

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

Введение

Одной из основных задач при эксплуатации сетей с коммутацией пакетов является обеспечение их бесперебойной работы, поскольку отказы могут приводить к весьма значительным финансовым и репутационным потерям. С целью повышения отказоустойчивости работы пакетных сетей производится резервирование соединительных линий и коммутационного оборудования, это требует вложения значительных средств. Для обеспечения резервирования за длительный период развития пакетных сетей было предложено множество различных технологий резервирования, которые были разработаны такими организациями, как IEEE, IETF, и компаниями Cisco, Juniper, DEC, HP и др. Наиболее широкое развитие получили такие протоколы обеспечения отказоустойчивости, как STP, RSTP, PVST и MST. В основе большинства данных технологий лежит использование остовных деревьев графов для определения беспетлевых путей передачи пакетов в коммутируемой сети [1-2].

Главными недостатками использования остовных деревьев для передачи пакетов являются [2-4]:

- низкая эффективность использования ресурсов сети, поскольку для передачи пакетов используется единственный путь, а пропускная способность альтернативных путей никак не задействуется;

- в общем случае неоптимальная маршрутизация пакетов по сети, поскольку кратчайшие пути между коммутаторами определяются только относительно одного корневого коммутатора.

Для устранения перечисленных недостатков предлагается ряд решений для повышения эффективности резервирования пакетных сетей с целью увеличения использования их ресурсов.

Использование неэквивалентных остовных деревьев для определения путей передачи пакетов

Как уже было отмечено, в большинстве современных технологий резервирования для определения путей передачи пакетов используются остовные деревья графов. Остовное (покрывающее) дерево представляет собой ациклический связный подграф данного связанного неориентированного графа, в который входят все его вершины [5-6]. Остовные деревья обладают следующими свойствами:

- для любых двух вершин существует единственный соединяющий их простой путь;

- граф дерева перестает быть связным, если удалить любое его ребро;

- граф дерева является ациклическим, но добавление любого ребра к нему порождает цикл

В общем случае заданный граф может содержать множество остовных деревьев. В наиболее распространенных технологиях резервирования, таких как STP, RSTP и PVST, для определения путей передачи пакетов используются деревья кратчайших путей (ДКП). Каждое ДКП представляет собой остовное дерево такое, что путь от вершины-корня до любой другой вершины является кратчайшим путем между этими вершинами [5-8].

Для построения ДКП в заданных графах наиболее часто применяют алгоритмы Беллмана-Форда и Дейкстры. Алгоритмы Беллмана-Форда имеют более простую реализацию, однако алгоритм Дейкстры является одним из наиболее быстрых алгоритмов построения остовных деревьев и поэтому более предпочтителен для применения в современных сетях [7].

Низкая эффективность традиционных технологий резервирования связана с тем, что для передачи пакетов используется только один путь, который рассчитывается с использованием одного остовного дерева, построенного относительно одного корневого коммутатора. Для повышения эффективности разработаны технологии, основанные на маршрутизации пакетов по сети (TRILL), а также использования нескольких эквивалентных (с одинаковой стоимостью) остовных деревьев (SPB).

Основными недостатками первого подхода являются сложность реализации, высокие требования к сетевому оборудованию и несовместимость с традиционными технологиями резервирования. Второй способ повышения эффективности может совместно использоваться с традиционными протоколами, однако, в общем случае, заданный граф сети может не иметь нескольких эквивалентных остовных деревьев, что ограничивает область применения данного способа. В связи с вышесказанным представляется перспективным использование неэквивалентных остовных деревьев для определения путей передачи пакетов, поскольку данный подход будет иметь наибольшую область применения [2-4].

Рассмотрим наиболее общие моменты, которые могут повлиять на определения путей передачи пакетов в коммутируемых сетях:

- для отказоустойчивости сети необходимо иметь несколько путей передачи пакета от узла-источника к узлу назначения (конечным узлам);

– общая скорость передачи пакетов от одного конечного узла к другому может делиться между несколькими путями;

– помимо конечных узлов, в сетях могут быть узлы, задачей которых является только перенаправление пакетов между конечными узлами, так называемые транзитные узлы;

– часть путей передачи пакетов может быть либо недоступной, либо нежелательной для использования, например с точки зрения безопасности.

Общая рекомендация при проектировании пакетных сетей заключается в максимальном использовании пропускной способности и ресурсов транзитных узлов, поскольку на конечные узлы, во-первых, возлагается задача обработки пользовательского трафика, а во-вторых, их использование для транзитной передачи может быть либо невозможным, в том случае если они находятся под контролем другой организации, либо представлять угрозу для конфиденциальности транзитного трафика. Поскольку при использовании остовных деревьев большая часть трафика передается через корневой коммутатор, то наиболее целесообразным представляется использование в качестве корневых транзитных коммутаторов данной сети.

Рассмотрим расчет путей передачи пакетов при помощи остовных деревьев в сети, представленной на рис. 1, где коммутаторы S0, S1, S2 и S3 составляют ядро сети, не генерируют трафик и таким образом представляют собой транзитные узлы. Коммутаторы S4, S5, S6 и S7 являются коммутаторами уровня распределения для пользовательских сегментов сети, они генерируют и обрабатывают пользовательский трафик и таким образом являются конечными узлами. Также на рис. 1 приведена условная стоимость отдельных линий, соединяющих коммутаторы.

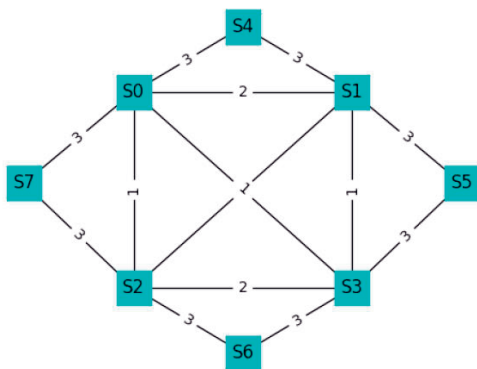


Рис. 1. Пример коммутируемой сети

Используя алгоритм Дейкстры, мы получим остовное ДКП, представленное на рис. 2, при использовании транзитного коммутатора S0 в качестве корневого.

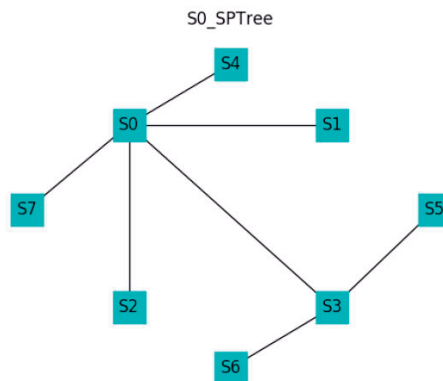


Рис. 2. Остовное дерево коммутатора S0

Для данного остовного дерева путь между конечными коммутаторами S4 и S5 будет проходить через транзитные коммутаторы S0 и S3 и будет представлять последовательность S4-S0-S3-S5. Путь между коммутаторами S5 и S7 можно представить в виде последовательности S5-S3-S0-S7. Для других пар конечных коммутаторов пути могут быть представлены аналогичным образом.

Для реализации предложенного способа определения путей передачи пакетов была разработана программа на языке программирования Python. Рассчитанные пути для графа сети, представленного на рис. 1, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Пути передачи пакетов

Коммутаторы	Путь
S4-S5	1) S4-S0-S3-S5 2) S4-S1-S5 3) S4-S0-S2-S1-S5 4) S4-S1-S3-S5
S4-S6	1) S4-S0-S2-S6 2) S4-S1-S3-S6
S4-S7	1) S4-S0-S7 2) S4-S1-S2-S7 3) S4-S0-S2-S7 4) S4-S1-S3-S0-S7
S5-S6	1) S5-S3-S0-S2-S6 2) S5-S1-S3-S6 3) S5-S1-S2-S6 4) S5-S3-S6
S5-S7	1) S5-S3-S0-S7 2) S5-S1-S2-S7
S6-S7	1) S6-S2-S0-S7 2) S6-S3-S1-S2-S7 3) S6-S2-S7 4) S6-S3-S0-S7

Оптимизация сетевого трафика при резервировании

Получение оптимальных потоков трафика в сети относится к известному классу задач оптимального распределения мультипродуктовых потоков (multi-commodity flow problem) между узлами-источниками и узлами-поглотителями в транспортной (потоковой) сети (flow network). Применительно к телекоммуникационным сетям данная задача может быть сформулирована следующим образом.

Пусть задан ориентированный граф сети G , состоящий из V -вершин (узлов) и E -ребер (соединительных линий). Между парами узлов данного графа необходимо передать D -потоков трафика величиной h_d . Для каждой линии задается переменная x_{ed} , которая определяет ту часть h_d для требования d , которая будет передаваться по линии e . Переменные для входящих в сетевой узел потоков будут являться положительными, а переменные для исходящих потоков будут отрицательными. Для узла-источника сумма всех потоков должна быть равна по величине h_d . Для узла, на котором данный поток заканчивается, сумма переменных должна быть равна $-h_d$ для остальных узлов (транзитных), не относящихся ни к источникам, ни к конечным узлам, сумма всех переменных для потоков должна быть равна нулю [9]. В обобщенном виде данное ограничение носит название правила сохранения потоков [9]:

$$\sum_e a_{ev} x_{ed} - \sum_e b_{ev} x_{ed} = \begin{cases} h_d, & \text{если } v = s_d; \\ 0, & \text{если } v \neq s_d, t; \\ -h_d, & \text{если } v = t_d, \end{cases} \quad (1)$$

где $a_{ev} = 1$, когда линия e является исходящей из узла v , в противном случае 0; $b_{ev} = 1$, если линия e заканчивается на узле v , 0 в противном случае; s_d – узел-источник для требования d ; t_d – конечный узел для требования d ; e обозначает соединительные линии (ребра графа), $e = 1, 2, 3, \dots, E$; d – номер потока трафика между парой узлов, $d = 1, 2, 3, \dots, D$.

Кроме правила сохранения потоков необходимо также, чтобы общая сумма долей всех потоков на данной линии не превышала ее пропускной способности [6]:

$$\sum_d x_{ed} \leq c_e. \quad (2)$$

Для решения задачи распределения мультипродуктовых потоков необходимо найти переменные, которые, во-первых, удовлетворяли бы

всем выше представленным ограничениям, а во-вторых, отвечали бы дополнительному критерию оптимальности, в качестве которого наиболее часто при оптимизации сетей используется минимизация общей стоимости пропускной способности используемых линий [6]:

$$\min F = \sum_e \xi_e y_e, \quad (3)$$

где ξ_e – стоимость использования единицы пропускной способности линии e ; y_e – используемая пропускная способность линии e за счет передачи всех потоков.

Задача распределения мультипродуктовых потоков, выраженная при помощи (1) - (3), применима только к ориентированным сетевым графам и неявно подразумевает использование всех возможных путей передачи трафика по сети между узлом-источником и узлом-окончанием для заданного потока. Для практических задач такая формулировка не всегда является удобной, поскольку часть путей в сети может быть по каким-либо причинам недоступной или нежелательной для использования. В этом случае необходимо введение дополнительных условий, которые каким-либо образом ограничивают использование части путей.

Альтернативой формой задачи распределения потоков является использование формулировки, явно выраженной через пути передачи между узлами. В ней переменная – это часть потока, приписанная для заранее определенного пути между узлами, для которых определен общий поток. Соответственно, x_{dp} – доля потока d , приписанная к пути p . В такой формулировке правило сохранения потоков (1) меняется на условие [9]:

$$\sum_p x_{dp} = h_d, \quad (4)$$

где $p = 1, 2, 3, \dots, P$ – номер пути, реализующего поток d . Ограничение для пропускной способности линий при данной формулировке имеет вид:

$$\sum_d \sum_p \delta_{epd} x_{dp} \leq c_e, \quad (5)$$

где $\delta_{epd} = 1$ в том случае, если линия e является частью пути p для потока d .

При выражении потоков через пути их передачи предполагается симметрия исходящего и входящего потоков в обоих направлениях, что позволяет использовать данную формулировку для неориентированных графов. В связи с этим переменные, реализующие потоки, должны быть

неотрицательными по величине, что вводит дополнительное ограничение: $x_{dp} \geq 0$.

Для решения задачи распределения потоков, выраженной посредством (4)-(5), необходимо на первом этапе получить набор путей для реализации передачи потоков между конечными узлами, а затем найти решение в виде вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_D)$, распределяющего потоки по заданным путям [9]. Поскольку для оптимизации резервирования в пакетных сетях предполагается вначале определить пути передачи трафика между узлами, то формулировка задачи оптимизации посредством путей представляется наиболее удобной для использования с целью повышения эффективности технологии резервирования.

Задача оптимального распределения мультипродуктовых потоков при резервировании представляет собой систему линейных уравнений и неравенств и поэтому может быть решена методами линейного программирования.

Одним из основных алгоритмов решения задач линейного программирования является симплекс-метод, основанный на переборе базисных решений, который был предложен Г. Данцигом в 1947 году. Алгоритм начинает с некоторого базисного решения и пытается улучшить значение целевой функции путем замены одной базисной переменной на другую. Алгоритм завершается, если значение целевой функции является оптимальным при данных ограничениях.

В общем случае симплекс-метод позволяет решить задачу за полиномиальное время, однако при использовании специальных методов подбора начальных значений время работы данного алгоритма может быть значительно ускорено [7; 9]. Для решения задач линейного программирования было разработано большое число программного обеспечения (ПО). К наиболее известным относятся такие пакеты, как *Ipsolve*, *CPLEX*, *Gurobi*, *XPRESS*, *Optimization Toolbox* для *MATLAB* [9].

Методика оптимизации резервирования в пакетных сетях

Для оптимизации технологии резервирования в коммутируемых пакетных сетях предлагается методика, которую можно представить в виде последовательности следующих действий.

1. На основе общих требований к сети или путем сбора статистики определяются требования по передаче трафика между конечными коммутаторами.

2. На основе множества неэквивалентных остовных деревьев кратчайших путей рассчитываются все доступные пути между конечными

коммутаторами, агрегирующими пользовательский трафик.

3. Подбирается критерий оптимальности и при помощи какого-либо пакета оптимизационных программ рассчитываются величины потоков трафика для доступных путей между конечными коммутаторами.

4. На основе значений переменных для найденного оптимума производится конфигурация сетевого оборудования, на котором должны работать усовершенствованные протоколы резервирования.

5. В том случае, если оптимальное решение не найдено, рассматривается возможность внесения изменений в топологию сети или замена оборудования на более производительное. После внесения изменений повторяются действия 2-5.

В качестве примера практической реализации предложенной методики оптимизации технологии резервирования рассмотрим сеть, представленную на рис. 3. Рассматриваемая сеть состоит из восьми коммутаторов, из которых коммутаторы S0 - S3 являются транзитными, а коммутаторы S4 - S7 представляют собой конечные коммутаторы. Пропускная способность соединительных линий, выраженная условно в Гбит/с, указана на рис. 3. Стоимость линий при расчете деревьев кратчайших путей указана на рис. 1.

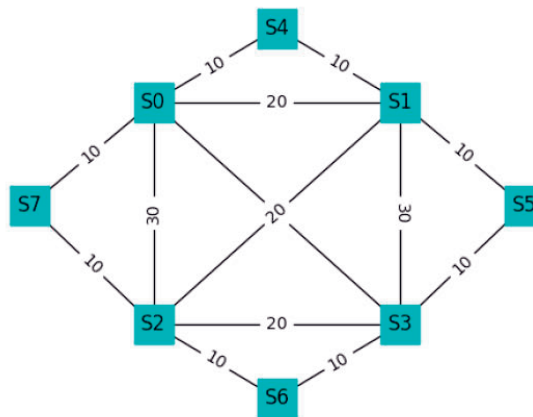


Рис. 3. Пример оптимизируемой сети

Имена переменных, соответствующих формулировке (3) - (5), и критерия оптимальности (2), задаются в виде: X_(коммутатор 1)_(коммутатор 2)_(номер пути). Поскольку в рассматриваемом примере число узлов и линий в сети небольшое, и, соответственно, число переменных будет невелико, то для решения данной задачи предлагается использовать свободный пакет оптимизации *Ipsolve*. Полученное решение представлено в таблице 2.

Таблица 2. Решение для примера реализации предложенной методики оптимизации технологии резервирования

Переменная	Скорость потока, Гбит/с
X_S4_S5_P1	3,0
X_S4_S5_P2	7,0
X_S4_S5_P3	0
X_S4_S5_P4	0
X_S4_S6_P1	4,0
X_S4_S6_P2	3,0
X_S4_S7_P1	3,0
X_S4_S7_P2	0
X_S4_S7_P3	0
X_S4_S7_P4	0
X_S5_S6_P1	0
X_S5_S6_P2	0
X_S5_S6_P3	0
X_S5_S6_P4	6,0
X_S5_S7_P1	1,0
X_S5_S7_P2	3,0
X_S6_S7_P1	0
X_S6_S7_P2	0
X_S6_S7_P3	6,0
X_S6_S7_P4	0

Из представленных в таблице 2 данных можно заключить, что для достижения минимальной стоимости необходимо разделить требуемый трафик 10 Гбит/с между коммутаторами S4 и S5 на два потока: первый поток со скоростью 3 Гбит/с направить по пути с номером 0, а второй со скоростью 7 Гбит/с по пути с номером 1. Трафик между коммутаторами S4 и S6 7 Гбит/с необходимо так же разделить на два потока: первый со скоростью 4 Гбит/с направить по пути с номером 0, а второй поток со скоростью 3 Гбит/с направить по пути 1. Весь трафик между коммутаторами S4 и S7 со скоростью 3 Гбит/с необходимо направить по пути 0. Весь трафик между коммутаторами S5 и S6 необходимо направить по пути 3. Трафик

между коммутаторами S5 и S6 должен быть разделен на два потока в 1 Гбит/с (путь 0) и 3 Гбит/с (путь 1). Весь трафик между коммутаторами S4 и S7 должен быть направлен по пути 2.

Заключение

Предложена методика оптимизации резервирования в пакетных сетях, основанная на использовании неэквивалентных остовных деревьев графов для определения путей передачи пакетов, а также оптимизации передаваемого трафика. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных протоколов резервирования.

Литература

1. Froom R., Frahm E. Implementing Cisco IP Switched Networks (SWITCH) Foundation Learning Guide. Cisco Press, 2015. – 512 p.
2. Van der Pol R. TRILL and IEEE 802.1aq Overview. Available at: <https://kirk.rvdp.org/publications/TRILL-SPB.pdf> (д.о. 22.05.2017)
3. Permal R., Eastlake D. Introduction to TRILL. / The Internet Protocol Journal. Vol. 14, №3, 2011. – P. 2-20.
4. Fedyk D., Seaman M. 802.1aq - Shortest Path Bridging // URL: <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1aq.html> (д.о. 05.09.2017).
5. Уилсон Р. Введение в теорию графов. Пер. с англ. М.: Мир, 1977. – 208 с.
6. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. – 432 с.
7. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2013. – 1328 с.
8. Haggarti R. Discrete Mathematics for computing. Pearson, 2001. – 248 p.
9. Deepankar Medhi, Michal Pioro. Routing, Flow and Capacity Design in Communication and Computer Networks. Elsevier, 2004. – 765 p.
10. Berkelaar M., Dirks J., Eikland K., Notebaer P. Ip_solve reference guide menu // URL: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/> (д.о. 01.06.2017).

Получено 15.09.2017

Трошин Александр Викторович, к.т.н., доцент Кафедры систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. (8-846) 339-11-26. E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru

REDUNDANCY OPTIMIZATION FOR PACKET-SWITCHED NETWORKS

Troshin A.V.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia Federation

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

Traditional protocols that are often used for providing redundancy in modern packet-switched networks (Spanning Tree Protocol, Rapid Spanning Tree Protocol, Multiple Spanning Tree Protocol) are very inefficient because they prune links from the network topology in order to achieve a single spanning tree topology. In this paper a method of redundancy optimization for packet-switched networks is presented, based on using non-equal spanning trees of the network graph in order to resolve paths of packets between the switches. The use of non-equal spanning trees enables to get more paths for traffic balancing. Moreover, a proposition is made to connect making of spanning trees with the role of network switch. After that the balancing of network traffic can be optimized by linear programming methods. A practical example of optimization redundancy is shown.

Keywords: packet-switched networks, redundancy, spanning trees, switches, network optimization, linear programming

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.4.06

Troshin Alexander Victotovich, Povolzhsky State University of Telecommunication and Informatics, 23 Lev Tolstoy str., Samara 443010, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Communication Systems; PhD in Technical Sciences, Associate Professor. Tel.: +78463391126. E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru

References

1. Froom R., Frahim E. *Implementing Cisco IP Switched Networks (SWITCH) Foundation Learning Guide*. Cisco Press, 2015. 512 p.
2. Ronald van der Pol. TRILL and IEEE 802.1aq Overview. Available at: <https://kirk.rvdp.org/publications/TRILL-SPB.pdf> (accessed 22.05.2017)
3. Permal R., Eastlake D. Introduction to TRILL. *The Internet Protocol Journal*, 2011, vol. 14, no. 3 pp. 2-20.
4. Fedyk D., Seaman M. 802.1aq - Shortest Path Bridging. Available at: <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1aq.html> (accessed 5.09.2017)
5. Wilson R.J. *Introduction to Graph Theory. Forth Edition*. Longman, 1996. 172 p.
6. Christofides N. *Graph Theory. An Algorithmic Approach*. Academic Press Inc., 1975. 415 p.
7. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms. 3rd edition*. The MIT Press, 2009. – 1292 p.
8. Haggarti R. *Discrete Mathematics for computing*. Pearson, 2001. 248 p.
9. Deepankar Medhi, Michal Pioro. *Routing, Flow and Capacity Design in Communication and Computer Networks*. Elsevier, 2004. 765 p.
10. Berkelaar M., Dirks J., Eikland K., Notebaer P. Ip_solve reference guide menu. Available at: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/> (accessed 01.06.2017).

Received 15.09.2017

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

УДК 004.03

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ $N_2/M/1$

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Карташевский И.В., Литилина Л.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

В данной статье представлены сравнительные результаты зарубежных и авторских публикаций по системам G/M/1, и в частности системе $N_2/M/1$ по определению среднего времени ожидания. При этом рассматриваемые результаты получены совершенно разными подходами к исследованию рассматриваемых систем, но конечные расчетные результаты полностью идентичны. Оба подхода имеют те или иные преимущества друг перед другом.