

УДК 654.165

Модель процесса информационного обмена между абонентами сети ПРС с общим каналом связи

А. А. Привалов, Е. В. Казакевич, И. А. Глухов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Привалов А. А., Казакевич Е. В., Глухов И. А. Модель процесса информационного обмена между абонентами сети ПРС с общим каналом связи // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 921–930. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-921-930

Аннотация

Цель: Разработать модель процесса функционирования сети ПРС, позволяющую производить оценку времени доведения пакетов данных до абонентов сети в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. **Методы:** Для решения задачи применялись методы общей теории систем, теории вероятностей, теории массового обслуживания, а также метод топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС). **Результаты:** Разработанная модель позволяет оценить качество функционирования сети пакетной радиосвязи с учетом особенностей используемого протокола многостанционного доступа к сетевому и каналному ресурсу, что может позволить определить основные направления по повышению помехозащищенности сетей ПРС при их функционировании в условиях воздействия случайных и преднамеренных помех. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при проектировании сетей подвижной радиосвязи стандарта ALE, а также при разработке методик по повышению помехозащищенности сетей радиосвязи и систем многопараметрической адаптации.

Ключевые слова: Сеть ПРС, ALE, КВ-радиосвязь, модель, стохастическая сеть.

Актуальность

На железнодорожном транспорте важнейшим элементом систем управления и обеспечения безопасности движения поездов (СУОБДП) являются сети поездной радиосвязи (ПРС). Их основной задачей является обеспечение информационного обмена с требуемым качеством между подвижными и стационарными абонентами [1, 2].

В соответствии с правилами [1], для обеспечения устойчивой двухсторонней радиосвязью абонентов сети ПРС, должны выполняться требования необходимого радиопокрытия [3] и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств [4].

Стоит отметить, что работа сетей ПРС осуществляется в сложной радиоэлектронной обстановке. Значительное влияние качества предоставляемых услуг сетями ПРС на осуществление перевозочного процесса определяет высокие требования к пакетным сетям передачи данных. Влияние случайных и преднамеренных помех на сети ПРС нарушает штатную работу железнодорожного транспорта. Следовательно, внедряемые в СУОБДП радиосети передачи данных должны соответствовать высоким требованиям по помехозащищенности. Поэтому оценка качества информационного обмена между абонентами сети ПРС в условиях сложной радиоэлектронной обстановки является актуальной задачей.

С целью разработки механизма оценки качества информационного обмена проведем обзор существующих подходов к оценке качества функционирования современных радиосетей передачи данных. В настоящей работе под качеством будем понимать общее обозначение набора параметров, связанных с передачей данных между (N) — пунктом доступа услуг (ПДУ) [5].

Среди множества показателей качества, нормируемых рекомендациями ИТУ-Т, ETSI, 3GPP, IETF, можно выделить следующие: пропускная способность направлений передачи данных; вероятность потери данных, оцениваемая по значению вероятности потери пакетов; время задержки данных, рассчитываемое как среднее время доставки сообщения (пакета данных) и джиттер указанного времени.

В работе [6] рассмотрен процесс установления соединения между абонентами подвижной сети радиосвязи. Для решения поставленной задачи авторы использовали метод топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС). В результате была предложена математическая модель для осуществления анализа и оценки времени успешного установления соединения. Предложенная модель не учитывает особенности используемого протокола многостанционного доступа и не позволяет оценить время гарантированного доведения информации.

В работе [7] предложена методика оценки эффективности канального уровня сети радиосвязи стандарта TETRA в условиях деструктивных воздействий. Получены асимптотические оценки параметров, влияющих на эффективность функционирования сети. Методика позволяет оценивать среднее время успешной передачи пакета данных, без учета функции распределения времени успешной передачи пакетов данных. Также предложенная методика не может быть применима для оценки качества функционирования сетей радиосвязи декаметрового (коротковол-

нового) диапазона частот, так как не учитывает особенности функционирования данных сетей.

В работе [8] предложена комплексная модель функционирования декаметровой сети радиосвязи. Оценка качества в предложенной модели производится с учетом следующих показателей: вероятности приема информации (достоверность), времени передачи сообщения (своевременность), вероятности энергетического обнаружения источника (безопасность). В предложенной модели не учитывается оценка времени успешного соединения и времени гарантированного доведения пакета данных.

В работе [9] предложена модель, позволяющая анализировать и оценивать помехозащищенность сетей радиосвязи, критерием оценки является вероятность ошибки приема элемента сигнала. Модель не учитывает используемую процедуру многостанционного доступа.

В работе [10] предложена методика расчета надежности канала радиосвязи, которая оценивается по коэффициенту готовности. Методика не учитывает временной ресурс используемой системы радиосвязи.

В настоящей статье рассматривается один из возможных механизмов оценки качества информационного обмена между абонентами сети ПРС в зависимости от вероятности успешного приема и отношения сигнал/шум. Для решения поставленной задачи авторами на основе метода топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС) предлагается подход, который заключается в представлении процесса функционирования сети ПРС с общим каналом связи в виде стохастической сети, задании вида частных распределений, определения эквивалентной функции, с последующим определением итоговой функции распределения времени успешной передачи пакетов данных. Стоит отметить, что результаты, полученные в указанных выше работах [6–9], используются в процессе моделирования в качестве входных параметров.

Предлагаемая авторами модель позволяет оценить качество информационного обмена между абонентами сети ПРС в условиях сложной радиоэлектронной обстановки по показателю вероятности успешной передачи пакетов сообщений и среднего времени доставки пакетов сообщений.

Постановка задачи

Пусть имеется сеть поездной радиосвязи (ПРС) с общим каналом связи, в которой N подвижных станций (ПС) передают сообщения равного приоритета в адрес базовой станции (БС). На каждой из станций интенсивность поступающего на передачу потока сообщений составляет λ_i сообщений в сутки, а сам поток является пуассоновским.

Поступающие на передачу сообщения в зависимости от их объема V и емкости накопителя могут разбиваться на части. Известно, что в поступающем на передачу потоке содержится $Z1\%$ сообщений, передаваемых в виде одной, $Z2\%$ — в виде двух и $Z3\%$ — в виде трех и т. д. частей.

Каждое сообщение (или его часть) за случайное время $t_{\text{ввн}}$ с функцией распределения $U(t)$ дополняется служебными признаками, вводится в накопитель и передается в виде пакета определенной структуры. Накопитель обеспечивает хранение одного пакета. Остальные пакеты сообщений или вновь поступившие сообщения становятся в очередь.

Перед передачей пакета сообщений оператор станции в течение случайного времени $t_{\text{кз}}$ с функцией распределения $D(t)$ производит контроль занятости выделенных для связи рабочих частот. При этом вероятность наличия хотя бы одной свободной рабочей частоты равна $P_{\text{св}}$. Если рабочая частота свободна, то за случайное время $t_{\text{оп}}$ с функцией распределения $B(t)$ осуществляется передача содержащегося в накопителе пакета сообщений, которая подтверждается с вероятностью $P_{\text{оп}}$. В этом случае на БС за случайное время $t_{\text{пак}}$ с функцией распределения

$K(t)$ в адрес корреспондента по специально выделенному каналу связи передается пакет сообщений, который принимается успешно с вероятностью $P_{\text{пак}}$. В противном случае с вероятностью $(1 - P_{\text{оп}})$ или $(1 - P_{\text{пак}})$ через случайное время ожидания пакета сообщений $t_{\text{ожп}}$ с функцией распределения $G(t)$ после проверки наличия свободной рабочей частоты производится повторная попытка передачи пакета сообщений.

Если свободной рабочей частоты нет, а вероятность этого события равна $(1 - P_{\text{св}})$, то с вероятностью $P_{\text{обн}}$ оператор станции обнаружит этот факт занятия. В противном случае с вероятностью $(1 - P_{\text{обн}})$ будет произведена передача пакета сообщений на занятой рабочей частоте и через время $t_{\text{ожп}}$ после проверки наличия свободной частоты данный пакет сообщений передается повторно. Число повторных передач пакетов сообщений не ограничено.

Известно, что в сети можно выделить Γ территориально рассредоточенных групп мобильных станций, причем достоверный контроль занятости используемых для связи рабочих частот возможен только в пределах одной группы.

Требуется определить функцию распределения времени успешной передачи пакетов сообщений в данной радиосети.

Решение

Для решения поставленной задачи представим процесс функционирования сети ПРС с общим каналом связи в виде стохастической сети (рис. 1).

Указанные преобразования в предположении, что соответствующие функции распределения относятся к классу экспоненциальных, определяются как:

$$y(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[Y(t)] = \frac{y}{y + s}, \quad (1)$$

где y — параметр распределения.

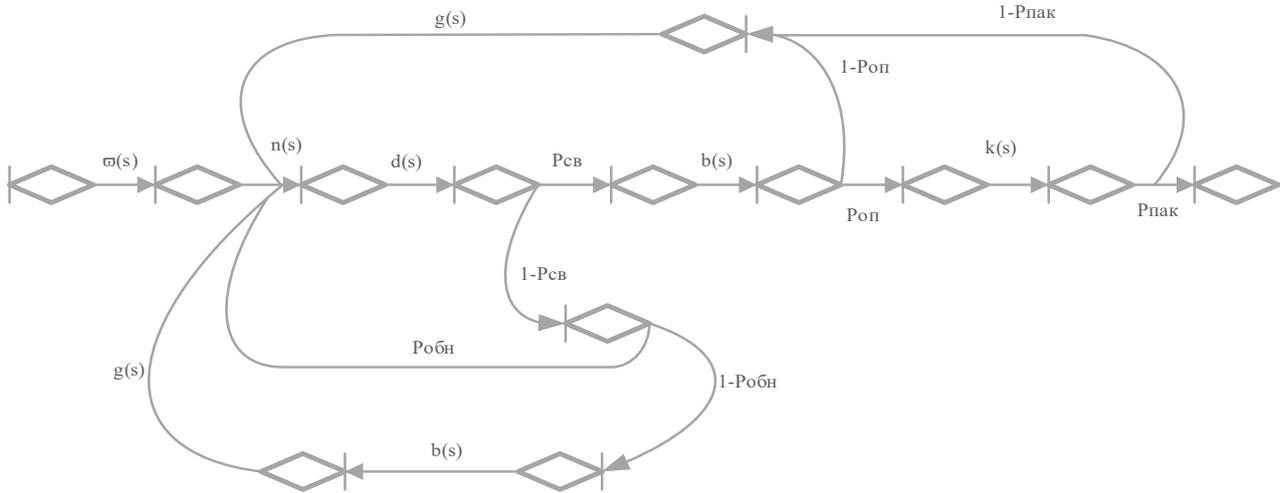


Рис. 1. Стохастическая сеть функционирования сети ПРС с общим каналом связи:
 $P_{св}$ — вероятность наличия хотя бы одной свободной рабочей частоты; $P_{оп}$ — вероятность подтверждения успешного приема пакета; $P_{пак}$ — вероятность успешного приема пакета; $P_{обн}$ — вероятность обнаружения отсутствия свободной частоты; $\omega(s)$, $n(s)$, $d(s)$, $b(s)$, $k(s)$, и $g(s)$ — преобразования Лапласа функции распределения времени ожидания обслуживания, обработки и ввода в накопитель $U(t)$, контроля занятости радиоканала $D(t)$, однократной передачи пакета $B(t)$, подготовки и передачи пакета $K(t)$ и ожидания подтверждения о приеме пакета $G(t)$ соответственно

После проведения соответствующих преобразований, с учетом формулы (1), эквивалентная функция стохастической сети примет вид:

$$Q(s) = \frac{nabkP_{оп}P_{пак}(g+s)(1-\lambda h)}{s^5 + s^4 A + s^3 B + s^2 C + sD + E}, \tag{2}$$

где $A = A1 - \lambda$; $B = B1 - \lambda A1$; $C = C1 - \lambda B1$; $C = C1 - \lambda B1$; $D = D1 - \lambda C1$; $E = E1 - \lambda(D1 - M)$;
 $M = anbk P_{оп} P_{пак}$; $A1 = A2 + n$; $B1 = B2 + A2n$; $C1 = C2 + B2n$; $D1 = D2 + C2n$;
 $A2 = a + b + k + g$; $B2 = (a + k)(g + b) + gb + ak$; $C2 = ak(g + b) + gb(a + k) - (1 - P_{оп})gab$;
 $D2 = agbk P_{оп} P_{пак}$ — коэффициенты разложения, полученные при последовательном преобразовании эквивалентной функции; $n = 1/t_{ввн}$; $b = t_{оп}$; $k = 1/t_{пак}$; $g = 1/t_{ожп}$;
 $\lambda = \lambda_i (0,01Z1 \% + 0,02Z2 \% + 0,03Z3 \% + \dots)$;

$$a = \left\{ -\frac{d}{ds} \left[\frac{d(s)P_{св}}{1 - (1 - P_{св})d(s)[P_{обн} + (1 - P_{обн})b(s)g(s)]} \right]_{s=0} \right\}^{-1} \text{ — интенсивность освобождения}$$

частотно-временного ресурса радиосети;

$$P_{св} = 1 - \frac{bP_0}{(f-1)!(fb - N\lambda)} \left(\frac{N\lambda}{b} \right)^f \text{ — вероятность наличия в произвольный момент времени хотя}$$

бы одной свободной единицы частотно-временного ресурса;

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{f-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{b}\right)^i + \frac{b}{(f-1)!(fb - N\lambda)} \left(\frac{N\lambda}{b}\right)^f}$$

— вероятность того, что все f единиц частотно-

временного ресурса будут свободны;

$P_{\text{обн}} = 1/\Gamma$ — вероятность обнаружения факта занятия частотно-временного ресурса сети корреспондентами других территориально разнесенных групп;

$$h = -\frac{d}{ds} \left[\frac{n(s)\alpha(s)b(s)k(s)P_{\text{оп}}P_{\text{пак}}}{1 - (1 - P_{\text{оп}})g(s)\alpha(s)b(s) - (1 - P_{\text{пак}})P_{\text{оп}}b(s)\alpha(s)k(s)g(s)} \right]_{s=0}$$

— среднее время

передачи сообщения в радиосети, без учета времени ожидания в очереди;

$$\alpha(s) = \frac{d(s)P_{\text{св}}}{1 - (1 - P_{\text{св}})d(s)[P_{\text{обн}} + (1 - P_{\text{обн}})b(s)g(s)]} \tag{3}$$

— эквивалентная функция стохастической сети, соответствующей процессу доступа корреспондента к частотно-временному ресурсу сети.

Анализ формулы (2) показывает, что эквивалентная функция является алгебраической дробно-рациональной функцией, имеющей простые или комплексно-сопряженные полюса слева от абсциссы в полуплоскости абсолютной сходимости интеграла Лапласа. Следовательно, указанная функция может быть представлена в виде ряда вычетов, количество членов которого определяется числом полюсов (в нашем случае их пять), т. е:

$$Q(s) = \sum_{i=1}^5 \frac{nabkP_{\text{оп}}P_{\text{пак}}(g + s_i)(1 - \lambda h)}{5s_i^4 + 4s_i^3A + 3s_i^2B + 2s_iC + D} \cdot \frac{1}{s - s_i},$$

где s_i — простые или комплексно-сопряженные нули знаменателя формулы (2), определяемые численными методами.

Осуществляя почленный переход в пространство оригиналов, получим:

$$f(t) = \sum_{i=1}^5 \frac{nabkP_{\text{оп}}P_{\text{пак}}(g + s_i)(1 - \lambda h)}{5s_i^4 + 4s_i^3A + 3s_i^2B + 2s_iC + D} \cdot \exp[s_i t].$$

Отсюда, искомая функция распределения времени передачи сообщений в радиосети с общим каналом связи:

$$F(t) = \sum_{i=1}^5 \frac{nabkP_{\text{оп}}P_{\text{пак}}(g + s_i)(1 - \lambda h)}{[5s_i^4 + 4s_i^3A + 3s_i^2B + 2s_iC + D](-s_i)} \cdot [1 - \exp(s_i t)]. \tag{4}$$

Результаты расчетов по формуле (4) представлены на рис. 2, 3.

При проведении расчетов рассматривалась система автоматической установки связи ALE (Automatic Link Establishment), которая лежит в основе стандарта радиосвязи MIL-STD-188-141B:

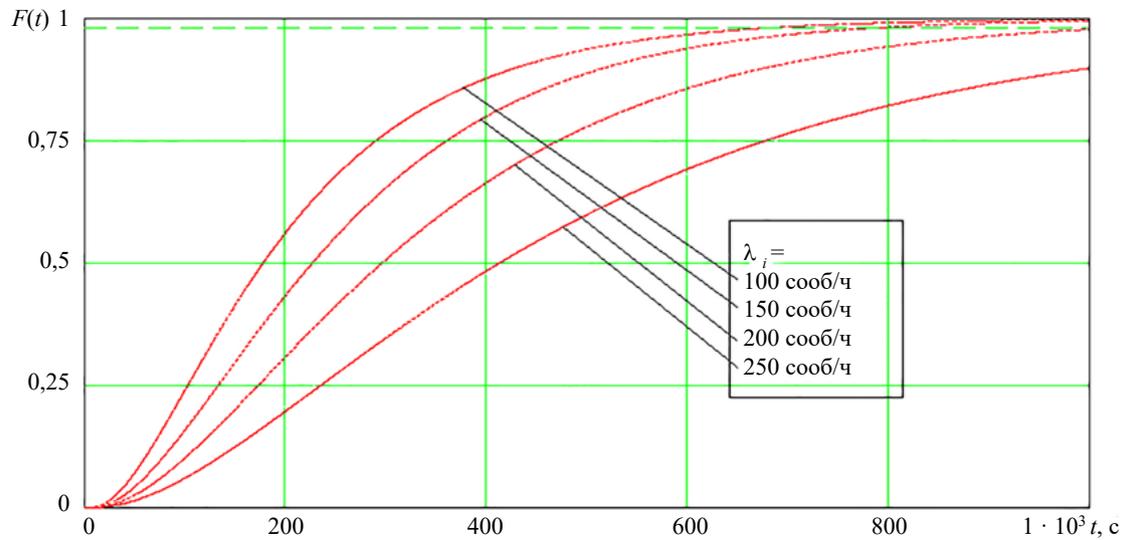


Рис. 2. Вид функции распределения времени передачи сообщений в радиосети с общим каналом связи

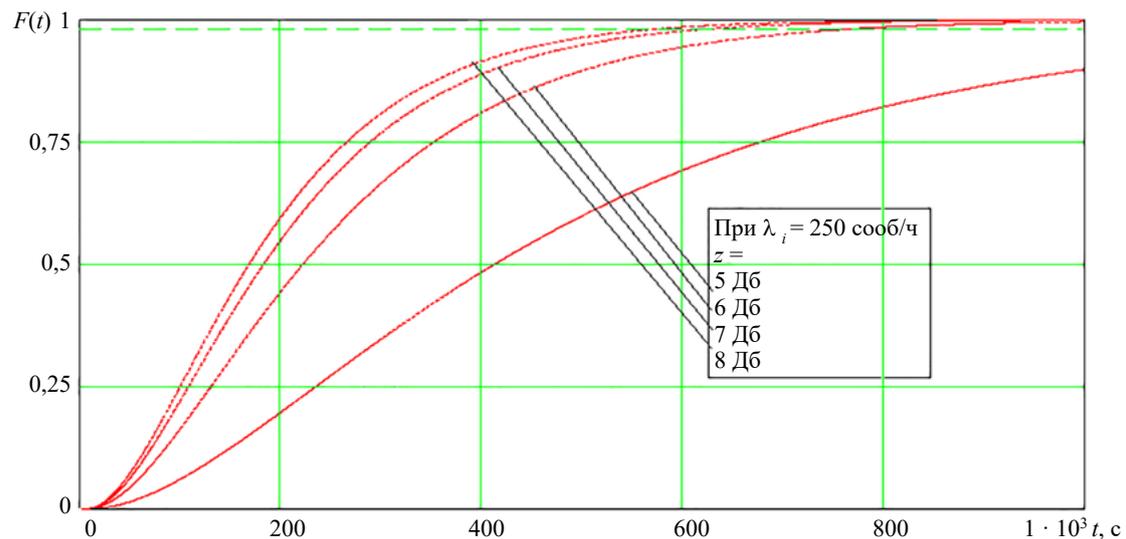


Рис. 3. Вид функции распределения времени передачи сообщений в зависимости от отношения сигнал/шум в радиосети с общим каналом связи

– объем передаваемых сообщений: $V = 300$ бит;
 – скорость передачи информации: $R = 9600$ бит/с;
 – среднее время обработки и ввода сообщения в накопитель: $t_{\text{ввн}} = 5$ с;
 – среднее время ожидания пакета: $t_{\text{ожп}} = 5$ с;
 – используемый корректирующий код: Код Голя (23,12);
 – среднее время подготовки и передачи пакета: $t_{\text{пак}} = 2,8$ с;

– среднее время контроля занятости рабочей частоты: $t_{\text{кз}} = 10$ с;
 – вероятность успешного приема однократно переданного пакета: $P_{\text{оп}} = 0,8$;
 – вероятность успешного приема пакета: $P_{\text{пак}} = 0,98$;
 – количество корреспондентов радиосети $N = 100$;
 – число территориально рассредоточенных групп корреспондентов $\Gamma = 10$;

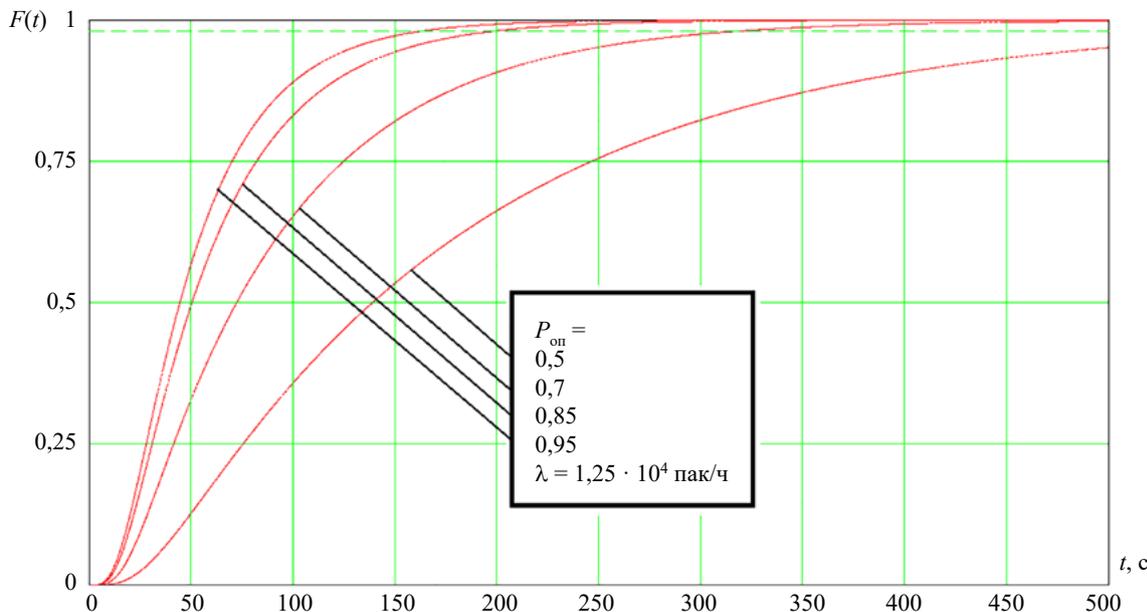


Рис. 4. Вид функции распределения времени передачи пакета данных в зависимости от вероятности успешного приема

– доля сообщений, передаваемых в виде одного пакета $Z1 \% = 60 \%$; двух пакетов — $Z2 \% = 30 \%$; трех пакетов — $Z3 \% = 10 \%$.

– интенсивность входящего потока сообщений изменялась в пределах $100 \leq \lambda_i \leq 250$ сообщений в час;

– соотношение сигнал/шум в канале передачи $z = 5$ дБ;

Следует отметить, что полученные результаты моделирования практически совпадают с данными, полученными методом статистического моделирования, что подтверждает адекватность и работоспособность разработанной модели.

Представленная модель обладает достаточной общностью и, при подстановке соответствующих исходных данных и небольшой корректировке, позволяет оценивать и другие виды радиосетей с общим каналом и случайным доступом. Корректировка производится того фрагмента стохастической сети, который отражает особенности используемого протокола многостанционного доступа. В эквивалентной функции формулы (2) эти особенности учитываются параметром a , определяемым из эквива-

лентной функции стохастической сети используемого протокола.

Так, например, для сетей пакетной радиосвязи с настойчивым многостанционным доступом с немедленной первой передачей указанный параметр определяется из эквивалентной функции (см. формулу 3).

$$\alpha(s) = \frac{d(s)P_{cb}}{1 - (1 - P_{cb})r(s)} = \frac{dP_{cb}(r+s)}{(d+s)(rP_{cb} + s)}$$

как

$$a = \frac{-d}{ds} \left[\frac{\alpha(s)}{\alpha(0)} \right]_{s=0} = \frac{1}{t_{кз} + (1 - P_{cb})t_{п}}, \quad (5)$$

где $t_{п}$ — интервал между повторными попытками передачи пакета, определяемый из условия $0 < t_{п} < [1 - \lambda t_{он}] / \lambda$. При ненастойчивом многостанционном доступе $t_{п} = (1 - P_{cb}) / (fb - N\lambda)$.

Результаты расчетов значений функции распределения времени передачи пакета данных представлены на рис. 4.

При проведении расчетов предполагалось, что длительность пакета данных составляет 3 с,

а время паузы между повторными попытками передачи и контроля занятости рабочего канала равны 1 с и 0,5 с соответственно. При этом интенсивность входящего потока полагалось равной $1,25 \cdot 10^4$ пакетов в час, а вероятность успешного приема однократно переданного пакета данных изменялась в пределах $0,5 \leq P_{\text{оп}} \leq 0,95$. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее известными данными.

Выводы

1. В результате исследования разработана математическая модель, позволяющая оценивать время гарантированной доставки пакета данных до абонента сети ПРС. Предложенная модель учитывает используемый протокол многостанционного доступа.

2. Получены зависимости функции распределения времени гарантированной доставки информации от отношения сигнал/шум и вероятности успешного приема.

3. Предложенная модель адекватно отображает процесс информационного обмена между абонентами сети ПРС с общим каналом связи, что подтверждают полученные результаты моделирования, которые совпадают с данными статистического моделирования.

4. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании реальных систем радиосвязи, функционирующих в условиях сложной радиоэлектронной обстановки.

Библиографический список

1. Приказ Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286 (ред. от 25 ноября 2018 г.) «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» (зарегистрировано в Минюсте России 28 января 2011 г. № 19627).
2. ГОСТ 33973—2016. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. — М.: Росстандарт России, 2019. — 28 с.
3. Методические указания по организации и расчету сетей поездной радиосвязи ОАО «РЖД» от 23 декабря 2013 г. № 2854.
4. ГОСТ Р 50657—94. Устройства радиопередающие всех категорий и назначений народнохозяйственного применения. Требования к допустимым отклонениям частоты, методы измерений и контроля. — М.: Госстандарт России, 1995. — 23 с.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1—99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель. — М.: Госстандарт России, 2006. — 58 с.
6. Болдинов А. М. Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R / А. М. Болдинов, А. А. Привалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 743–751. — DOI: 10/20295/1815-588X-2022-4-743-751.
7. Перегудов М. А. Вероятностная модель функционирования канального уровня сети цифровой радиосвязи в условиях деструктивных воздействий / М. А. Перегудов // Системы управления, связи и безопасности. — 2023. — № 1. — С. 64–89. — DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-64-89.
8. Алекаев А. Е. Модель многоступенчатой адаптации низкоэнергетической радиолинии коротковолнового диапазона с учетом затрачиваемых ресурсов радиолинии и прогнозирования сигнально-помеховой обстановки / А. Е. Алекаев, В. А. Липатников, Р. Ю. Ряскин и др. // Системы управления, связи и безопасности. — 2020. — № 3. — С. 158–183. — DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10305.
9. Дворников С. В. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / С. В. Дворников, Я. А. Домбровский, М. А. Семисошенко и др. // Информация и Космос. — 2016. — № 4. — С. 11–14.
10. Григорьева Е. И. Математическая модель для оценки качества функционирования средств радиосвязи в гражданской авиации / Е. И. Григорьева // Научный вестник Московского государственного технического

университета гражданской авиации. — 2016. — № 225(3). — С. 98–104.

Дата поступления: 04.10.2023

Решение о публикации: 16.11.2023

Контактная информация:

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич — д-р воен. наук, проф.; arivalov@inbox.ru

КАЗАКЕВИЧ Елена Владимировна — канд. техн. наук, доц.

ГЛУХОВ Иван Александрович — аспирант, ivan.gluhov.960709@gmail.com

A Model of the Process of Information Exchange Between Subscribers of the PRC Network with a Common Communication Channel

A. A. Privalov, Ye. V. Kazakevich, I. A. Glukhov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Privalov A. A., Kazakevich Ye. V., Glukhov I. A. A Model of the Process of Information Exchange Between Subscribers of the PRC Network with a Common Communication Channel // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 921–930. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-921-930

Summary

Purpose: To analyse the quality of operation of the PRC network, enabling the evaluation of time of guaranteed delivery of data packets to the subscribers of the network in bad radio-electronic conditions. **Methods:** To address the problem, methods from the general theory of systems, probability theory, queuing theory, as well as the method of topological transformation of stochastic networks (TTSN) have been used. **Results:** The developed model allows us to estimate the quality of functioning of the packet radio communications network, which allows us to determine the main directions to improve the interference immunity of PRC networks from the effects of random and intentional interference. **Practical significance:** The obtained results can be used in the design of mobile radio networks of the ALE standard, as well as in the development of methods to improve the interference immunity of radio networks, multi-parameter adaptation systems.

Keywords: PRC network, ALE, SW radiocommunication, model, stochastic network.

References

1. *Prikaz Mintransa Rossii ot 21 dekabrya 2010 g. № 286 (red. ot 25 noyabrya 2018 g.) “Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii” (zaregistrovano v Minyuste Rossii 28 yanvary 2011 g. № 19627)* [Order of the Ministry of Transport of Russia dated December 21, 2010 № 286 (as amended on November 25, 2018) “On approval of the Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation” (registered with the Ministry of Justice of Russia on January 28, 2011 № 19627)]. (In Russian)

2. *GOST 33973—2016. Zheleznodorozhnaya elektro-svyaz’. Poezdnaya radiosvyaz’. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya* [GOST 33973—2016. Railway telecommunications. Train radio communication. Technical requirements and control methods]. M.: Rosstandart Rossii Publ., 2019, 28 p. (In Russian)

3. *Metodicheskie ukazaniya po organizatsii i raschetu setey poezdnoy radiosvyazi OAO “RZhD” ot 23 dekabrya 2013 g. № 2854* [Guidelines for organizing and calculating train radio communication networks of JSC Russian Railways dated December 23, 2013 № 2854]. (In Russian)

4. GOST R 50657—94. *Ustroystva radiopredayushchie vsekh kategoriy i naznacheniy narodnokhozyaystvennogo primeneniya. Trebovaniya k dopustimym odkloneniyam chastoty, metody izmereniy i kontrolya* [GOST R 50657—94. Radio transmitting devices of all categories and purposes for national economic use. Requirements for permissible frequency deviations, measurement and control methods]. Moscow: Gosstandart Rossii Publ., 1995, 23 p. (In Russian)
5. GOST R ISO/MEK 7498-1—99. *Informatsionnaya tekhnologiya. Vzaimosvyaz' otkrytykh sistem. Bazovaya etalonnaya model'. Chast' 1. Bazovaya model'* [GOST R ISO/IEC 7498-1—99. Information technology. Interconnection of open systems. Basic reference model. Part 1. Basic model]. Moscow: Gosstandart Rossii Publ., 2006, 58 p. (In Russian)
6. Boldinov A. M., Privalov A. A. Matematicheskaya model' kanala upravleniya standarta radiosvyazi GSM-R [Mathematical model of the control channel of the GSM-R radio communication standard]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, Iss. 4, pp. 743–751. DOI: 10/20295/1815-588Kh-2022-4-743-751. (In Russian)
7. Peregodov M. A. Veroyatnostnaya model' funktsionirovaniya kanal'nogo urovnya seti tsifrovoy radiosvyazi v usloviyakh destruktivnykh vozdeystviy [Probabilistic model of the functioning of the channel level of a digital radio communication network under conditions of destructive influences]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, communication and security systems]. 2023, Iss. 1, pp. 64–89. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-64-89. (In Russian)
8. Alekaev A. E., Lipatnikov V. A., Ryaskin R. Yu. et al. Model' mnogostupenchatoy adaptatsii nizkoenergeticheskoy radiolinii korotkovolnovogo diapazona s uchedom zatrachivaemykh resursov radiolinii i prognozirovaniya signal'no-pomekhovoy obstanovki [Model of multi-stage adaptation of a low-energy radio link in the short-wave range, taking into account the expended resources of the radio link and forecasting the signal-interference situation]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control Systems, communications and security]. 2020, Iss. 3, pp. 158–183. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10305. (In Russian)
9. Dvornikov S. V., Dombrovskiy Ya. A., Semisoshenko M. A. et al. Otsenka pomekhozashchishchennosti liniy radiosvyazi s medlennoy psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty [Assessment of noise immunity of radio communication lines with slow pseudo-random tuning of the operating frequency]. *Informatsiya i Kosmos* [Information and Space]. 2016, Iss. 4, pp. 11–14. (In Russian)
10. Grigor'eva E. I. Matematicheskaya model' dlya otsenki kachestva funktsionirovaniya sredstv radiosvyazi v grazhdanskoj aviatsii [Mathematical model for assessing the quality of functioning of radio communications in civil aviation]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviatsii* [Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation]. 2016, Iss. 225(3), pp. 98–104. (In Russian)

Received: October 04, 2023

Accepted: November 16, 2023

Author's information:

Andrey A. PRIVALOV — Dr. Sci. in Military, Professor;
apivalov@inbox.ru

Elena V. KAZAKEVICH — PhD in Engineering,
Associate Professor

Ivan A. GLUKHOV — Postgraduate Student;
ivan.gluhov.960709@gmail.com