

---

---

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.391.827

## Электромагнитная совместимость беспроводных устройств малого радиуса действия

**В.А. Корчагин**, аспирант, e-mail: [vkorchagin@mail.ru](mailto:vkorchagin@mail.ru)

ФГОУ ВПО «Российский государственный университет туризма и сервиса», г. Москва

Проведен анализ проблем электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования SRD на примере устройств, выполненных по технологии Bluetooth и работающих в диапазоне частот 2,45 ГГц; получена методика расчета защитного расстояния от воздействующих помех, приводящих к блокированию приемных Bluetooth-устройств; показано, что с увеличением величины рабочего цикла FHSS-устройств для недопущения блокировки приемных Bluetooth-устройств должны возрастать не только значения ОСШ, но и защитные расстояния.

The author examines electromagnetic compatibility of radio electronic SRD equipment on the example of devices using Bluetooth technology, operating at frequencies of 2.45 GHz. The research establishes a new method for calculating the protective distance from the noise effect that results in blocking of receiving Bluetooth devices. This article shows that in order not to block the receiving devices, both the values of SNR and also the protective distance should increase along with the growing value of the working cycle in the FHSS devices.

**Ключевые слова:** беспроводной доступ, электромагнитная совместимость, защитное расстояние, внутриканальные помехи, блокирование.

**Key Words:** wireless, electromagnetic compatibility, protective distance, intracanal interference, blocking.

Одними из ключевых технологий в современной концепции построения и развития сетевых телекоммуникационных инфраструктур являются технологии беспроводного доступа с малым радиусом действия SRD (Short Range Devices). Наибольший эффект от внедрения этих технологий можно получить в тех областях промышленности, где требуются сбор и обработка большого числа одновременно измеряемых параметров. Внедрение технологий SRD в эти области позволит не только упростить взаимодействие между различным оборудованием и периферийными устройствами, но и заменить традиционные проводные соединения на беспроводные каналы.

Учитывая высокую плотность размещения устройств SRD в ограниченном пространстве, важнейшей проблемой является обеспечение их электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими радиоэлектронными средствами (РЭС), работающими с этими устройствами в одном частотном диапазоне в зоне их действия.

Пусть в зоне действия SRD работает радиоэлектронное оборудование, использующее, как

и Bluetooth-устройства, скачкообразную перестройку частоты FHSS (Frequency Hop Spread Spectrum). В дальнейшем данное радиоэлектронное оборудование будем обозначать как FHSS-устройство.

### Расчет защитного расстояния от внутриканальных помех

Если предположить, что перестройка частоты приостановлена, то на основе традиционной модели распространения радиоволн можно рассчитать защитные расстояния  $L_{\text{защ}}$  между мешающим радиоэлектронным оборудованием и Bluetooth-приемником как в случае возникновения помех в совпадающем канале (внутриканальные помехи), так и в случае его блокирования (уменьшения усиления полезного сигнала во входном тракте приемника, вызванного действием интенсивного мешающего сигнала, частота которого находится вне основного канала приема).

В табл. 1 приведены некоторые защитные расстояния для устройств Bluetooth при воздействии на них различных источников помех [1], где SRD – Short Range Devices; CATV – Community Antenna TeleVision; RLAN – Radio Local Area Network; ENG/

OB – Electronic News Gathering/Outside Broadcasting;  
RFID – Radio frequency identification devices.

**Таблица 1.** Защитные расстояния для устройств Bluetooth при 100%-ном рабочем цикле

Источники помех	Характер помех	Защитное расстояние, м
SRD, CATV	Внутриканальные	35,7
RLAN, DSSS	Внутриканальные	44
Узкополосные SRD	Блокирование	1,5
RLAN, FHSS	Блокирование	4,9
RFID, FHSS	Блокирование	24,3

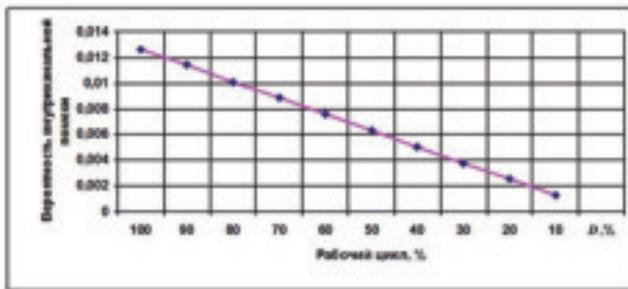
Следует отметить, что в расчетах, приведенных в табл. 1, предполагался наихудший случай, когда рабочий цикл источников помех равнялся 100% (т.е. источники помех воздействовали на Bluetooth-устройства в течение 24 часов в сутки). Однако проведенные исследования показали, что, как правило, рабочий цикл составляет всего лишь 15% [2].

Вероятность внутриканальной помехи для канала Bluetooth от одного источника помех (FHSS-устройства) может быть найдена как [2]

$$P_{\text{вн } 1} = DN^{-1},$$

где  $D$  – рабочий цикл FHSS-устройства;  $N$  – число скачков частоты устройств технологии Bluetooth.

Зависимость вероятности внутриканальной помехи пикосети Bluetooth от величины рабочего цикла FHSS-устройств представлена на рис. 1.



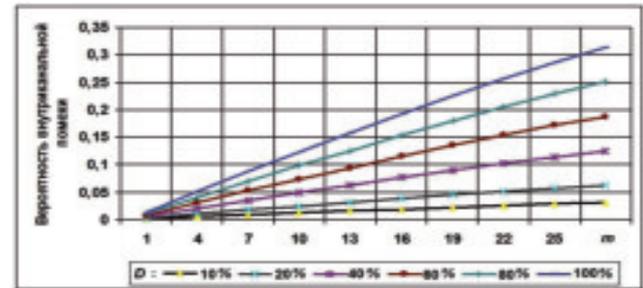
**Рис. 1.** Зависимость вероятности внутриканальной помехи от рабочего цикла

Из представленной зависимости видно, что с уменьшением величины рабочего цикла мешающих устройств вероятность внутриканальной помехи также уменьшается.

С ростом числа источников помех  $m$  вероятность внутриканальной помехи в пикосети Bluetooth увеличивается и может быть найдена исходя из выражения

$$P_{\text{вн } i} = D \left( 1 - \left[ (N - 1) N^{-1} \right]^m \right).$$

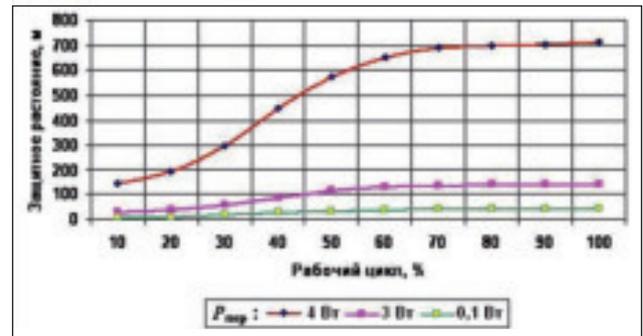
Зависимость вероятности внутриканальной помехи в пикосети Bluetooth от числа источников помех, вызванных FHSS-устройствами, для различных значений величины рабочего цикла представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость вероятности внутриканальной помехи от числа источников помех

Исследования показывают, что величина рабочего цикла мешающего устройства оказывает влияние не только на вероятность появления внутриканальной помехи, но и на значение защитного расстояния.

В результате моделирования были получены зависимости защитного расстояния Bluetooth-устройств (при недопущении появления внутриканальной помехи) от рабочего цикла различных мешающих устройств (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимость защитного расстояния от величины рабочего цикла мешающего устройства при различных значениях мощности его передатчика

Заметим, что в рассмотренных случаях внутриканальная помеха не приводила к снижению пропускной способности ниже 90%, так как более 90% спектра оставалось свободной от помех.

**Расчет защитного расстояния от блокирования**  
Определим величину защитного расстояния, позволяющего избежать блокировки Bluetooth-устройств помехами, вызванными работой различных FHSS-устройств, мощность которых, как правило, значитель-

но больше, чем мощность Bluetooth-устройств. Например, к таким устройствам можно отнести устройства радиочастотной идентификации RFID, мощность передатчика которого может составлять 4 Вт.

Согласно проведенным в [3] расчетам, при постоянной работе RFID и Bluetooth-устройств защитное расстояние от блокирования приемника Bluetooth-устройствами RFID составляет около 24 м при отношении сигнал/шум (ОСШ) не менее -33 дБ. Однако проведенные исследования показали, что в зависимости от величины рабочего цикла минимальные значения ОСШ для различных типов передатчиков RFID, создающих помехи, которые блокируют работу Bluetooth-устройств, меняются, что, в свою очередь, ведет к изменению величины защитного расстояния. При уменьшении рабочего цикла источников помех защитное расстояние обеспечивается при более низких значениях величины ОСШ.

На рис. 4 приведены зависимости минимальных значений ОСШ и защитных расстояний для Bluetooth-устройств, рассчитанных с помощью модели распространения для наихудшего случая, от величины рабочего цикла мешающих устройств RFID с мощностью передатчика 4 Вт [1, 4].

Из приведенных на рис. 4 графиков видно,

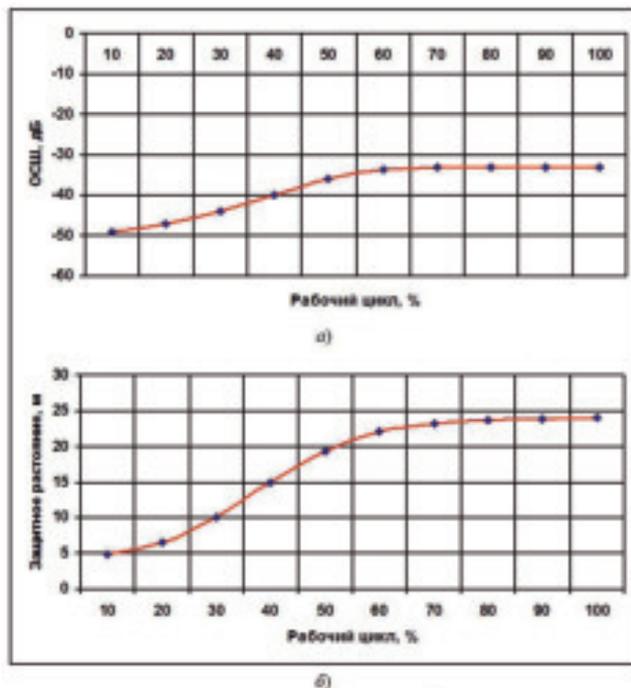


Рис. 4. Зависимость минимальных значений ОСШ (а) и защитного расстояния (б) от величины рабочего цикла устройства RFID с мощностью передатчика 4 Вт

что для 15%-го рабочего цикла защитный интервал обеспечивается при более низких значениях ОСШ, при этом уменьшение величины ОСШ может достигать 15 дБ.

В результате моделирования были получены зависимости минимально допустимых значений ОСШ и защитного расстояния для Bluetooth-устройств от величины рабочего цикла мешающих FHSS-устройств при различных значениях мощности их передатчиков  $P_{пер}$  для наихудшего случая, когда на пути мешающего сигнала отсутствуют препятствия для его распространения (рис. 5).

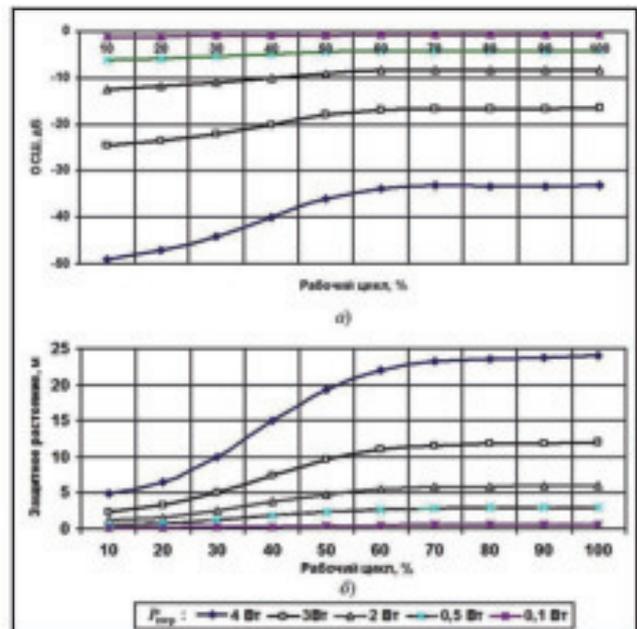


Рис. 5. Зависимости минимальных значений ОСШ (а) и защитного расстояния (б) для Bluetooth-устройства от величины рабочего цикла устройства RFID при различных значениях мощности его передатчика

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением рабочего цикла FHSS-устройств для недопущения блокировки Bluetooth-устройств должны возрастать как значения ОСШ, так и защитные расстояния.

Кроме того, величина защитного расстояния существенно зависит от мощности передатчика мешающего FHSS-устройства  $P_{пер}$ , влияющей на ОСШ. Зависимости защитного расстояния от мощности мешающего передатчика FHSS-устройства при различных значениях величины рабочего цикла Bluetooth-устройств представлены на рис. 6.

Из представленных зависимостей видно, что, чем выше мощность мешающего FHSS-устройства,

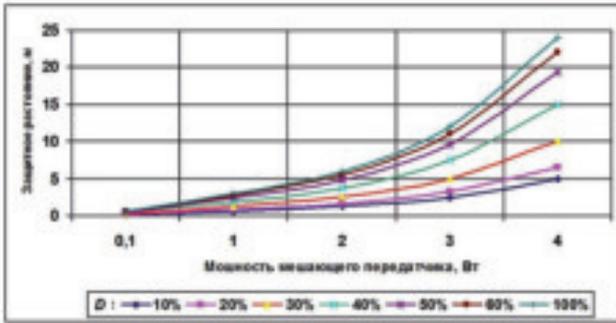


Рис. 6. Зависимости защитного интервала от мощности передатчика FHSS-устройства при различных значениях величины рабочего цикла

тем больше должна быть величина защитного расстояния  $L_{защ}$  при одних и тех же значениях рабочего цикла  $D$ .

**Расчет защитного расстояния с учетом боковых лепестков диаграммы направленности мешающих устройств**

При совместном размещении FHSS- и Bluetooth-устройств внутри помещений необходимо учитывать не только направление главного лепестка диаграммы направленности приемопередающих антенн FHSS-устройств, но и их боковых лепестков (рис. 7).

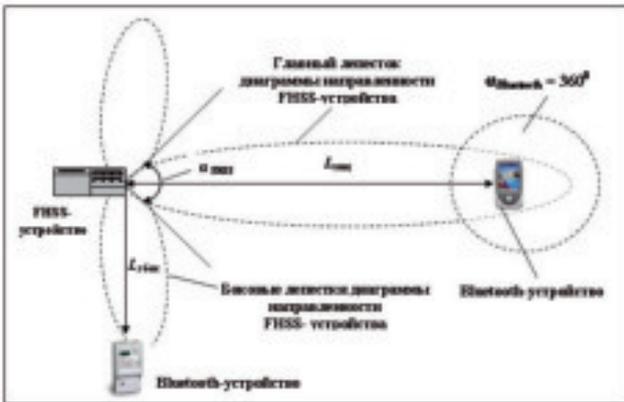


Рис. 7. Влияние расположения лепестков диаграммы направленности FHSS-устройства на работу Bluetooth-устройств

Экспериментальные исследования показывают, что защитный интервал от помех, воздействующих на Bluetooth-устройства через боковой лепесток FHSS-устройства со 100%-ным рабочим циклом и приводящих к возникновению внутриканальных помех, может быть уменьшен очень значительно.

На рис. 8 представлены зависимости защитного расстояния при воздействии источников помех на Bluetooth-устройства через боковые лепестки диаграммы направленности антенны FHSS-

устройства от величины рабочего цикла и мощности передающего оборудования FHSS-устройств для наилучшего случая.

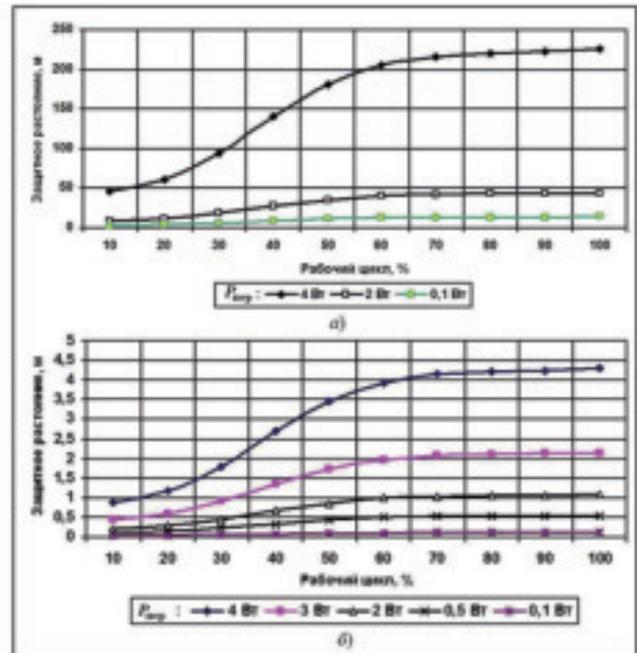


Рис. 8. Защитное расстояние при воздействии источников помех на Bluetooth-устройства через боковой лепесток диаграммы направленности антенны FHSS-устройств: а – от внутриканальных помех; б – от блокирования

Из представленных зависимостей видно, что при воздействии источников помех на Bluetooth-устройства через боковые лепестки диаграммы направленности антенны FHSS-устройства защитные расстояния при одной и той же мощности мешающего сигнала могут быть значительно уменьшены. Так, предельно допустимое расстояние для борьбы с возникновением внутриканальных помех может быть уменьшено более чем в три раза, для борьбы с блокированием Bluetooth-устройств – более чем в пять раз. Кроме того, с учетом того, что рабочий цикл составляет 15%, защитные расстояния могут быть уменьшены еще почти в четыре раза.

**Расчет вероятности появления интермодуляционных помех**

Поскольку в передающем оборудовании FHSS используют скачкообразную перестройку частоты, существует вероятность того, что при определенной разности частот появится интермодуляционная составляющая помехи на частоте приемника Bluetooth-устройства.

В соответствии со спецификациями Bluetooth два передатчика могут создавать интермо-

дуляционные помехи для Bluetooth-устройств, если каждый из них имеет уровень помех  $-39$  дБм [5]. В этом случае, используя модель потерь уровня сигнала при распространении, можно определить как защитное расстояние  $L_{защ}$ , так и защитную область  $S_{защ}$  от интермодуляционных помех, которые будут следующими:  $L_{защ} = 35$  м и  $S_{защ} = 3\,848$  м<sup>2</sup>.

Вероятность появления интермодуляционных помех второго порядка  $P_{B2}$  от двух FHSS-устройств, работающих на частотах внутри двух полос, находящихся выше и ниже полосы приемника Bluetooth-устройства, может быть найдена как

$$P_{B2} = 2N^{-1} = 2/79 = 2,53 \cdot 10^{-2}.$$

Вероятность совпадения главного луча диаграммы направленности передающей антенны источника помех FHSS-устройства с диаграммой приемника помех Bluetooth-устройства (см. рис. 7) может быть найдена из соотношения

$$P_{FHSS} = \alpha_{FHSS} / \alpha_{Bluetooth},$$

где  $\alpha_{FHSS}$  и  $\alpha_{Bluetooth}$  – соответственно угол диаграммы направленности антенны передающего FHSS-устройства и приемника помех Bluetooth-устройства ( $\alpha_{Bluetooth} = 360^\circ$ ).

Зависимость вероятности совпадения главного луча  $P_{FHSS}$  с приемником помех Bluetooth-устройством от угла диаграммы направленности антенны передающего FHSS-устройства представлена на рис. 9.



Рис. 9. Зависимость  $P_{FHSS}$  от угла  $\alpha_{FHSS}$

Из графика видно, что чем больше угол диаграммы направленности антенны передающего FHSS-устройства, тем больше вероятность совпадения главного луча диаграммы направленности передающей антенны FHSS-устройства с диаграммой направленности приемника помех Bluetooth-устройства.

Вероятность появления интермодуляционных помех третьего порядка  $P_{B3}$  может быть найдена как

$$P_{B3} = 1 - (1 - P_{B2} P_{FHSS} P_{T\,FHSS})^M,$$

где  $P_{T\,FHSS}$  – вероятность совпадения по времени действия передающего FHSS-устройства с приемником помех (т. е. Bluetooth-устройством);  $M$  – число мешающих FHSS-устройств, находящихся внутри защитного интервала Bluetooth-устройства.

Зависимость вероятности интермодуляционных помех третьего порядка от числа мешающих FHSS-устройств внутри защитного интервала представлена на рис. 10.

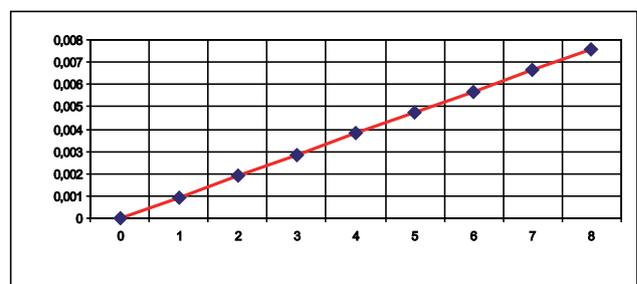


Рис. 10. Зависимость вероятности интермодуляционных помех от числа мешающих устройств внутри защитного интервала

Из приведенного графика видно, что вероятность появления интермодуляционных помех для Bluetooth-устройств возрастает прямо пропорционально увеличению числа мешающих FHSS-устройств.

Воспользовавшись методикой расчета, предложенной Европейским комитетом радиосвязи [4], в результате моделирования были получены графики вероятности интермодуляционных помех, как создаваемых Bluetooth-устройствами различным РЭС, так и создаваемых радиоэлектронными системами, работающими в диапазоне 2,45 ГГц, самим Bluetooth-устройством. Результаты моделирования представлены на рис. 11–12, где SRD1,2 – устройства SRD, 10 мВт,  $D = 100\%$ , соответственно 1 – узкая полоса, 2 – широкая (аналоговое видео); R-LAN1 (FHSS) – устройства R-LAN1, 100 мВт, FHSS,  $D = 100\%$ ; R-LAN2 (DSSS) – устройства R-LAN2, 100 мВт, DSSS,  $D = 100\%$ ; RFID(500мВт)100%FHSS – устройства RFID, 500 мВт, FHSS, BW = 8 МГц,  $D = 100\%$ ; RFID(100мВт)100% – устройства RFID, 100 мВт, узкая полоса,  $D = 100\%$ .

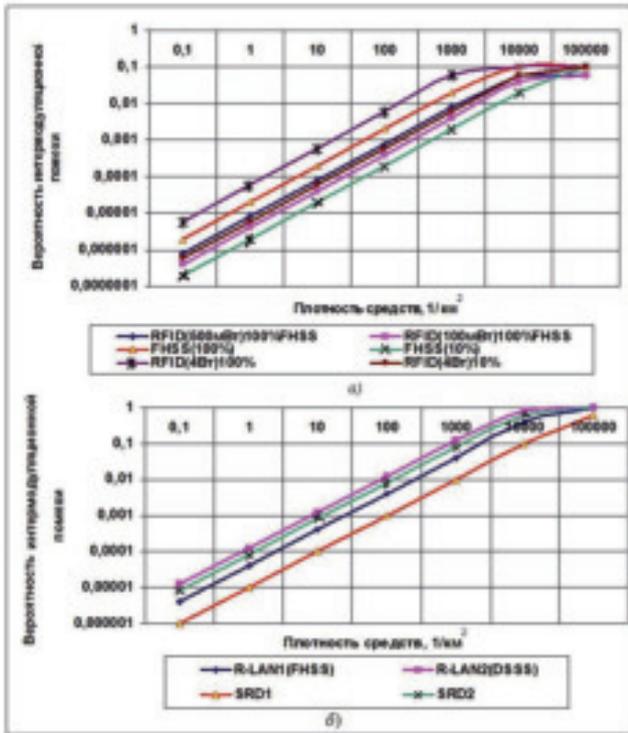


Рис. 11. Суммарная вероятность интермодуляционных помех для Bluetooth-устройств от радиоэлектронных систем диапазона 2,45 ГГц: а – RFID, FHSS; б – R-LAN; SRD

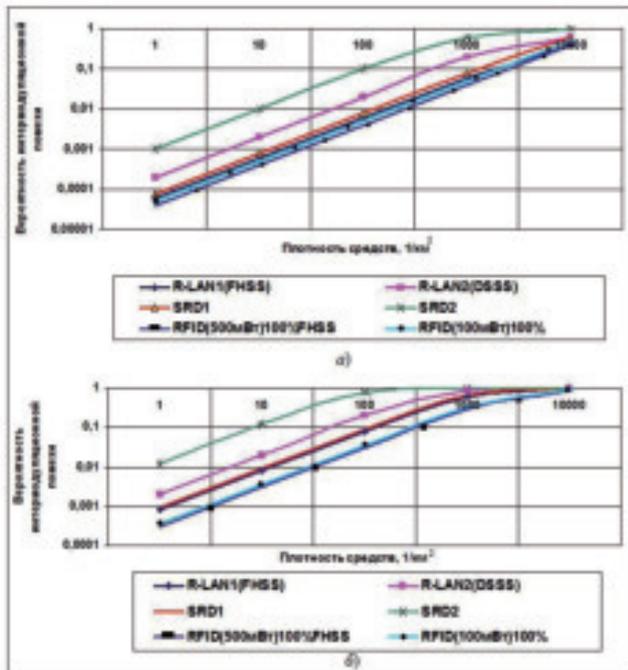


Рис. 12. Суммарная вероятность интермодуляционных помех от Bluetooth-устройств для радиоэлектронных систем диапазона 2,45 ГГц при ЭИИМ Bluetooth: а – 1 мВт; б – 100 мВт

Из представленных зависимостей видно, что в общем случае с увеличением плотности размещения радиоэлектронных систем диапазона 2,45 ГГц возрастает как вероятность суммарных интермодуляционных помех, создаваемых ими Bluetooth-устройствами, так и вероятность интермодуляционных помех, создаваемых самими Bluetooth-устройствами радиоэлектронным системам. Причем данная вероятность зависит прямо пропорционально от мощности передающих устройств, которые создают эти помехи, и обратно пропорционально от мощности устройств, которым создаются эти помехи.

Кроме того, вероятность суммарных интермодуляционных помех напрямую зависит как от величины рабочего цикла передающего оборудования, создающего помехи, так и от величины рабочего цикла устройств, принимающих эти помехи. Чем меньше величина рабочего цикла передающего и приемного оборудования, тем меньше вероятность суммарных интермодуляционных помех.

Заметим, что результаты моделирования хорошо согласуются с результатами исследований, изложенными в [1, 4].

Таким образом, были проанализированы проблемы электромагнитной совместимости Bluetooth-устройств с различным радиоэлектронным оборудованием, работающим в зоне действия пикосети Bluetooth, в диапазоне частот 2,45 ГГц. Осуществлен расчет уровней внутриканальных помех приемных Bluetooth-устройств при работе в непосредственной близости от передающего FHSS-устройства. Получены зависимости вероятности внутриканальной помехи от величины рабочего цикла и числа источников помех FHSS-устройств. Показано, что вероятность внутриканальной помехи приемных Bluetooth-устройств увеличивается не только с ростом численности FHSS-устройств, но и с увеличением величины их рабочего цикла.

Получена методика расчета защитного расстояния от воздействующих помех, приводящих к блокированию приемных Bluetooth-устройств. Показано, что с увеличением величины рабочего цикла FHSS-устройств для недопущения блокировки приемных Bluetooth-устройств должны возрастать не только значения ОСШ, но и защитные расстояния.

Показано, что при совместном функционировании радиоэлектронного оборудования FHSS и Bluetooth-устройств необходимо учитывать не только направление главного лепестка диаграммы направленности приемопередающих антенн FHSS-устройств, но и их боковых лепестков. Показано, что для бокового лепестка FHSS-устройств со 100%-ным рабочим циклом защитный интервал от помех, воздействующих на Bluetooth-устройства внутри канала при одной и той же мощности мешающего сигнала, может быть уменьшен в три раза, при полном блокировании – более чем в пять раз.

Осуществлен расчет вероятности появления интермодуляционных помех от FHSS-устройств в рабочей полосе частот Bluetooth-устройств. Показано, что в общем случае с увеличением плотности радиоэлектронного оборудования диапазона 2,45 ГГц вероятность суммарных помех, создаваемых как самими Bluetooth-устройствами, так и FHSS-устройствами, возрастает. Причем данная вероятность зависит прямо пропорционально от мощности передающих устройств, создающих эти помехи, и обратно пропорционально от мощности устройств, которым эти помехи создаются.

Кроме того, вероятность суммарных интермодуляционных помех напрямую зависит как от величины рабочего цикла передающего оборудования, создающего помехи, так и от величины рабочего цикла устройств, принимаю-

щих эти помехи. Чем меньше величина рабочего цикла передающего и приемного оборудования, тем меньше вероятность суммарных интермодуляционных помех.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васехо Н.В., Дудуки С.Н., Тихвинский В.О. Особенности использования и проблемы обеспечения ЭМС технологии BLUETOOTH // Мобильные системы, 2002, № 4.
2. ERC Decision of 12 March 2001 on harmonized frequencies, technical characteristics and exemption from individual licensing of Non-specific Short Range Devices operating in the frequency band 2400–2483.5 MHz (ERG/DEC/(01)05).
3. Зяблов Д.С., Григорьян И.В. Электротехнический расчет защитного расстояния от блокирования приемных устройств малого радиуса действия // Научные исследования в области информационных технологий: Сб. докл. на международных конференциях Московского университета сервиса в 2003 г. / под ред. В.М. Артюшенко, В.К. Душина. – М.: МГУС, 2003.
4. Compatibility of Bluetooth with other existing and proposed Radio communication Systems in the 2.45 GHz frequency band. – ERC Report 109, October 2001.

*Поступила 08.12.2009 г.*

УДК 621.396.2

# Система сервиса с изменяющимся числом элементов обслуживания

**Советов В.М.**, д.т.н., с.н.с., профессор, e-mail: [sovetoovm@mail.ru](mailto:sovetoovm@mail.ru)

ФГОУ ВПО «Российский государственный университет туризма и сервиса», г. Москва

Представлены выражения для расчета эффективности системы сервиса с изменяющимся числом элементов обслуживания. This article presents formulas for calculating the efficiency of the service system with a variable number of service elements

**Ключевые слова:** системы массового сервиса, клиент, элемент обслуживания, интенсивность поступления клиентов, интенсивность обслуживания.

**Key Words:** system of mass service, customer, service element, intensity of incoming customers, service intensity.

Как правило, клиенты прибывают в систему сервиса с разной интенсивностью. Частота прибытия клиентов зависит от времени суток (например, в магазин) или сезона (например, в турфирму). Если система сервиса состоит из ограниченного числа элементов обслуживания, то в периоды повышения интенсивности поступления клиентов образуется очередь. В случае превышения длины очереди определенного значения клиенты могут покинуть данную систему сервиса и поискать другую, т.е. происходит потеря клиентов. Чтобы избежать подобных потерь, необходимо или повышать интенсивность обслуживания путем внедрения средств автоматизации, или просто увеличивать число элементов обслуживания, что влечет за собой увеличение соответствующих расходов. Для уменьшения затрат целесообразно использовать дополнительные элементы обслуживания лишь в моменты повышения интенсивности прихода клиентов.

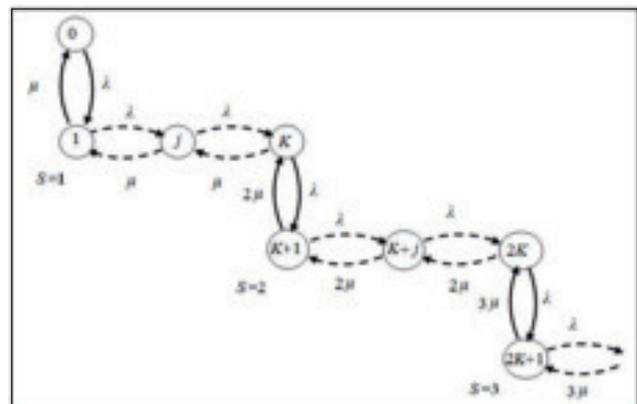
Рассмотрим систему массового сервиса (СМС), в которой для повышения эффективности обслуживания в зависимости от длины очереди изменяется число элементов обслуживания.

Введем следующие обозначения:  $K$  – максимально допустимое число клиентов в очереди на один элемент обслуживания;  $S$  – число элементов обслуживания. Клиенты прибывают в СМС по пуассоновскому закону с интенсивностью  $\lambda$ , обслуживание каждым элементом обслуживания осуществляется за время, распределенное по экспоненциальному закону с параметром  $m$ . Таким образом, приведенная нагрузка на систему равна  $\psi = \lambda/\mu$ .

В начале работы СМС обслуживание клиентов осуществляется одним элементом обслуживания. Если число клиентов в очереди превысит  $K$ , то увеличивается число элементов обслуживания

на 1. В общем случае число элементов обслуживания может расти до бесконечности. При увеличении числа элементов обслуживания возрастает интенсивность обслуживания и число клиентов в очереди уменьшается. Как только число клиентов на один элемент обслуживания становится равным  $K$  с учетом обслуживаемых клиентов, один элемент обслуживания убирается.

На рис. 1 показан граф состояний рассматриваемой СМС в стационарном режиме работы, где кружками обозначены состояния СМС, соответствующие числу клиентов (заявок) в системе, а дугами – переходы из одного состояния в другое с интенсивностью, обозначенной над дугой. Дуги, изображенные пунктиром, показывают, что от одного состояния до другого может быть несколько промежуточных состояний с такой же интенсивностью перехода.



**Рис. 1.** Граф состояний СМС с изменяющимся числом элементов обслуживания

Условия локального баланса выполняются [1], поэтому составим систему уравнений стационарных состояний, используя разрезы графа, и выразим все вероятности через  $P_0$ :