

DOI 10.24412/2221-2574-2024-1-34-40

УДК 621.391.1

К ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ ПОДВИЖНОЙ НАЗЕМНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Туляков Юрий Михайлович

доктор технических наук, доцент, доцент Волго-Вятского филиала Московского технического университета связи и информатики (ВВФ МТУСИ)¹; профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева².

E-mail: yu.m.tulyakov@rambler.ru

Есипенко Валентин Иванович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева².

E-mail: esipenko@nntu.ru

¹Адрес: 603011, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Менделеева, д. 15.

²Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

Аннотация: Рассматриваются направления дополнительных исследований для уточнения методики оценки надёжности наземной подвижной радиосвязи по её зоне действия (территориальной надёжности, определяемой условиями распространения радиоволн), обусловленные современными нововведениями в технику такой радиосвязи. Предлагается введение дополнительных вероятностных параметров, характеризующих систему радиосвязи с позиций абонентского доступа в неё. Применительно к оценке надёжности радиосвязи анализируются современные методы коррекции работы системы с учётом трафиковых изменений, как в радиоканале, так и в радионаправлениях осуществления связи. Рассматриваются принципы существующей методики оценки надёжности связи, на основе которых и с использованием которых возможно определение влияния таких нововведений в современных системах подвижной радиосвязи на уточнённую оценку надёжности связи.

Ключевые слова: надёжность радиосвязи, радиоволны, вероятностные функции распределения случайных величин, флуктуации уровня радиосигналов, территориальная надёжность.

Введение

Надёжность связи характеризует канал связи по его способности сохранять требуемое качество передачи информации, определяемое заданной помехоустойчивостью передаваемых сигналов, а именно созданием необходимого отношения сигнал/помеха в течение заданного интервала времени и заданных условиях действия системы. При этом подразумевается, что аппаратура работает исправно.

Рассмотрим надёжность каналов подвижной радиосвязи. В таких каналах, как правило, уровни сигналов и помех могут меняться во времени и по зоне действия радиосистемы (территориально), вследствие чего задача оценки надёжности связи значительно усложняется по сравнению с фиксированной связью. Учитывая популярность и перспективность систем подвижной радиосвязи (в том числе сотовой), такую оценку можно считать

актуально полезной.

Целью работы является определение уточнений (дополнений) методики оценки надёжности подвижной радиосвязи для условий применения новых внедряемых способов обработки и передачи-приёма радиосигналов. Эти условия особенно характерны для сотовой связи 3G, 4G и для перспективного 5G поколений. Для определения этих уточнений вначале рассмотрим основные принципы существующей на сегодняшний день методики оценки надёжности радиосвязи, большинство из которых может быть использовано в качестве математической основы учёта влияния указанных нововведений в современные системы подвижной радиосвязи на надёжность связи.

Основные принципы методики оценки надёжности радиосвязи

Суть этой методики сводится к следующему [1, 3]. При заданных энергетических парамет-

рах базовой станции (БС) (мощности радиопередатчика — P , коэффициенте усиления антенны — D , высоте подвеса антенны — h_1), условиях передачи радиосигналов (открытая местность, её рельефность, город, и т.п.) и высоте расположения точки приёма сигналов h_2 — определяется (прогнозируется) по эмпирическим формулам (для конкретных моделей распространения радиосигналов [2, 3]) затухание уровня радиосигнала на заданном расстоянии — R (например, на границе планируемой зоны действия радиосистемы), и, в итоге, находится средний (или медианный) уровень радиосигнала в точке приёма $E_c = E_{c\text{ср}}$ (напряжённость электрической составляющей электромагнитного поля) или $P_c = P_{c\text{ср}}$ (мощность сигнала). Возникающие пространственные и временные флуктуации (случайные отклонения) уровня оцениваются как *по пространству* (l) — $\Delta E_c(l, p_l)$ (или $\Delta P_c(l, p_l)$), так и *по времени* (t) — $\Delta E_c(t, p_t)$ (или $\Delta P_c(t, p_t)$), значения которых определяются по их вероятностям появлений — p_l и p_t . В свою очередь p_l и p_t задаются или определяются по распределениям значений случайных величин $\Delta E_c(l, p_l)$ (или $\Delta P_c(l, p_l)$) и $\Delta E_c(t, p_t)$ (или $\Delta P_c(t, p_t)$). Наиболее часто распределение этих величин подчиняется логарифмически-нормальному закону при их измерениях в децибелах, т.е. $E_{\text{дБ}} = 20 \lg E$ (например, относительно 1 мкВ/м), или $P_{\text{дБ}} = 10 \lg P$ (например, относительно 1 мВт).

В месте приема уровень радиосигналов от БС будет определяться в следующем виде

$$E_c = E_{c\text{ср}} \pm \Delta E_c(l, p_l) \pm \Delta E_c(t, p_t)$$

или

$$P_c = P_{c\text{ср}} \pm \Delta P_c(l, p_l) \pm \Delta P_c(t, p_t), \text{ дБ.} \quad (1)$$

Заметим, что подобная оценка соответствует прогнозированию уровня радиосигнала не только от передатчика БС, а также на входе радиоприёмника БС от радиопередатчика, расположенного в рассматриваемой точке приёма, например, от абонентской (мобильной) станции, в направлении от этой точки к БС.

Обычно указанные флуктуации уровня радиосигнала классифицируют как «медленные» из-за их длительности, значительно превыша-

ющей длительности элементарных сигналов передачи, борьба с которыми значительно осложнена по сравнению с «быстрыми» замираниями, при которых приём сигналов (борьба с такими замираниями) может осуществляться специально разработанными методами формирования и обработки радиосигналов.

Для оценки *медленных флуктуаций*, которые в основном и определяют надёжность связи, указывают их особенности в зависимости от размеров территории и условий наблюдения за ними. Безусловно, такая оценка должна производиться с учётом диапазонов частот используемых радиоволн. Для современных подвижных систем и сетей радиосвязи — это радиочастоты диапазонов от очень высоких частот (ОВЧ) и выше.

Указанные флуктуации можно классифицировать на три вида: *макрофлуктуации*, *флуктуации промежуточной уровневой структуры* и *микрофлуктуации*. (Подробное исследование и описание этих структур рассматривается в [1, 4]). Поскольку *макрофлуктуации*, обусловленные рельефом местности или степенью застройки в условиях города, могут быть скорректированы при проектировании радиосистемы, то на надёжность радиосвязи основное влияние оказывают *промежуточные* и *микрофлуктуации*, проявляющиеся на участках, соответственно, сотен и десятков метров и подчиняющиеся логарифмически нормальному закону распределения со среднеквадратическими отклонениями

$$\sigma_{E_{np}} = \sigma_{20 \lg(\Delta E_{np}/E_M)}; \sigma_{E_{мик}} = \sigma_{20 \lg(\Delta E_{мик}/E_M)},$$

где ΔE_{np} и $\Delta E_{мик}$ — случайные отклонения уровня сигнала относительно медианного (среднего) значения E_M соответственно для *промежуточной* и *микроструктур*.

Заметим, что расчёты прогнозирования среднего (медианного) уровня радиосигнала по существующим эмпирическим формулам проводятся для *промежуточной* или (и) *микроструктур*.

Суммарное представление промежуточных и микрофлуктуаций в силу их независимости

происхождения может определяться вероятностями совместного их появления. При логарифмически-нормальных законах распределения их случайных значений они подчинятся «суммарному» логарифмически-нормальному закону со среднеквадратичным отклонением

$$\sigma_{\Delta E} = \sqrt{\sigma_{E_{np}}^2 + \sigma_{E_{мик}}^2}, \text{ дБ} \quad (2)$$

В качестве примера на рис. 1 в виде линии, обозначенной «Ул» (при $\Delta = 0$), приводится график распределения нормированной случайной величины ΔE (при математическом ожидании $M_{\Delta E} = 0$ относительно средней величины уровня, прогнозируемого по эмпирическим формулам) на улицах крупного города для $\sigma_{\Delta E} \approx 7,8$ дБ, соответствующего для диапазонов ОВЧ и УВЧ (очень и ультравысоких частот) радиосигналов [1, 4]. График представлен в «нормальном» масштабе со значениями вероятности $F_{\Delta E} = F_{\Delta E + \Delta}$, выраженными в процентах.

С помощью этого распределения, задавая величину вероятности $F_{\Delta E} = F_{\Delta E + \Delta}$, можно определять отклонение уровня радиосигналов относительно его среднего (медианного) значения на улицах города на заданном расстоянии R . Иными словами величина $F_{\Delta E}$ характеризует «территориальную надёжность связи».

Если оценивать изменения уровня радиосигнала при его проникновении в помещения зданий, то необходимо учитывать случайную величину затуханий $-\Delta$ при таком проникновении. Ряд экспериментов показывает, что распределения величины таких затуханий подчиняются, также, логарифмически нормальному закону [1, 4], и возможные суммарные флуктуации уровня сигнала на улицах и затуханий при проникновении в помещения $\Delta E + \Delta$ будут также подчиняться логарифмически нормальному закону $F_{\Delta E + \Delta}$, среднеквадратическое отклонение которого будет определяться, как

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\Delta E - \Delta} = \sqrt{\sigma_{\Delta E}^2 + \sigma_{\Delta}^2}, \quad (3)$$

где σ_{Δ} — среднеквадратическое отклонение распределения величины затухания радиосигнала при его проникновении в помещение зданий из улицы.

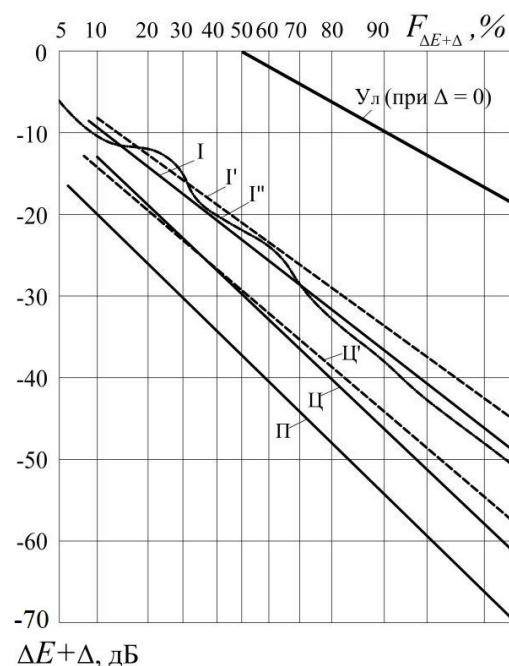


Рис. 1. Функции распределения пространственных флуктуаций уровня поля ОВЧ на улицах крупного города (Ул (при $\Delta=0$)) и проникающего в помещения зданий (первых этажей — 1, 1', 1'', цокольных этажей — Ц, Ц' и подвальных помещений — П), с учётом флуктуаций на улицах города

В качестве примера на рис. 1 представлены графики функций распределения пространственных флуктуаций уровня электромагнитного поля (радиосигнала) ОВЧ и УВЧ, проникающего в помещения зданий города. Графики, обозначенные как: П — для подвальных помещений; Ц — для цокольных этажей; I — для первых этажей, получены отечественными специалистами [5] и графики 1', Ц' (Швейцария) и 1'' (Нью-Йорк США), определённые рядом зарубежных исследователей [6].

Касаясь вопроса случайных изменений уровня сигнала во времени в заданной точке, следует указать на результаты экспериментов исследования микроструктуры поля [7]. Эти результаты показывают, что временные изменения уровня можно рассматривать как качание этой не меняющейся структуры на уровне точки исследования, которые также имеют медленный характер. Это позволяет сделать вывод, что территориальная надёжность может полно-

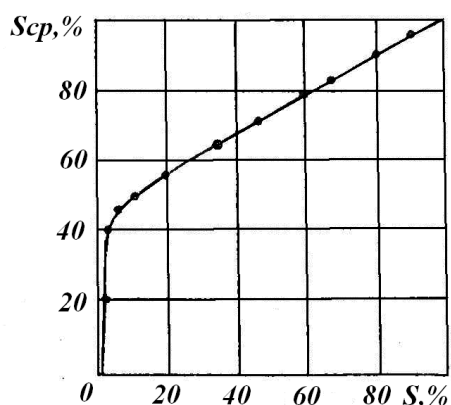


Рис. 2. Средняя надёжность в зоне действия базовой станции в зависимости от надёжности на границе этой зоны

стью характеризовать случайные изменения уровня сигнала без дополнительного учета временных флуктуаций (см. в (1): не учитываются $\Delta E_c(t, p_d)$ или $\Delta P_c(t, p_i)$), и оценку надёжности связи упрощенно можно характеризовать в виде

$$p_i \cdot 100 = F_{\Delta E + \Delta}, \% \quad (4)$$

Все вышерассмотренное должно определяться в соответствии с требованиями необходимого (минимально допустимого, порогового) уровня сигнала E_{co} в заданном месте (зоне) приёма, который определяется требованиями к допустимой вероятности ошибки приёма сигналов $p_{ош}$ и соответственно — к отношению сигнал/помеха. Для заданного E_{co} , надёжность связи может быть оценена вероятностью превышения этого порогового уровня p_{yp} уровнем сигнала в канале — E (или их равенства). При известных плотностях распределения вероятностей уровня сигнала $W(E)$ надёжность связи будет определяться (например, в процентах) интегральной функцией

$$S = p_{yp} (E \geq E_{co}) \cdot 100 = 100 \int_{E_{co}}^{\infty} W(E) dE, \% \quad (5)$$

где:

$$W(E) = W(\Delta E - \Delta) = \frac{1}{\sigma_{(\Delta E - \Delta)} \sqrt{2\pi}} \times \exp \left\{ - \frac{[(\Delta E - \Delta) - M_{(\Delta E - \Delta)}]^2}{2\sigma_{(\Delta E - \Delta)}^2} \right\} -$$

логарифмически-нормальное распределение с математическим ожиданием $M_{(\Delta E - \Delta)}$ прогнозируемого среднего значения уровня сигнала.

Другой важной характеристикой, определяющей изменение надёжность связи с удалением от БС, является зависимость средней надёжности в зоне действия радиосистемы (БС) S_{cp} от надёжности связи на границе этой зоны — S . При условии, что пространственные флуктуации подчиняются логарифмически-нормальному закону распределению, эта зависимость будет иметь вид [1, 4], показанный на рис. 2.

Определение уточнений (дополнений) методики оценки надёжности для современных и перспективно внедряемых систем подвижной радиосвязи.

Кроме рассмотренных факторов оценки надёжности по характеристикам распространения радиоволн на надёжность связи могут влиять и другие факторы, свойственные современным и внедряемым системам подвижной наземной радиосвязи

Дадим оценку основным из этих факторов.

1. В современных системах радиосвязи, в том числе сотовой связи, используются smart антенные системы, в которых в зависимости от величины трафика (A), меняющегося во времени (t) в определённых радионаправлениях связи (l), осуществляется коррекция их диаграмм направленности в соответствии с трафиком по этим направлениям. Этот процесс можно характеризовать некоторым коэффициентом $K_{ант.кор}(A, t, l)$, значения которого должны определяться трафиком и его ориентацией по направлениям с учётом технических возможностей антенных систем, особенно касающихся БС. Таким образом, при оценке территориальной надёжности необходимо учитывать эти изменения (коррекции) через значения $K_{ант.кор}(A, t, l)$. Эти коррекции могут меняться в соответствии со статистикой трафика по различным направлениям и могут характеризоваться вероятностью появления определённого

трафика в определённом направлении — $P_{1 \text{ ант.кор}}(A, t)$.

Учёт значений $K_{\text{ант.кор}}(A, t, l)$ и $P_{1 \text{ ант.кор}}(A, t)$ при оценке надёжности связи может или для конкретной величины $P_{1 \text{ ант.кор}}(A, t)$, или как интервал надёжности связи от минимальной до максимальной величин S , или только для минимальной величины S , позволяющей скорректировать энергетические параметры радиосистемы для достижения требуемого значения S .

2. Также следует отметить возможные изменения уровня радиопомех как индустриального характера, так и за счёт возможного влияния сигналов с радиочастотами, повторно используемыми за пределами одного кластера в другом (при сотовой связи). Такие изменения могут повлиять на требуемую величину (порогового) уровня радиосигналов $E_{\text{со}}$, значение которого, как указывалось выше, определяется из условия необходимого отношения сигнал/помеха. Такое влияние можно характеризовать некоторым коэффициентом изменения уровня помех $\beta_{\text{пом}}$. При этом надо обращать внимание на разнообразие используемых диапазонов радиоволн в современных видах радиосвязи, которые могут отличаться не только характеристиками их распространения, а также видом, наличием и уровнем радиопомех.

3. Еще одним фактором, влияющим на надёжность связи, является абонентская доступность как к системе связи (и в том числе к каналам связи), так и в самом процессе организации связи. Так, при выборе требований к количеству каналов связи (как правило большинство систем являются системами с потерями), определяемым по зависимостям Эрланга, задаётся величина вероятности блокировки $p_{\text{БЛ}}$ вызова (вероятность отказов в связи). Например, в сотовой связи принято $p_{\text{БЛ}} = 0,05$.

4. Другой фактор, характерный для современных систем радиосвязи (и особенно для сотовой связи последних поколений) — это автоматическое перераспределение энергетики в радиосигналах, приходящейся на одного абонента, в зависимости от изменяющейся трафи-

ковой нагрузки в радиоканале. Эти изменения можно оценить на основании статистических данных о таких изменениях энергетики вероятностью их появления — $p_{\text{вар,эн.с.а}}$.

5. Вышеуказанные факторы (параметры) большей частью взаимно независимы и могут характеризоваться значениями вероятности их появления, в связи с чем суммарное их влияние на надёжность связи может оцениваться на принципах, использованных выше в выражениях (2) и (3) с учётом статистических особенностей каждого из определяемых параметров. Все эти вероятностные параметры можно объединить в некоторую систему (6), в которой значения этих параметров должны задаваться таким образом

$$p_i \cdot 100 = F_{\Delta E + \Delta, \%};$$

$$E_{\text{со}}; \beta_{\text{пом}}; P_{1 \text{ ант.кор}}(A, t);$$

$$K_{\text{ант кор}}(A, t, l); p_{\text{БЛ}}; p_{\text{вар эн.с.а}}, \quad (6)$$

чтобы итоговое их использование при расчётах удовлетворяло требуемой надёжности связи.

Каковы могут быть значения этих параметров? Безусловно, они должны определяться видом и особенностью требований к радиосвязи. Например, в сотовой связи своеобразным ориентиром может служить вводимая в исходных условиях (параметрах) величина вероятности блокировки вызова $p_{\text{БЛ}}$ (вероятность отказов в связи). Как указывалось выше, в сотовой связи принято значение $p_{\text{БЛ}} \leq 0,05$. На основании принципов определения суммарной (итоговой) вероятности, определяющей надёжность связи, очевидно, что значения других обозначенных выше параметров должно быть меньше этой величины.

Завершая оценку надёжности связи нельзя не коснуться вопроса об её предназначении как параметра, входящего в определение устойчивости и живучести сети (системы) радиосвязи. Так, к примеру, коррекция величины надёжности связи может потребовать специальных мер по поддержанию заданных требований к устойчивости и живучести различного рода радиосетей.

Заключение

В связи с усовершенствованием современных систем подвижной радиосвязи за счёт автоматически адаптивно меняющихся параметров передачи-приёма радиосигналов (в зависимости трафиковой нагрузки и её изменений по радионаправлениям), существующая методика оценка надёжности радиосвязи только на основе территориальной надёжности радиосвязи является недостаточной и для более полной оценки обоснована необходимость дополнительного введения и учета следующих предлагаемых параметров:

- для учёта изменения порогового (требуемого) уровня сигнала E_{co} из-за изменения уровня радиопомех через параметр — $\beta_{пом}$,

- учёта значений вероятности блокировки вызова — $p_{БЛ}$,

- величины автокоррекции диаграмм направленности антенн радиоустройств по направлениям в зависимости от величины изменения трафика $K_{ант.кор}(A, t, l)$ и вероятности этой коррекции в направлениях организуемой радиосвязи (передачи) $P_{ант.кор}(A, t)$,

- вероятности изменения энергетики радиосигналов, приходящейся на одного абонента (что особенно характерно для последних поколений сотовой связи) — $p_{вар.эн.с.А}$.

Определение величин этих вводимых параметров требует дополнительных оценок, в основном статистического характера с учётом особенностей вида и назначения подвижной

наземной радиосвязи. Большая часть из вводимых параметров являются взаимно независимыми, для которых независимы и вероятностные характеристики их проявления. Суммарное влияние таких параметров на надёжность связи может оцениваться на принципах, использованных выше для территориальной надёжности радиосвязи.

Литература

1. Туляков Ю.М. Пространственная надёжность прохождения радиосигналов со сложной многолучевой структурой распространения в условиях города (на улицах и при проникновении в помещения) // Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. №5/1. С. 75–84.
2. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами // Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2002. 440 с.
3. Ли У. Техника подвижных систем связи: Пер. с англ. // Под ред. Пышкина И.М. М.: Радио и связь, 1985. 395 с.
4. Туляков Ю.М. Системы персонального радиовызова. М.: Радио и связь, 1988. 168с.
5. Туляков Ю.М. Статистика затуханий уровня электромагнитного поля ОВЧ при проникновении в помещения зданий города // Технологии ЭМС. 2009. №2 (29). С. 85–89.
6. Rise L.P. Radio transmission into Buildings at 35 and 150 mc // The Bell System Technical Journal. Jan. 1959. Pp. 197–210.
7. Туляков Ю.М. К вопросу учёта взаимосвязи пространственных и временных флуктуаций уровня сигнала при оценке надёжности подвижной наземной радиосвязи. Сборник материалов XXVIII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2022). Н. Новгород: НГТУ. Апр. 2022 г. С. 150–158.

Поступила 15 декабря 2023 г.

English

ON RELIABILITY ASSESSMENT OF LAND MOBILE RADIO COMMUNICATION

Yuri Mikhailovich Tulyakov — Grand Dr. in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Infocommunication and General Professional Disciplines of the Volga-Vyatka Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (VVF MTU-CI); Professor of the Department "Electronics and Computer Networks" of the Institute Radioelectronics and Information Technologies (IRIT) Nizhny Novgorod State Technical University (NSTU) named after R.E. Alekseev.

E-mail: yu.m.tulyakov@rambler.ru

Valentin Ivanovich Esipenko — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Professor of the Department of Electronics and Computer Networks of the Institute Radio Electronics

and Information Technology (IRIT) Nizhny Novgorod State Technical University (NSTU) named after R.E. Alekseev.

E-mail: esipenko@nntu.ru

Address: 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky St., 87.

Abstract: One of the most critical parameters in land mobile radio communication systems is its reliability in terms of coverage and time. The existing methods of reliability assessment involve mainly radio wave propagation characteristics and mainly in this radio communication coverage area, i.e. the area (spatial) reliability of radio communication. However, reliability assessment methods for radio communication need to be refined (updated) in current and newly created mobile radio communication systems with introduced self-controlled system operation methods due to traffic changes both in the radio channel (adaptively changing radio signal parameters) and in the radio communication routes. This requires extra research to define and keep records of these innovations for communication reliability assessment. That said each innovation should be estimated as a certain independent factor (parameter), which could be characterized mostly by a statistical (probabilistic) value. And each such value (regardless of other similar values) is taken into account when estimating the final reliability of radio communication based on the principles similar to the existing assessment principles for the radio communication area reliability. This paper not only defines extra research trends of these innovations' effect on today's mobile radio communication systems but it also examines the principles of the existing assessment methods for communication reliability, upon which and using which it is possible to determine optional parameters of such innovations for the final updated assessment of radio communication reliability. This approach can also be useful to assess self-organizing radio communication systems and to determine special measures for maintaining specified requirements for stability and fail-safety of various radio networks.

Keywords: radio communication reliability, radio waves, probability distribution functions of random variables, radio signal strength fluctuation.

References

1. *Tulyakov Yu.M.* Spatial reliability of the passage of radio signals with a complex multipath propagation structure in urban conditions (on the streets and when entering premises). Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. No. 5. Part 1. 2010. Pp. 75–84.
2. *Makoveeva M.M., Shinakov Yu.S.* Communication systems with moving objects. Textbook for universities. Moscow: Radio i Svyaz', 2002. 440 p.
3. *Lee U.* Technique of mobile communication systems: Trans. from English. Ed. Pyshkina I.M. Moscow: Radio i Svyaz', 1985. 395 p.
4. *Tulyakov Yu.M.* Personal radio call systems. Moscow: Radio i Svyaz', 1988. 168 p.
5. *Tulyakov Yu.M.* Statistics of attenuation of the VHF electromagnetic field level when penetrating into the premises of city buildings. EMC technologies. 2009. No. 2 (29). Pp. 85–89.
6. *Rise L.P.* Radio transmission into Buildings at 35 and 150 mc. The Bell System Technical Journal. Jan. 1959. Pp. 197–210.
7. *Tulyakov Yu.M.* On the issue of taking into account the relationship between spatial and temporal fluctuations of the signal level when assessing the reliability of mobile terrestrial radio communications. Collection of materials of the XXVIII International Scientific and Technical Conference "Information Systems and Technologies" (IST-2022). N. Novgorod: NSTU, April 2022. Pp. 150–158.