

Исследование качества цифровой сети подвижной радиосвязи железнодорожного транспорта методом анализа иерархии

М. Ф. Гуськова, Ю. В. Немцов✉

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия
✉ rut1408@mail.ru

Аннотация. Предлагается новый подход к оценке качества сети цифровой радиосвязи железнодорожного транспорта. Описаны элементы метода анализа иерархий: влияющие факторы (критерии) и весовые коэффициенты. Обоснован выбор значений критериев. Для предложенного расчета учтены недостатки, присущие данному методу исследования. В примере рассмотрены архитектуры сетей стандарта GSM-R. По мнению авторов, полученная оценка позволяет получить более объективную характеристику качества, которую можно использовать как для проектирования новых, так и для эксплуатации существующих сетей подвижной радиосвязи. В условиях ограниченных финансовых возможностей данный расчет поможет найти компромисс между излишней избыточностью элементов и сохранением требуемого значения надежности сети радиосвязи.

Ключевые слова: метод анализа иерархии, сеть подвижной связи, радиосвязь на железнодорожном транспорте, надежность сети связи, качество радиопокрытия

Для цитирования: Гуськова М. Ф., Немцов Ю. В. Исследование качества цифровой сети подвижной радиосвязи железнодорожного транспорта методом анализа иерархии // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 1. С. 48–54. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-1-48-54.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Digital mobile communication network quality research on railway by method of hierarchy analysis

M. F. Guskova, Yu. V. Nemtsov✉

Russian University of Transport, Moscow, Russia
✉ rut1408@mail.ru

Abstract. The article proposes a new approach to assessing the quality of the digital radio network of railway transport. The elements of the hierarchy analysis method describe such as influencing factors (criteria) and weight coefficients. The choice of criteria values is justified. For proposed calculation, the disadvantages peculiar method take into account in this research. For example, the architectures of GSM-R networks are considered. According to authors, the assessment obtained provides a more objective quality characteristic, which can be used both for the design of new and operated mobile radio networks. In conditions of limited financial possibilities, this calculation will help to find a compromise between excessive redundancy of elements and maintaining the required reliability of radio network.

Keywords: hierarchy analysis method, mobile communication network, radio communication in railway transport, reliability of the communication network, quality of radio coverage

For citation: Guskova M. F., Nemtsov Y. V. Digital mobile communication network quality research on railway by method of hierarchy analysis // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no 1. P. 48–54. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-1-48-54.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Сеть подвижной радиосвязи используется для обеспечения безопасности движения поездов и обеспечения технологических процессов железнодорожных организаций. Экспертами Комиссии Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) разработаны Рекомендации по внедрению цифровой радиосвязи на железнодорожном транспорте стандарта GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway) [1]. Данный

стандарт является продолжением стандарта подвижной радиосвязи GSM и представляет собой наиболее популярный способ коммуникации между подвижным составом и наземной инфраструктурой на железнодорожном транспорте. Его функционал и применение подробно описаны в [2].

Из Рекомендаций [1] рассмотрим архитектуры сетей (рис. 1–4). Сеть подвижной радиосвязи стандарта GSM-R состоит из контроллера базо-

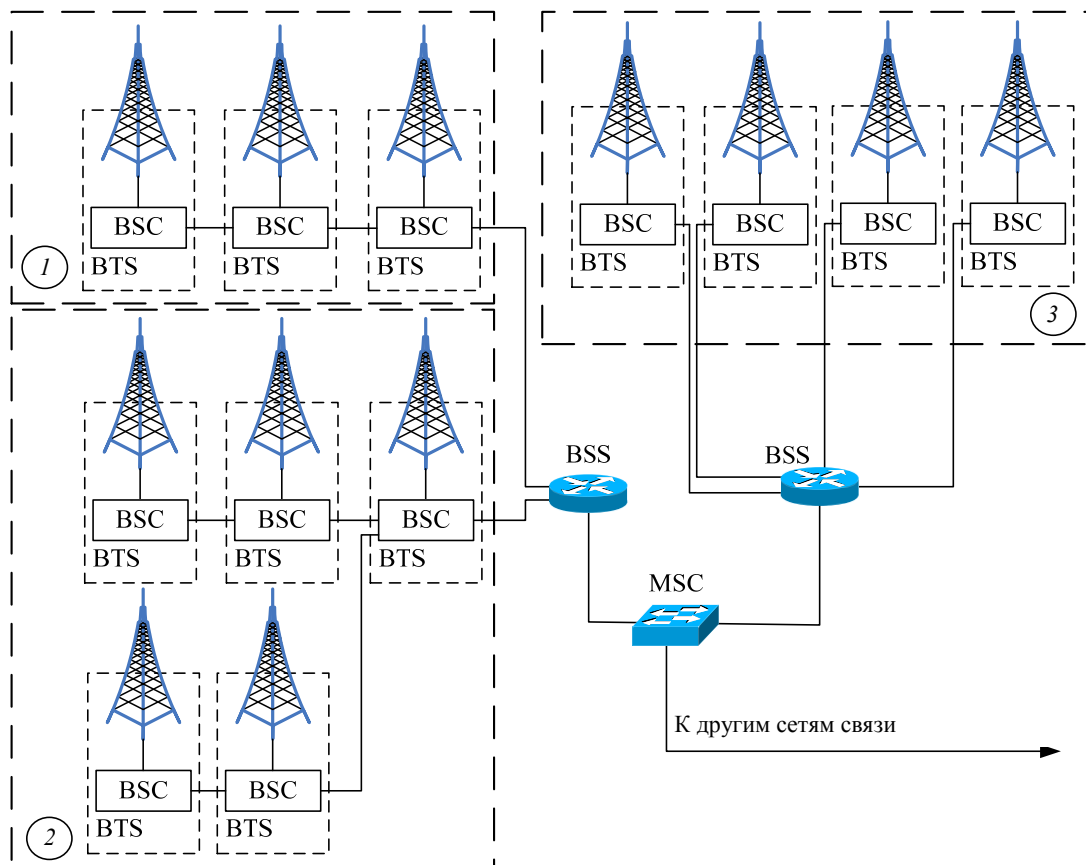


Рис. 1. Базовые архитектуры сети стандарта GSM-R: 1 – последовательное соединение БС; 2 – последовательное-радиальное соединение БС; 3 – радиальное соединение БС
 Fig. 1. Basic GSM-R network architecture: 1 – serial connection of base stations; 2 – serial-radial connection of base stations; 3 – radial connection of base stations

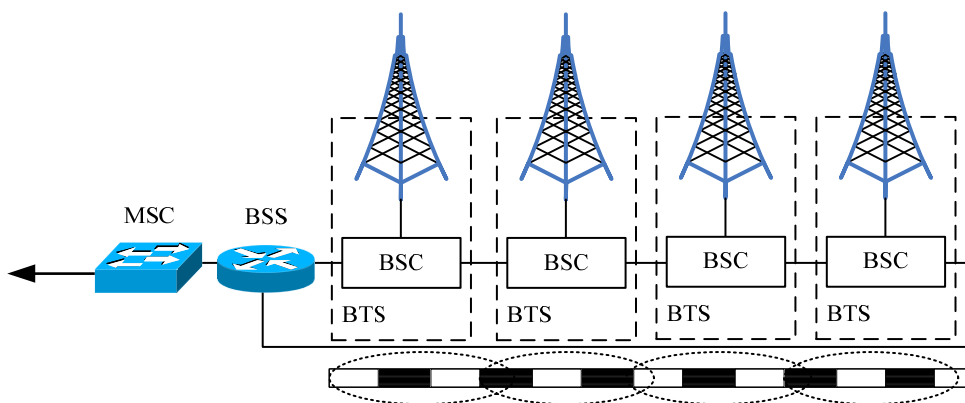


Рис. 2. Архитектура сети при кольцевом соединении БС и с частичным резервированием зон радиопокрытия.
 Fig. 2. Network architecture with ring connection of base stations and partial redundancy of radio coverage zones

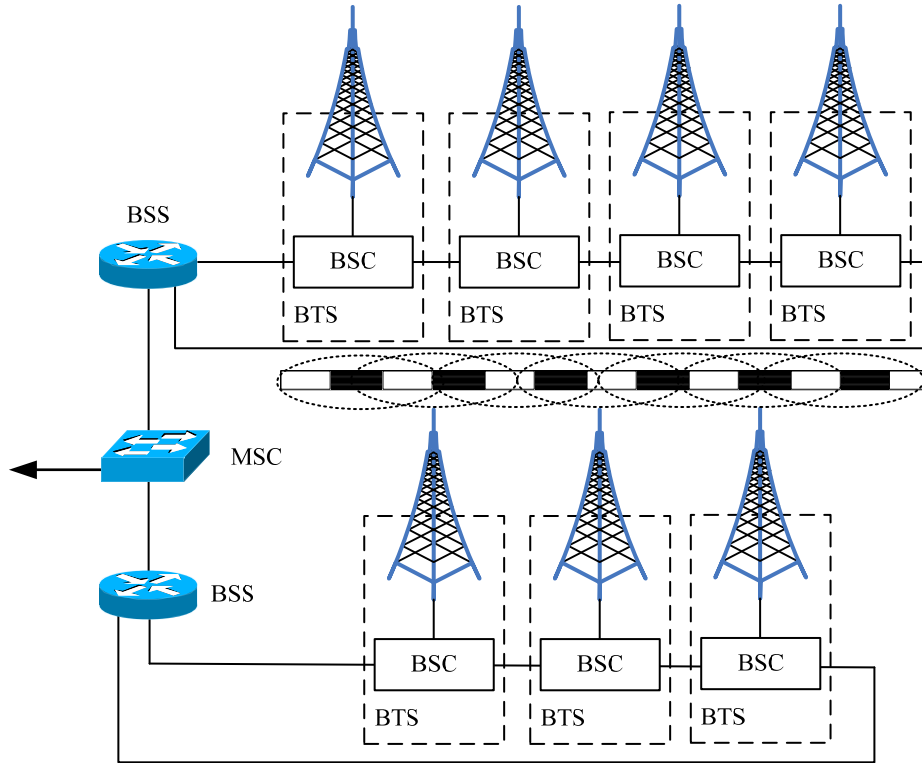


Рис. 3. Архитектура сети при двух кольцевых соединениях БС и с чередованием зон радиопокрытия
 Fig. 3. Network architecture with two ring connections of base stations and alternating radio coverage zones

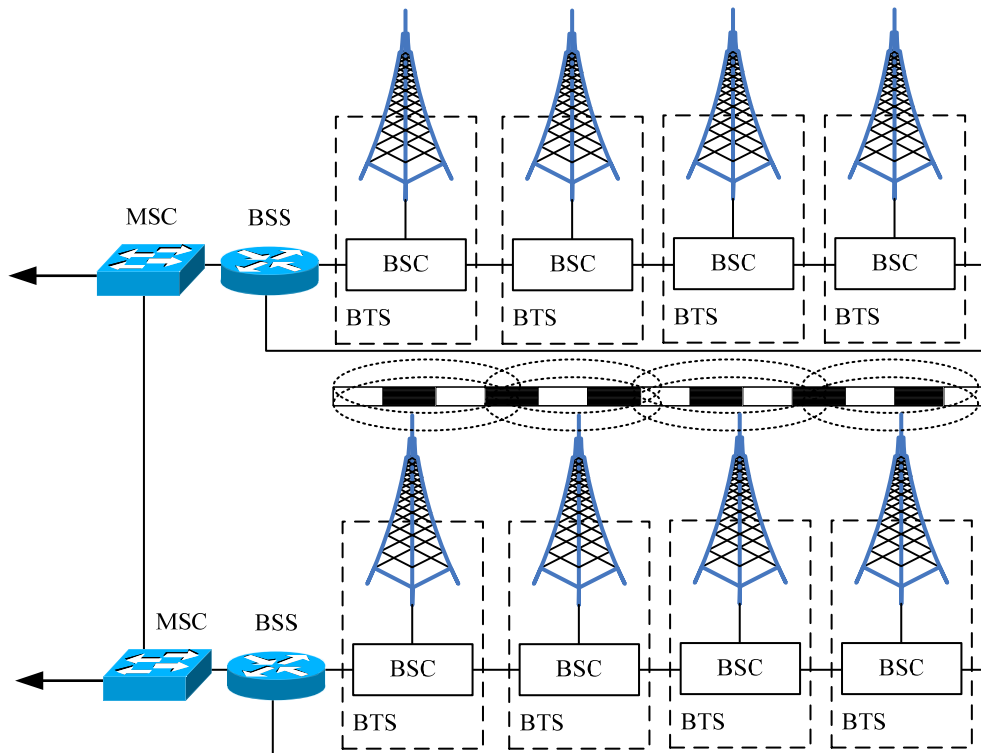


Рис. 4. Архитектура сети при двух независимых петлях БС с кольцевым соединением и полным резервированием зон радиопокрытия
 Fig. 4. Network architecture with two independent loops of base stations with a ring connection and full redundancy of radio coverage zones

вой станции (БС) BSC, подсистемы БС BSS (Base Station System) – оборудования БС, в свою очередь состоящей из контроллера БС BSC (Base

Station Controller) и приемо-передающих БС BTS (Base Transceiver Station). Контроллер БС может управлять несколькими приемо-передающими

блоками. Центр коммутации подвижной связи MSC взаимодействует со всеми элементами BSS сети, обслуживает группу сот и обеспечивает все виды соединений, в которых нуждается в процессе работы подвижная станция. Также MSC осуществляет связь между сетью подвижной связи и фиксированными сетями, ремонтно-оперативной радиосвязью (РОРС), сетями связи соседних железных дорог. На рис. 1 представлены архитектуры сетей без резервирования радиопокрытия или элементов сети, а на рис. 2–4 – с таким резервированием.

В качестве метода принятия решения и выбора наилучшей альтернативы среди нескольких архитектур сети предлагается использовать метод аналитической иерархии (МАИ). Данный метод широко используется при проведении исследований экономических, социальных, природных и техногенных систем [3]. Описание МАИ приводится в [4]: после постановки задачи выполняется попарное сравнение критериев, вычисляются их коэффициенты важности, оценки альтернатив и находится общая оценка как взвешенная сумма оценок критериев. Отмечается [3], [4], что при

многих достоинствах МАИ основными его недостатками являются качество работы эксперта, а также произвольный переход от качественной исходной информации к количественным оценкам. Решение этой проблемы будем представлено ниже в процессе попарного сравнения альтернатив.

В данном исследовании под качеством цифровой сети подвижной радиосвязи железнодорожного транспорта будем понимать количественную и комплексную оценку качества каждой из альтернатив. Определим три основных критерия для выполняемого расчета: коэффициент готовности сети подвижной связи k_r (критерий z_1), коэффициент резервирования радиопокрытия $k_{p,p}$ (критерий z_2), коэффициент резервирования пути (линий и оборудования связи) $k_{p,п}$ (критерий z_3). Множество альтернатив $x = \{x_1, \dots, x_6\}$ будет состоять из следующих вариантов: x_1 – последовательное соединение БС; x_2 – последовательное-радиальное соединение БС; x_3 – радиальное соединение БС; x_4 – кольцевое соединение БС и

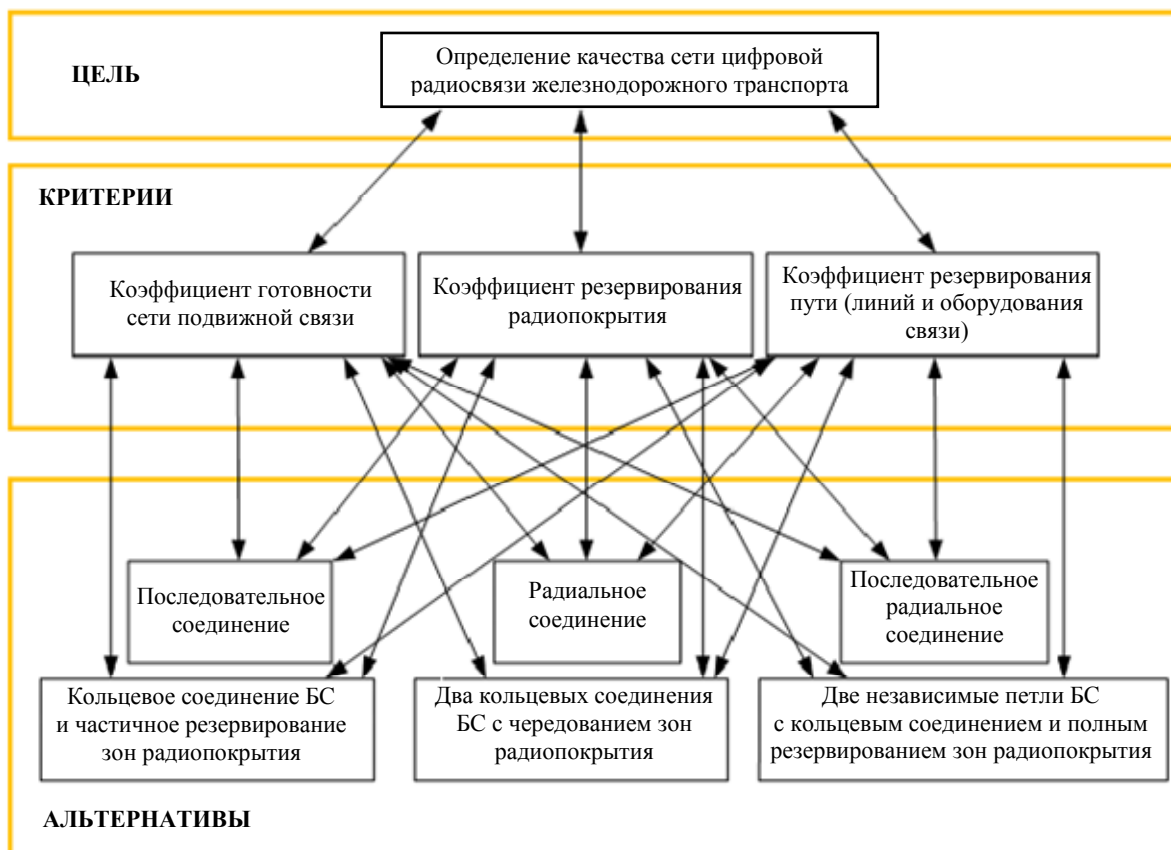


Рис. 5. Иерархическое дерево цели, критериев и альтернатив

Fig. 5. Hierarchical tree of purpose, criteria, and alternatives

частичное резервирование зон радиопокрытия; x_5 – два кольцевых соединения БС и чередование зон радиопокрытия; x_6 – две независимые петли БС с кольцевым соединением и полным резервированием зон радиопокрытия.

Структуру решаемой задачи представим в виде иерархического дерева критериев и альтернатив (рис. 5). Проведем решение задачи согласно алгоритму [5].

Для начала подробнее рассмотрим заданные критерии.

1. Коэффициент готовности сети подвижной связи k_r . Данная величина – это один из основных атрибутов надежности, определяющий вероятность оказания услуги момент времени t [6], [7]. Как правило, в нормативных документах организации присутствуют методика расчета коэффициента готовности и требуемые значения. Также возможен самостоятельный расчет с использованием показателей интенсивностей отказов и восстановления элементов БС [8].

2. Коэффициент резервирования радиопокрытия. Рассчитаем по формуле $k_{p,p} = \frac{r_{\Pi}}{r_{\text{БС}}}$, где $r_{\text{БС}}$ – радиус действия БС; r_{Π} – радиус перекрытия соседними БС.

3. Коэффициент резервирования пути (линий и оборудования связи). Рассчитаем по формуле $k_{p,\Pi} = \frac{n_1}{n}$, где n – количество линий и оборудования для функционирования сети радиосвязи без учета избыточности; n_1 – общее количество линий и оборудования для рассматриваемой архитектуры сети.

По рис. 1–4 определим для каждой альтернативы значения z_2 и z_3 . Например, в альтернативе x_1 не предусмотрено какое-либо резервирование, поэтому $x_1(k_{p,p}) = 0$ и $x_1(k_{p,\Pi}) = 0$. Аналогичным образом определим значения для остальных альтернатив. Результаты анализа различных архитектур представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Матрица значений для критериев $k_{p,p}$ и $k_{p,\Pi}$ каждой альтернативы
Matrix of values for the c_{rr} and c_{rp} criteria for each alternative

Альтернатива	$k_{p,p}$	$k_{p,\Pi}$	Альтернатива	$k_{p,p}$	$k_{p,\Pi}$
x_1	0	0	x_4	0.2	0.5
x_2	0	0.1	x_5	1	0.8
x_3	0	0.2	x_6	1	1

Далее выполним попарные сравнения критериев z_1 , z_2 и z_3 , используя качественную шкалу [5] с последующей балльной интерпретацией: равная важность = 1, умеренное превосходство (хуже) = 3 (1/3), лучше (хуже) = 5 (1/5), значительно лучше (хуже) = 7 (1/7), принципиально лучше (хуже) = 9 (1/9).

Критерий z_1 считается основополагающим на этапах проектирования и эксплуатации любых сетей связи, поэтому он имеет большое превосходство над другими критериями. Фиксацией данного критерия мы устраняем недостаток, свойственный для МАИ. Отметим, что критерии не противоречивы, но z_1 имеет прямую зависимость от z_3 , поскольку коэффициент готовности прямо пропорционально зависит от избыточности линий и оборудования связи. Поэтому при попарном сравнении альтернативы z_1 с z_2 будет иметь количественное значение, равное 7, а по сравнению с z_3 – равное 3. Коэффициент резервирования радиопокрытия имеет больший уровень важности, чем коэффициент резервирования пути (линий и оборудования связи), поэтому $z_2/z_3 = 5$.

Полученные значения внесем в табл. 2. Собственный вектор рассчитывается извлечением корня третьей степени (размерности матрицы сравнений) из произведения элементов каждой строки. Весовой вектор показывает отношение собственного вектора критерия к сумме всех векторов.

Таблица 2
Table 2

Матрица попарных сравнений критериев, их собственные и весовые векторы
Matrix of pairwise comparisons of criteria, their proper vectors and weight vectors

Критерий	z_1	z_2	z_3	Собственный вектор	Весовой вектор
z_1	1	7	3	2.75892	0.6798
z_2	1/7	1	5	0.89390	0.2203
z_3	1/3	1/5	1	0.40548	0.0999

На следующем этапе построим матрицу сравнений уровней важности, выполнив попарное сравнение каждой альтернативы с другими по заданному критерию. Рассчитаем собственные и весовые векторы, как для табл. 2. Результат представлен в табл. 3.

На конечном этапе вычисляем количественную оценку качества каждой альтернативы. Сумма произведений весовых векторов уровней важности и альтернатив даст искомую величину. Наилучшей альтернативой будет та, у которой оценка качества максимальна:

Таблица 3
 Table 3

Матрица сравнений уровней важности альтернатив по отдельным критериям, их собственные и весовые векторы
 Matrix of comparisons of the importance levels of alternatives by individual criteria, their proper vectors and weight vectors

Альтернатива	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Собственный вектор	Весовой вектор
Критерий z_1								
x_1	1	1	1/3	1/5	1/7	1/9	1.18631	0.133
x_2	1	1	1/3	1/5	1/7	1/9	1.18631	0.133
x_3	3	3	1	1/5	1/7	1/9	1.39765	0.1567
x_4	5	5	5	1	1/5	1/5	1.59395	0.1788
x_5	7	7	7	5	1	1/3	1.7356	0.1946
x_6	9	9	9	5	3	1	1.81712	0.2038
Критерий z_2								
x_1	1	1	1/7	1/9	1/9	1/9	1.16314	0.1353
x_2	1	1	1/7	1/9	1/9	1/9	1.16314	0.1353
x_3	1	1	1/7	1/9	1/9	1/9	1.16314	0.1353
x_4	3	3	3	1	1/7	1/7	1.47471	0.1715
x_5	9	9	9	7	1	1	1.81712	0.2113
x_6	9	9	9	7	1	1	1.81712	0.2113
Критерий z_3								
x_1	1	1/3	1/3	1/5	1/7	1/9	1.13347	0.1286
x_2	3	1	1	1/3	1/5	1/7	1.3356	0.1515
x_3	3	1	1	1/3	1/5	1/7	1.3356	0.1515
x_4	5	3	3	1	1/5	1/7	1.52021	0.1725
x_5	7	5	5	5	1	1/3	1.69043	0.1918

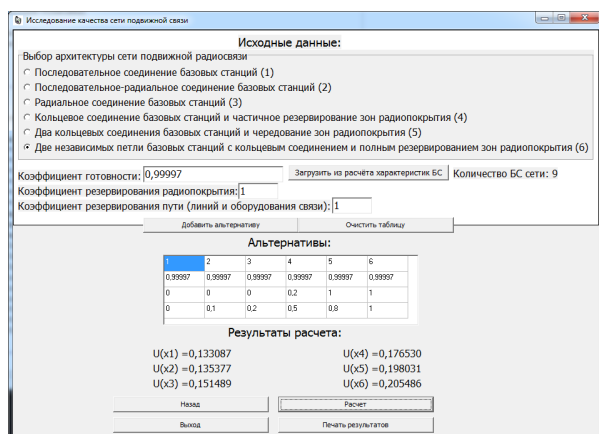


Рис. 6. Форма программы для расчета качества сети
 Fig. 6. The form of program for calculating the quality of network

$U(x_1) = 0.133087$; $U(x_2) = 0.135377$; $U(x_3) = 0.151489$; $U(x_4) = 0.17653$; $U(x_5) = 0.198031$; $U(x_6) = 0.205486$.

Очевидно, что из всех предложенных альтернатив последняя архитектура при двух независимых петлях БС с кольцевым соединением и полным резервированием зон радиопокрытия (см. рис. 4) будет наилучшей по сравнению с другими, но при ограниченных финансовых ресурсах

можно выбрать другую подходящую альтернативу, соответствующую исходным требованиям.

Решение поставленной задачи представляется возможным с помощью среды быстрой разработки приложений C++ Builder 6. Форма программы представлена на рис. 6.

Сделаем следующие выводы. Научная новизна предложенного расчета заключается в синтезе МАИ как инструмента системного подхода и классических теорий надежности и вероятности. Практическая значимость данного исследования состоит в повышении качества сети подвижной радиосвязи, а также в простом и гибком нахождении компромисса между несколькими критериями. Рассмотренный подход будет удобен при сравнении показателей качества различных архитектур сети. При этом альтернативы без резервирования (см. рис. 1) не рассматриваются, а добавляются альтернативы, имеющие коэффициенты резервирования. Также можно повысить объективность расчета качества, добавив еще один критерий – коэффициент живучести сети подвижной связи. Данный показатель определяет долю линий и оборудования связи, сохранивших выполнение своих функций после возникновения нештатной ситуации.

Список литературы

1. Рекомендации по внедрению цифровой технологической радиосвязи на железнодорожном транспорте стандарта GSM-R. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/1785> (дата обращения 10.10.21).
2. Шнепс-Шнеппе М. А., Куприяновский В. П. Мобильная сеть GSM-R – основа цифровой железной дороги // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. Т. 12, № 1. С. 222–231.
3. Коробов В. Б., Тutyгин А. Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий // Изв. РГПУ им. А. И. Герцена. 2010, № 122. С. 108–115.
4. Рыков А. С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. 608 с.
5. Шевченко Д. В. Метод анализа иерархий. URL: www.ieml-math.narod.ru/lect/MPUR_MAI.pdf (дата обращения 21.10.21).
6. Шувалов В. П., Егунов М. М., Минина Е. А. Обеспечение показателей надежности телекоммуникационных систем и сетей. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 168 с.
7. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. // под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
8. Немцов Ю. В., Серёгин И. В., Вольнов П. И. Работоспособность базовых станций в цифровых сетях радиосвязи железнодорожного транспорта // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 2 (93). С. 41–48. doi: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-2-6>.

Информация об авторах

Гуськова Марина Федоровна – профессор, д-р. экон. наук, Российский университет транспорта (МИИТ).

E-mail: oet2004@yandex.ru

Немцов Юрий Владимирович – аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ).

E-mail: rut1408@mail.ru

References

1. Rekomendacii po vnedreniju cifrovoj tehnologicheskoj radiosvjazi na zheleznodorozhnom transporte standarta GSM-R. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/1785> (accessed: 10.10.21). (In Russ.).
2. Shneps-Shneppe M. A., Kuprijanovskij V. P. Mobil'naja set' GSM-R – osnova cifrovoj zheleznoj dorogi // Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie. 2016. T. 12, № 1. S. 222–231. (In Russ.).
3. Korobov V. B., Tutygin A. G. Preimushhestva i nedostatki metoda analiza ierarhij // Izvestija Rossijskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A. I. Gercena. 2010, № 122. S. 108–115. (In Russ.).
4. Rykov A. S. Sistemnyj analiz: modeli i metody printatija reshenij i poiskovoj optimizacii. M.: Izdatel'skij Dom MISiS, 2009. 608 s. (In Russ.).
5. Shevchenko D. V. Metod analiza ierarhij. URL: www.ieml-math.narod.ru/lect/MPUR_MAI.pdf (accessed: 21.10.21). (In Russ.).
6. Shuvalov V. P., Egunov M. M., Minina E. A. Obespechenie pokazatelej nadezhnosti telekommunikacionnyh sistem i setej. M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2016. 168 s. (In Russ.).
7. Beljaev Ju. K., Bogatyrev V. A., Bolotin V. V. i dr. Nadezhnost' tehniceskikh sistem: Spravochnik / Pod red. I. A. Ushakova. M.: Radio i svjaz', 1985. 608 s. (In Russ.).
8. Nemcov Ju. V., Serjogin I. V., Vol'nov P. I. Rabotosposobnost' bazovyh stancij v cifrovyh setjah radiosvjazi zheleznodorozhnogo transporta // Mir transporta. 2021. T. 19, № 2 (93). S. 41–48. doi: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-2-6>. (In Russ.).

Information about the authors

Marina F. Guskova, Professor, Ph. D. (Econ.), Federal state Autonomous educational institution of higher education «Russian University of transport».

E-mail: oet2004@yandex.ru

Yuriy V. Nemtsov, Postgraduate, Federal state Autonomous educational institution of higher education «Russian University of transport».

E-mail: oet2004@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14.12.2021; принята к публикации после рецензирования 22.12.2021; опубликована онлайн 30.01.2022

Submitted 14.12.2021; accepted 22.12.2021; published online 30.01.2022
