters. Vol. 46, №13, 2010. – P. 934-936.
10. Сайт компании Eltex. Оборудование GPON. OLT MA4000-PX // URL: <http://www.eltex.nsk.ru/catalog/ma4000-px.php> (д.о.10.01.2017).
11. Сайт компании Eltex. Оборудование GPON. ONT NTP-2 // URL: <http://www.eltex.nsk.ru/catalog/ntp-2.php> (д.о. 10.01.2017).

*Получено 05.09.2017*

and cyclic sleep modes. The results of the analysis show that the power consumption of the passive optical network can be reduced to 30% when using sleep mode and up to 50% in cyclic sleep mode with an average network load.

**Keywords:** Future Networks, Passive Optical Network TDM-PON, energy consumption, energy saving, sleep mode, cyclic sleep mode

**DOI:** 10.18469/ikt.2017.15.4.05

**Roslyakov Alexander Vladimirovich**, Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara, 443010, Russian Federation; the Head of Department of Automatic Telecommunications; Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +78463336925. E-mail: arosl@mail.ru.

## References

1. Roslyakov A.V., Vanyshin S.V. *Budushie seti* [Future Networks]. Samara, PSUTI Publ., 2015. 274 p.
2. Recommendation ITU-T Y.3001: Future networks: Objectives and design goals (05/2011).
3. Roslyakov A.V. Ocenka energopotrebleniy buduschih setey [Energy assessment of future networks]. *Electrosvyaz*, 2016, no.8, pp. 44-51.
4. Recommendation ITU-T Y.3021: Framework of energy saving for future networks (01/2012).
5. Roslyakov A.V. Ocenka energoeffektivnosti buduschih setey [Assessment of future networks energy efficiency]. *Informacionnye tehnologii i telekommunikacii*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 54-64.
6. Recommendation ITU-T Y.3022: Measuring energy in networks (08/2013).
7. Zhang Y., Chowdhury P., Tornatore M., Mukherjee B. Energy Efficiency in Telecom Optical Networks. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 2010, v. 12, no. 4, p. 441-458. doi: 10.1109/SURV.2011.062410.00034.
8. Li J., Lee K-L., Chan C., Anthapadmanabhan N., Dinh N., Vetter P. Dynamic Power Management at the Access Node and Customer Premises in Point-to-Point and Time-Division Optical Access. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, v. 32, no.8, pp.1575 – 1584. doi: 10.1109/JSAC.2014.2335333.
9. Kubo R., Kani J., Ujikawa H., Sakamoto T., Yoshimoto N., Hadama H. Hybrid Power-saving Mechanism with Cyclic Sleep and Adaptive Link Rate Functions for 10G-EPON Systems. *Electronics Letters*, 2010, v. 46, no. 13, pp. 934-936. doi: 10.1049/el.2010.0867.
10. The site of Eltex. Equipment GPON. OLT MA4000-PX. Available at: <http://www.eltex.nsk.ru/catalog/ma4000-px.php> (accessed 10.01.2017).
11. The site of Eltex. Equipment GPON. ONT NTP-2. Available at: <http://www.eltex.nsk.ru/catalog/ntp-2.php> (accessed 10.01.2017).

Received 05.09.2017

УДК 004.724.4

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В КОММУТИРУЕМЫХ ПАКЕТНЫХ СЕТЯХ

Трошин А.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru

В статье излагается методика оптимизации технологии резервирования в сетях с коммутацией пакетов, в основе которой лежит использование множества неэквивалентных остовных деревьев графов для определения путей передачи пакетов между коммутаторами. Использование неэквивалентных остовных деревьев позволяет увеличить число доступных путей для балансировки сетевого трафика и тем самым повысить эффективность использования пропускной способности сети. Построение остовных деревьев предлагается связать с ролью коммутаторов в сети. Затем предлагается оптимизировать передачу трафика при помощи методов линейного программирования. Представлен пример оптимизации резервирования.

**Ключевые слова:** пакетные сети, резервирование, остовные деревья графов, коммутаторы, сетевая оптимизация, линейное программирование