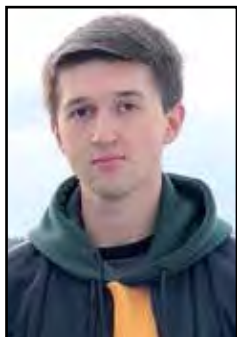




Работоспособность базовых станций в цифровых сетях радиосвязи железнодорожного транспорта



Юрий НЕМЦОВ



Игорь СЕРЁГИН



Пётр ВОЛЬНОВ

Юрий Владимирович Немцов¹, Игорь Витальевич Серёгин², Пётр Игоревич Вольнов³

^{1,2,3} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

✉ ¹ rut1408@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Базовая станция (БС) является окончательным устройством сети радиосвязи, а радиосвязь на железнодорожном транспорте играет важную роль в обеспечении безопасности перевозок пассажиров и грузов.

Предлагается методика расчёта работоспособности базовых станций в цифровых сетях радиосвязи железнодорожного транспорта с целью рассчитать вероятности нахождения БС в определённых состояниях.

Произведена декомпозиция БС и выделены такие функциональные элементы, как пучки каналов связи, радиочастотный тракт и центральный модуль, обеспечивающий обмен информацией с элементами данной и других БС. Детально исследован каждый элемент, что повысило точность предлагаемой методики. В соответствии с Марковской моделью БС представлена как система, в которой учтены все возможные состояния. Построены мо-

дели для БС с двумя и тремя пучками каналов. Параметры каждого функционального элемента модели могут быть получены с помощью наблюдения в течение определённого периода времени. Решение системы уравнений для каждой из приведённых в статье моделей позволит получить значения нахождения системы в определённом состоянии. Полученные характеристики можно использовать для расчёта надёжности всей сети радиосвязи, а в итоге для оценки качества обслуживания абонентов этой сети.

Сделаны выводы о возможностях применения полученных моделей при проектировании новых и расчёте показателей качества существующих сетей связи железнодорожного транспорта. Предложенные модели могут применяться не только для сетей радиосвязи железнодорожного транспорта, но и для сетей подвижной связи коммерческих операторов.

Ключевые слова: цифровая сеть радиосвязи, телекоммуникационные системы железнодорожного транспорта, качество обслуживания вызовов, безопасность движения поездов.

Для цитирования: 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>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Радиосвязь как один из видов связи нашла широкое применение на железнодорожном транспорте. Первоначально она использовалась только для обмена речевой информацией между подвижными и стационарными абонентами. С учётом развития высокоскоростного движения, а также стремительного роста телекоммуникационных и информационных технологий, появления новых поколений мобильной связи функциональность радиосвязи стала заметно увеличиваться. Сейчас она используется для передачи телеметрической информации, автоматического управления подвижным составом (автоведение), видео-конференц-связи. По радиоканалам строятся новейшие системы интервального регулирования движением поездов (радиоблокировка), которые приходят на смену рельсовым цепям. Такие системы позиционирования описаны в [1].

Известен ряд работ [2; 3], в которых рассмотрены вопросы выбора наилучшего стандарта и топологии цифровой сети радиосвязи железнодорожного транспорта. Немаловажной работой в области эффективного использования элементов сети связи следует считать [4], а результаты измерений некоторых характеристик представлены в отчёте ITU-R [5]. Также в некоторых странах набирает популярность применение новейших технологий подвижной связи (например, LTE и 5G), которые подробно описаны в [4; 6].

На сети железных дорог Российской Федерации цифровые сети поездной радиосвязи организуются на базе стандартов TETRA, GSM-R или DMR, при этом должна обеспечиваться вероятность связи по месту и времени не менее 95 %¹, а значения коэффициента готовности сетей радиосвязи для высокоскоростного транспорта – на уровне не менее 99,95 % [7]. Поэтому в настоящее время вопросам стабильной и надёжной работы радиосвязи уделяется достаточное внимание. Они рассматриваются в [8; 9], а вопросы расчёта живучести цифровой сети радиосвязи описаны в [10].

При проектировании сети связи ставятся несколько задач: рассчитываются показатели

качества для каждого класса обслуживания абонентов при изменении нагрузки, структуры тяготения, пропускной способности каналов, а также при отказе компонентов сети; оцениваются загрузка оборудования и каналов связи, необходимость резервирования. Данные задачи решаются в результате моделирования и последующего системного анализа [11]. Предложенные в данном исследовании модели упростят нахождение некоторых характеристик сети связи.

Целью исследования является разработка методики расчёта работоспособности базовых станций в цифровых сетях радиосвязи железнодорожного транспорта и вероятности нахождения БС в определённых состояниях. Основным методом исследования являлось аналитическое моделирование, используемое в теории телетрафика при решении подобных задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим упрощённую схему цифровой сети радиосвязи железнодорожного транспорта на заданном участке железной дороги. Резервирование радиопокрытия отсутствует. Сеть радиосвязи содержит определённое количество базовых станций (БС), связанных между собой наземным каналом связи (рис. 1).

Схема соединения БС последовательная, так как согласно требованиям [5], они должны быть подключены к контроллеру БС (Base Station Controller, BSC) по принципу «пространственного кольца». Каждая антенна обслуживает определённый сектор соты. Все заявки на соединения от мобильных терминалов передаются от БС по каналам связи к BSC. Он подключает к работе требуемую БС, которая в свою очередь через канал радиосвязи подключает терминал вызываемого абонента. Радиопокрытие необходимой зоны обеспечивается через антенны каждого сектора.

Функциональная модель базовой станции цифровой сети радиосвязи представлена на рис. 2. Цифрами 1 и 2 обозначим радиочастотный тракт базовой станции (антенны, антенно-фидерные устройства и пр.) левого и правого секторов, цифрой 3 – модули коммутации, управления и соединений, обеспечивающие обмен информацией с другими базовыми станциями по пучкам каналов (цифры 4 и 5), а также взаимодействие с ра-

¹ ГОСТ Р 54959-2012. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. Дата введения: 1 апреля 2013 г. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200095030>. Доступ 12.01.2021.

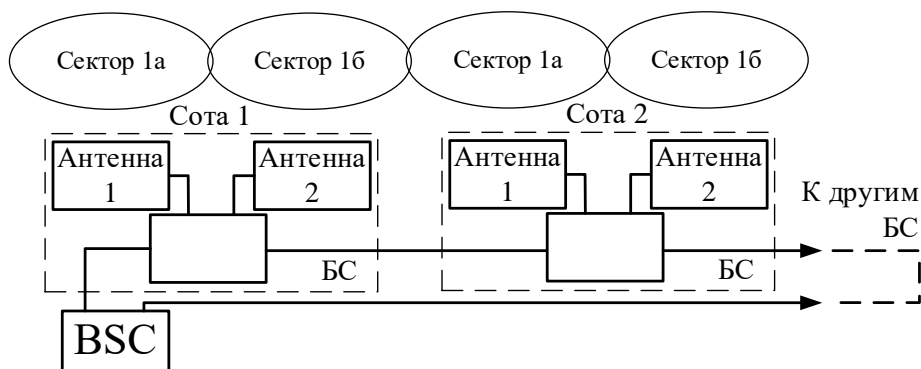


Рис. 1. Упрощённая схема цифровой сети радиосвязи железнодорожного транспорта (выполнена авторами).

диочастотным трактом. В дальнейшем для упрощения компонент 3 будем называть коммутатором.

Предлагается рассмотреть БС как систему с несколькими функциональными элементами. Для получения зависимостей нужных характеристик от всех параметров системы используют аналитическое моделирование, являющееся распространённым в теории телекоммуникаций при решении подобных задач. Описание и примеры некоторых моделей приведены в [12], а решение подобных задач описано в [13], в том числе применительно к отрасли железнодорожного транспорта [14].

Для нашей функциональной модели БС (рис. 2) построим граф возможных переходов между состояниями работоспособности (рис. 3). Зададим обозначениями λ интенсивность потока отказов каждого элемента модели, μ – интенсивность потока восстановления, P_i – вероятность нахождения системы в состоянии $i = \overline{[0, 10]}$.

Схема функционирования модели позволяет выделить десять дискретных состояний, в которых может находиться система:

0 – оба сектора базовой станции работоспособны, все пучки каналов исправны, коммутация выполняется;

1 – оба сектора базовой станции работоспособны, один из пучков каналов неисправен, коммутация выполняется;

2 – оба сектора базовой станции работоспособны, оба пучка каналов неисправны, коммутация выполняется;

3 – только один из секторов базовой станции работоспособен, все пучки каналов исправны, коммутация выполняется;

4 – только один из секторов базовой станции работоспособен, один из пучков каналов неисправен, коммутация выполняется;

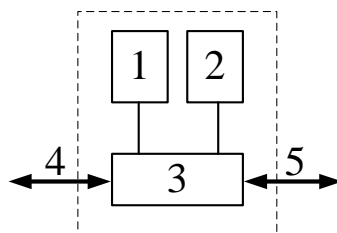


Рис. 2. Функциональная модель базовой станции с двумя секторами, двумя пучками каналов и коммутатором (выполнена авторами).

5 – только один из секторов базовой станции работоспособен, оба пучка каналов неисправны, коммутация выполняется;

6 – оба сектора базовой станции неработоспособны, все пучки каналов исправны, коммутация выполняется;

7 – оба сектора базовой станции неработоспособны, один из пучков каналов неисправен, коммутация выполняется;

8 – оба сектора базовой станции неработоспособны, оба пучка каналов неисправны, коммутация выполняется;

9 – оба сектора базовой станции работоспособны, все пучки каналов исправны, коммутация не выполняется;

10 – оба сектора базовой станции неработоспособны, все пучки каналов неисправны, коммутация не выполняется.

Состояние 0 свидетельствует о полной работоспособности системы. Состояния 1, 3 и 4 свидетельствуют о том, что базовая станция получила серьёзные повреждения, но функционирует по назначению с ухудшением качества обслуживания. При состояниях 2, 5–9 система считается неработоспособной даже при функционировании её отдельных компонентов. Конечное состояние 10 свидетельствует о полном отказе компонентов базовой станции.



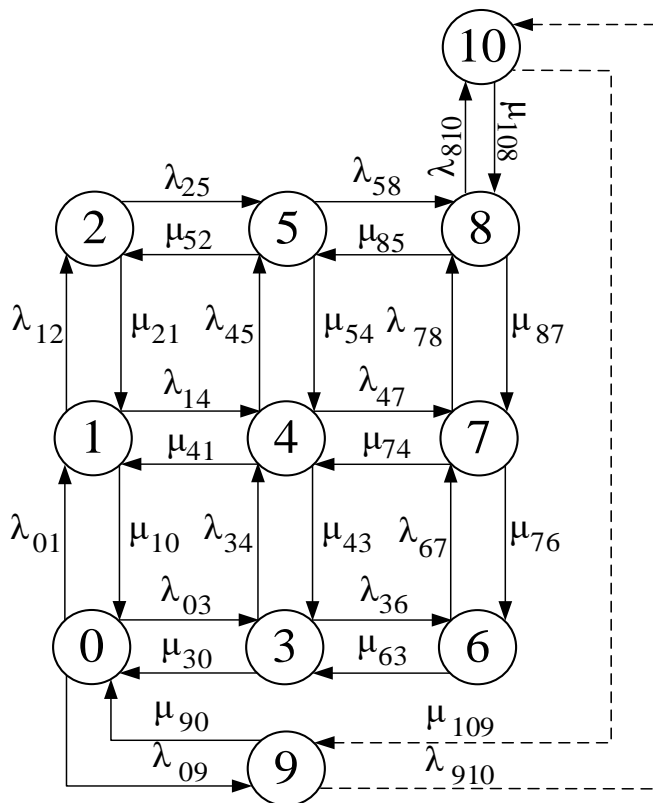


Рис. 3. Граф состояний модели работоспособности базовой станции с двумя секторами, двумя пучками каналов и коммутатором (выполнен авторами).

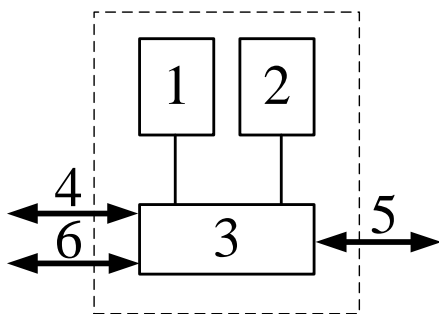


Рис. 4. Функциональная модель базовой станции с двумя секторами, тремя пучками каналов и коммутатором (выполнена авторами).

Составим систему уравнений по следующим правилам: слева от знака равенства стоит вероятность нахождения базовой станции в состоянии P_i , а справа в уравнении стоит сумма произведений вероятностей всех переходов, входящих (входящие стрелки на рис. 3) в состояние i системы, на интенсивности состояний, из которых эти потоки исходят, минус вероятность рассматриваемого состояния i , умноженная на суммарную интенсивность переходов, выходящих (выходящие стрелки на рис. 3) из данного состояния i

систему. Для решения подобной системы необходимо добавить ещё одно уравнение, определяющее нормировочное условие, поскольку сумма вероятностей всех состояний равна единице.

Запишем систему уравнений равновесия согласно графу:

$$\begin{aligned} P_0(\lambda_{01} + \lambda_{03} + \lambda_{09}) &= P_1\mu_{10} + P_3\mu_{30} + P_9\mu_{90}; \\ P_1(\mu_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{14}) &= P_0\lambda_{01} + P_2\mu_{21} + P_4\mu_{41}; \\ P_2(\mu_{21} + \lambda_{25}) &= P_1\lambda_{12} + P_5\mu_{52}; \\ P_3(\lambda_{36} + \mu_{30} + \lambda_{34}) &= P_6\mu_{63} + P_0\lambda_{03} + P_4\mu_{43}; \\ P_4(\mu_{41} + \lambda_{45} + \lambda_{47} + \mu_{43}) &= P_1\lambda_{14} + P_5\mu_{54} + P_7\mu_{74} + P_3\lambda_{34}; \\ P_5(\mu_{54} + \mu_{52} + \lambda_{58}) &= P_4\lambda_{45} + P_2\lambda_{25} + P_8\mu_{85}; \\ P_6(\mu_{63} + \lambda_{67}) &= P_3\lambda_{36} + P_7\mu_{76}; \\ P_7(\mu_{76} + \lambda_{78} + \mu_{74}) &= P_6\lambda_{67} + P_8\mu_{87} + P_4\lambda_{47}; \\ P_8(\mu_{85} + \mu_{87} + \lambda_{810}) &= P_5\lambda_{58} + P_7\lambda_{78} + P_{10}\mu_{108}; \\ P_9(\mu_{90} + \lambda_{910}) &= P_0\lambda_{09} + P_{10}\mu_{109}; \\ P_{10}(\mu_{109} + \mu_{108}) &= P_9\lambda_{910} + P_8\lambda_{810}. \end{aligned} \quad (1)$$

Укажем нормирующее условие:

$$\sum_{i=0}^{10} P_i = 1.$$

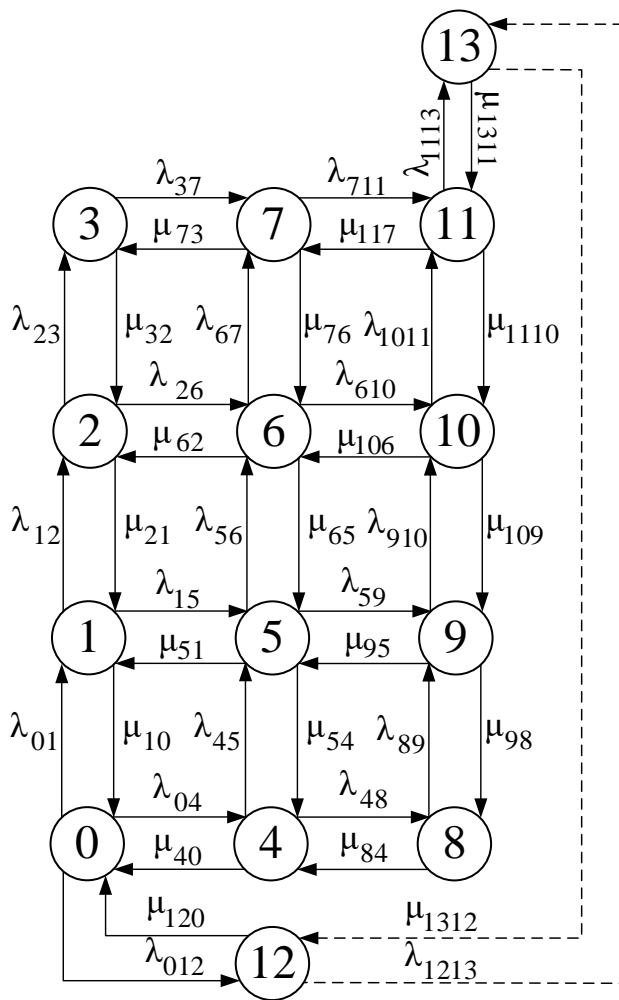


Рис. 5. Граф состояний модели работоспособности базовой станции с двумя секторами, тремя пучками каналов и коммутатором (выполнен авторами).

Зададим следующие числовые значения параметров модели – интенсивностей отказов и восстановления: $\lambda_{01} = 0,009 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{12} = 0,008 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{25} = 1 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{58} = 1 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{78} = 1,89 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{67} = 1,29 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{36} = 0,0011 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{03} = 0,011 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{34} = 0,9 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{14} = 0,115 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{45} = 0,205 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{47} = 0,145 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{09} = 0,0019 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{910} = 0,01 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{810} = 0,122 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{10} = 9,99 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{21} = 9,77 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{52} = 2,63 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{85} = 3,45 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{87} = 2,21 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{76} = 1,01 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{63} = 4,56 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{30} = 9,99 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{43} = 4 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{41} = 9 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{54} = 1,01 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{74} = 5 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{90} = 9,89 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{109} = 1,11 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{108} = 2 \cdot 10^{-6}$. Выбор параметров модели обусловлен достижением максимального значения вероятности работоспособного состояния БС (состояние 0).

Далее производится расчёт полученной системы уравнений итерационным методом Гаусса–Зейделя.

Полученные значения представлены ниже:

$P_0 = 0,98623$; $P_1 = 0,00496$; $P_2 = 0,00066$; $P_3 = 0,00663$; $P_4 = 0,00445$; $P_5 = 0,00270$; $P_6 = 0,00019$; $P_7 = 0,00107$; $P_8 = 0,00079$; $P_9 = 0,00189$; $P_{10} = 0,00037$.

Таким образом, вероятность работоспособности всех компонентов базовой станции составит $P_0 = 0,98623$. Вероятность работоспособности базовой станции с ухудшением качества обслуживания составит $P_1 + P_3 + P_4 = 0,01159$. Вероятность невыполнения базовой станцией своих функций составит $P_2 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 = 0,00733$, а самый неблагоприятный исход возможен с вероятностью $P_{10} = 0,00037$.

Далее рассмотрим функциональную модель БС цифровой сети радиосвязи иного типа, модель которой представлена на рис. 4. В этой модели задействованы три пучка ка-



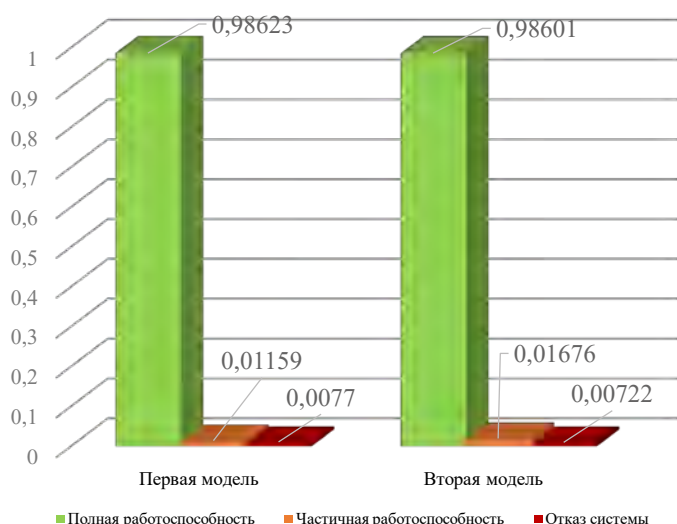


Рис. 6. Диаграмма работоспособности БС (выполнена авторами по результатам предложенного расчёта).

налов связи, которые обозначены цифрами 4–6.

Построим новый граф возможных переходов между состояниями работоспособности БС (рис. 5).

В этой модели выделим 13 дискретных состояний:

0 – оба сектора базовой станции работоспособны, все пучки каналов исправны, коммутация выполняется;

1 – оба сектора базовой станции работоспособны, один из пучков каналов неисправен, коммутация выполняется;

2 – оба сектора базовой станции работоспособны, оба пучка каналов неисправны, коммутация выполняется;

3 – оба сектора базовой станции работоспособны, все пучки каналов неисправны, коммутация выполняется;

4 – только один из секторов базовой станции работоспособен, все пучки каналов исправны, коммутация выполняется;

5 – только один из секторов базовой станции работоспособен, один из пучков каналов неисправен, коммутация выполняется;

6 – только один из секторов базовой станции работоспособен, оба пучка каналов неисправны, коммутация выполняется;

7 – только один из секторов базовой станции работоспособен, все пучки каналов неисправны, коммутация выполняется;

8 – оба сектора базовой станции неработоспособны, все пучки каналов исправны, коммутация выполняется;

9 – оба сектора базовой станции неработоспособны, один из пучков каналов неисправен, коммутация выполняется;

10 – оба сектора базовой станции неработоспособны, оба пучка каналов неисправны, коммутация выполняется;

11 – оба сектора базовой станции неработоспособны, все пучки каналов неисправны, коммутация выполняется;

12 – оба сектора базовой станции работоспособны, все пучки каналов исправны, коммутация не выполняется;

13 – оба сектора базовой станции неработоспособны, все пучки каналов неисправны, коммутация не выполняется.

Состояние 0 свидетельствует о полной работоспособности системы. Состояния 1, 2, 4, 5 и 6 свидетельствуют о том, что в БС произошёл значительный отказ её компонентов, но она функционирует по назначению с ухудшением качества обслуживания. При состояниях 3, 7–12 система считается неработоспособной даже при функционировании её отдельных компонентов. Конечное состояние 13 свидетельствует о полном отказе компонентов базовой станции.

Для новой модели система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$P_0(\lambda_{01} + \lambda_{012} + \lambda_{04}) = P_1\mu_{10} + P_{12}\mu_{120} + P_4\mu_{40};$$

$$P_1(\mu_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{15}) = P_0\lambda_{01} + P_2\mu_{21} + P_3\mu_{31};$$

$$P_2(\mu_{21} + \lambda_{26} + \lambda_{23}) = P_1\lambda_{12} + P_6\mu_{62} + P_3\mu_{32};$$

$$P_3(\lambda_{37} + \mu_{32}) = P_7\mu_{73} + P_2\lambda_{23};$$

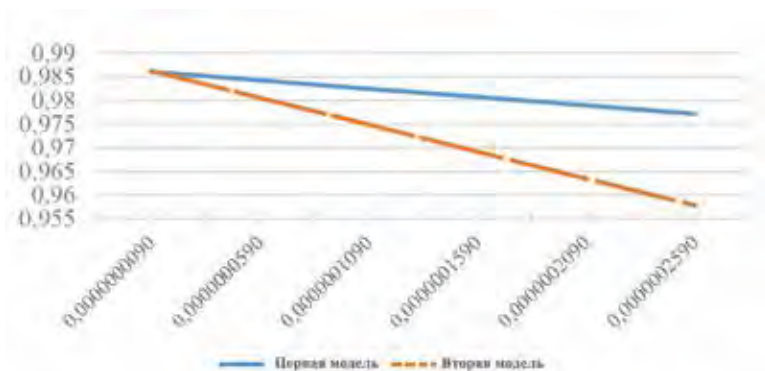


Рис. 7. График зависимости $P_0 = f(\lambda_{01})$ (выполнен авторами по результатам предложенного расчёта).

$$\begin{aligned}
 P_4(\mu_{40} + \lambda_{45} + \lambda_{48}) &= P_0 \lambda_{04} + P_3 \mu_{54} + P_8 \mu_{84}; \\
 P_5(\mu_{54} + \mu_{51} + \lambda_{56} + \lambda_{59}) &= P_4 \lambda_{45} + P_1 \lambda_{15} + P_6 \mu_{65} + P_9 \mu_{95}; \\
 P_6(\mu_{65} + \mu_{62} + \lambda_{67} + \lambda_{610}) &= P_5 \lambda_{56} + P_2 \lambda_{26} + P_7 \mu_{76} + P_{10} \mu_{106}; \\
 P_7(\mu_{76} + \lambda_{711} + \mu_{73}) &= P_6 \lambda_{67} + P_{11} \mu_{117} + P_3 \lambda_{37}; \\
 P_8(\mu_{84} + \lambda_{89}) &= P_4 \lambda_{48} + P_9 \mu_{98}; \\
 P_9(\mu_{98} + \mu_{95} + \lambda_{910}) &= P_8 \lambda_{89} + P_5 \lambda_{59} + P_{10} \mu_{109}; \\
 P_{10}(\mu_{109} + \mu_{106} + \lambda_{1011}) &= P_9 \lambda_{910} + P_6 \lambda_{610} + P_{11} \mu_{1110}; \\
 P_{11}(\mu_{1110} + \mu_{117} + \lambda_{1113}) &= P_{10} \lambda_{1011} + P_7 \lambda_{711} + P_{13} \mu_{1311}; \\
 P_{12}(\mu_{120} + \lambda_{1213}) &= P_0 \lambda_{012} + P_{13} \mu_{1312}; \\
 P_{13}(\mu_{1311} + \mu_{1312}) &= P_{11} \lambda_{1113} + P_{12} \lambda_{1213}; \\
 \sum_{i=0}^{14} P_i &= 1.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Для модели с тремя пучками каналов зададим следующие значения интенсивностей отказов и восстановления, которые практически не отличаются от параметров модели с двумя пучками каналов: $\lambda_{01} = 0,009 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{12} = 0,008 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{37} = 1,5 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{711} = 1,11 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{1113} = 0,111 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{67} = 1,29 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{1011} = 1,11 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{23} = 1,24 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{89} = 2,14 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{48} = 1,11 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{45} = 0,205 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{04} = 0,011 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{15} = 1,67 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{910} = 0,01 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{59} = 1,222 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{56} = 1,246 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{26} = 2,456 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{012} = 0,01 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{1213} = 0,111 \cdot 10^{-6}$, $\lambda_{610} = 2 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{10} = 9,99 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{21} = 9,77 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{73} = 2,12 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{117} = 0,1 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{1311} = 5,55 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{76} = 1,01 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{1110} = 8,76 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{32} = 1,11 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{98} = 1,234 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{84} = 9,99 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{54} = 1,01 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{40} = 99 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{51} = 1,5464 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{109} = 1,11 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{95} = 2,1453 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{65} = 8,76 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{120} = 9,99 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{1312} = 900 \cdot 10^{-6}$, $\mu_{106} = 5,67 \cdot 10^{-6}$.

Полученные значения представлены ниже:

$$\begin{aligned}
 P_0 &= 0,98601; P_1 = 0,00875; P_2 = 0,00414; \\
 P_3 &= 0,00311; P_4 = 0,00032; P_5 = 0,00213095; \\
 P_6 &= 0,00140; P_7 = 0,00119; P_8 = 0,00013; P_9 = 0,00105; \\
 P_{10} &= 0,00053696; P_{11} = 0,00017; P_{12} = 0,00098; P_{13} = 0,00002;
 \end{aligned}$$

Таким образом, вероятность работоспособности всех компонентов базовой станции составит $P_0 = 0,98601$. Вероятность работоспособности базовой станции с ухудшением качества обслуживания составит $P_1 + P_2 + P_4 + P_5 + P_6 = 0,01676$. Вероятность невыполнения базовой станцией своих функций составит $P_3 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} = 0,0072$, а самый неблагоприятный исход возможен с вероятностью $P_{13} = 0,00002$.

Далее выполним сравнение полученных результатов. Вероятности работоспособности каждой модели изображены на диаграмме (рис. 6). В полученных результатах допускаем погрешность, присущую итерационным методам решения системы уравнений.

Теперь рассмотрим, как будет изменяться полная работоспособность БС с изменением интенсивности потока отказов λ_{01} . Полученные результаты для каждой модели представлены на рис. 7.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- модель с 3 пучками каналов менее надёжна с разницей в 0,02 %;
- вероятность частичной работоспособности БС больше во второй модели;
- вероятность полного отказа БС во второй модели меньше, чем в первой модели;
- при увеличении интенсивности потока отказов λ_{01} в 2 раза полная работоспособность БС для первой модели снижается примерно на 0,18 %, а для второй модели на 0,05 %. Из этого делаем вывод, что наличие третьего пучка каналов снижает вероятность невыполнения БС своих функций.

Также можно предположить, что при радиопокрытии соседних сот вероятность работоспособности всей цифровой сети радиосвязи будет увеличена.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модели имеют практическую ценность и могут применяться при проектировании цифровых сетей радиосвязи железнодорожного транспорта, а также при вычислении характеристик качества действующей сети. Для повышения точности расчётов полученные значения полной или частичной работоспособности можно использовать совместно с первой формулой Эрланга, определяющей вероятность блокировки вызовов при заданной удельной нагрузке и числе каналов. Произведение двух вероятностей и будет представлять конечный результат.

При использовании различных архитектур сетей стандарта GSM-R, описанных в рекомендациях [5], полученные характеристики работоспособности БС предполагается использовать в расчёте структурной надёжности сети связи. Изменяя параметры разработанной модели, возможно подобрать такую архитектуру, которая будет оптимальной по затратам и обеспечит заданную работоспособность цифровой сети радиосвязи.

В целом можно предположить, что вследствие новых технологий и высоких скоростей, описанных в [15; 16], будут появляться новые архитектуры сетей связи железнодорожного транспорта и методики расчёта их работоспособности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Elbahhar Boukour, F., Heddebaut, M. Advanced Train Positioning/Communication System. Modern Railway Engineering, March 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71768.
2. He, Ruisi; Ai, Bo; Wang, Gongpu; Guan, Ke; Zhong, Z.; Molisch, A.; Briso-Rodríguez, C.; Oestges, C. High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, Vol. 11, pp. 49–58. DOI: 10.1109/MVT.2016.2564446.
3. Sniady, A. Communication Technologies Support to Railway Infrastructure and Operations. Ph.D. Thesis/ Technical University of Denmark, 2015. DOI: 10.11581/DTU:00000010.
4. Xu, Shengfeng; Zhu, Gang; Ai, Bo; Zhong, Zhangdui. A Survey on High-Speed Railway Communications: A Radio Resource Management Perspective. Computer Communications, 2016, Vol. 86. DOI: 10.1016/j.comcom.2016.04.003.

5. Report ITU-R M.2395-0 (11/2016). Introduction to railway communication systems. [Электронный ресурс]: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/rep/R-REP-M.2395-2016-PDF-E.pdf. Доступ 12.01.2021.

6. Sniady, A., Soler, J. LTE for railways: Impact on performance of ETCS railway signaling. Vehicular Technology Magazine, IEEE, 2014, Vol. 9, Iss. 2, pp. 69–77. DOI: 10.1109/MVT.2014.2310572.

7. Сафонова И. Е., Казанский Н. А., Немцов Ю. В., Панькина К. Е. Применение технологии 5G на примере гетерогенной сети. // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 10. – С. 18–21. DOI 10.34649/AT.2019.10.10.002.

8. Роевков Д. Н., Шматченко В. В., Плеханов П. А. Системы радиосвязи высокоскоростного железнодорожного транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – С. 57–68. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-radiosvyazi-vysokoskorostnogo-zheleznodorozhnogo-transporta/pdf>. Доступ 12.01.2021.

9. Шнепс-Шнеппе М. А., Курпrianовский В. П. Мобильная сеть GSM-R – основа цифровой железной дороги // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2016. – Т. 12. – № 1. – С. 222–231. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/mobilnaya-set-gsm-r-osnova-tsifrovoy-zheleznoy-dorogi/pdf>. Доступ 12.01.2021.

10. Казанский Н. А., Немцов Ю. В. Модели расчёта живучести сетей мобильной связи в условиях чрезвычайных ситуаций на транспорте // Информатизация и связь. – 2018. – № 2. – С. 17–20. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-vychisleniya-zhivuchesti-setey-mobilnoy-svyazi-na-transporte-pri-otkaze-bazovykh-stantsiy/pdf>. Доступ 12.01.2021.

11. Дымарский Я. С., Крутякова Н. П., Яновский Г. Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: ИТЦ «Мобильные коммуникации», 2003. – 384 с. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19580168>. Доступ 12.01.2021.

12. Слабнов В. Д. Численные методы: Учебник. – СПб.: Лань, 2020. – 392 с. [Электронный ресурс]: <https://mirlib.ru/knigi/programming/463498-chislennyye-metody-2020.html>. Доступ 12.01.2021.

13. Крылов В. В., Самохвалова С. С. Теория телеграфика и её приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с. [Электронный ресурс]: <https://bookree.org/reader?file=596396>.

14. Irazábal González, J. Numerical modelling of railway ballast using the discrete element method. Thesis for: Master's degree in Numerical Methods in Engineering, 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.20125.31200.

15. Ai, Bo; Cheng, Xiang; Kürner, T.; Zhong, Zhang-Dui; Guan, Ke; He, Ruisi; Xiong, Lei; Matolak, D.; Michelson, D. G.; Briso-Rodríguez, C. Challenges Toward Wireless Communications for High-Speed Railway. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, Vol. 15, No. 5, pp. 2143–2158. DOI: 10.1109/TITS.2014.2310771.

16. Zhou, Yuzhe; Ai, Bo. Handover Schemes and Algorithms of High-speed Mobile Environment: a Survey. Computer Communications, 2014, Vol. 47, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.comcom.2014.04.005.

Информация об авторах:

Немцов Юрий Владимирович – аспирант кафедры менеджмента качества Российского университета транспорта, Москва, Россия, rut1408@mail.ru.

Серёгин Игорь Витальевич – аспирант кафедры управления эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, ivs-97@mail.ru.

Вольнов Петр Игоревич – аспирант кафедры железнодорожных станций и транспортных узлов Российского университета транспорта, Москва, Россия, volnovpetr1840@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 26.05.2020, актуализирована 12.01.2021, одобрена после рецензирования 21.04.2021, принята к публикации 23.04.2021.