

УДК 537.874

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ РАДИОВОЛН ВНУТРЬ ЗДАНИЯ**

**А. Н. Катруша**

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»**

Статья получена 1 марта 2015 г.

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований коэффициентов экранирования металлизированных тканей и оконных рольставен при распространении радиоволн диапазона частот 1-6 ГГц с улицы в комнату многоэтажного здания. Проведен сравнительный анализ результатов измерений, полученных в лабораторных условиях и на реальной трассе распространения радиоволн.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, электромагнитное экранирование, экспериментальные исследования.

**Abstract.** The results of experimental researches of factors of shielding of the metalized fabrics and window shutters are resulted when the radio wave propagation in the frequency range of 1-6 GHz from the street into the room of a many-storied building. The comparative analysis of measurement results received in laboratory conditions and on a real propagation path of radio waves is carried out.

**Keywords:** propagation of radio waves, electromagnetic shielding, experimental researches.

### **Введение**

Оценка уровней напряженности поля при прохождении радиоволн с улицы в здание необходима при решении важных практических задач организации радиоподавления мобильных средств связи, защиты радиоэлектронной аппара-

туры от преднамеренного воздействия мощными СВЧ излучениями и сверхкороткими импульсными электромагнитными полями [1, 2]. При этом для ослабления электромагнитных полей могут применяться как специализированные экранирующие материалы, например, металлизированные ткани, так и элементы строительных и защитных конструкций здания.

Значения коэффициентов экранирования металлизированных тканей можно найти в технических характеристиках [3, 4], но эти данные соответствуют определенным лабораторным условиям и не могут применяться на практике для выполнения предварительных оценок эффективности экранирования помещений.

В настоящее время существуют различные статистические методики оценки ослабления сигналов при прохождении радиоволн в здание [5-7], основанные на результатах многочисленных экспериментов. Однако такие методики не позволяют прогнозировать уровень сигнала внутри здания при наличии на трассе распространения радиоволн экранирующих материалов.

В связи с этим результаты экспериментальных исследований характеристик экранирующих материалов на типовых трассах распространения радиоволн актуальны как при оценке эффективности экранирования помещений, так и при уточнении статистических моделей распространения радиоволн.

### **Измерительная установка и условия проведения экспериментов**

При проведении измерений использовалось следующее оборудование: генератор сигналов R&S SMA-100 A (передатчик), анализатор спектра R&S FSU-26 (приемник) и рупорные антенны П6-23М. Для измерений был выбран диапазон частот 1-6 ГГц актуальный для различных мобильных систем связи и приложений. Исследования выполнялись в два этапа: 1 этап – лабораторные измерения в комнате размером 5м×8м, 2 этап – натурные измерения на трассе распространения радиоволн с улицы в здание.

Исследовались два типа экранирующих материалов. Первый тип материала – специально разработанные для экранирования электромагнитных полей

полиэфирные ткани МЕТАКРОН, покрытые никелем: 1П4-Н3 толщиной 3 мкм и 1П16-Н5 толщиной 5 мкм. Размер экрана составлял 2 м×3 м. При проведении измерений в лабораторных условиях передающая ( $A_1$ ) и приемная ( $A_2$ ) антенны размещались встречно на удалении 1 м, экранирующий материал ( $\Xi$ ) располагался между антеннами (рис. 1).

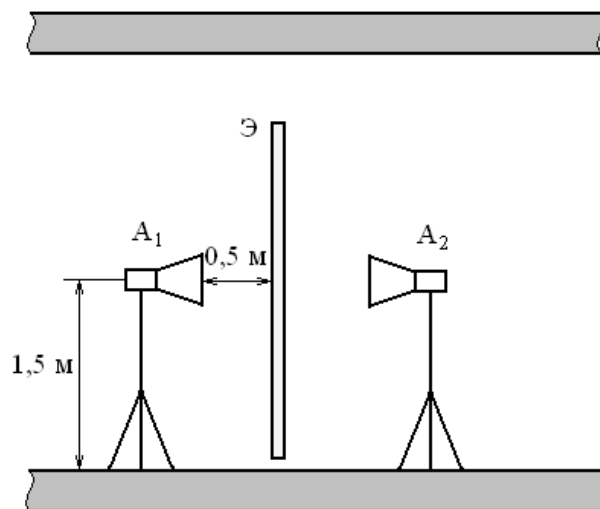


Рис. 1 Схема размещения антенн при измерении коэффициента экранирования металлизированных тканей в лабораторных условиях

Второй тип материала – рольставни, выполненные из алюминиевых полос (профилей) шириной 7,7 см. Следует отметить, что рольставни не предназначены для экранирования электромагнитных полей, и их экранирующие возможности до настоящего времени практически не исследовались. В то же время рольставни весьма распространены и могут выполнять не только защитные, но и экранирующие функции. В связи с этим представляет интерес исследование экранирующих свойств рольставен как в лабораторных условиях, так и при их штатном размещении на оконном проеме. При проведении лабораторных исследований рольставни размещались на проеме в стене толщиной  $d = 0,5$  м. Размер проема соответствовал размеру развернутых рольставен и составлял 1,5 м×2 м. Рольставни ( $P_1$  и  $P_2$ ) были установлены с двух сторон проема. Схема размещения передающей ( $A_1$ ) и приемной ( $A_2$ ) антенн при проведении измерений представлена на рис. 2.

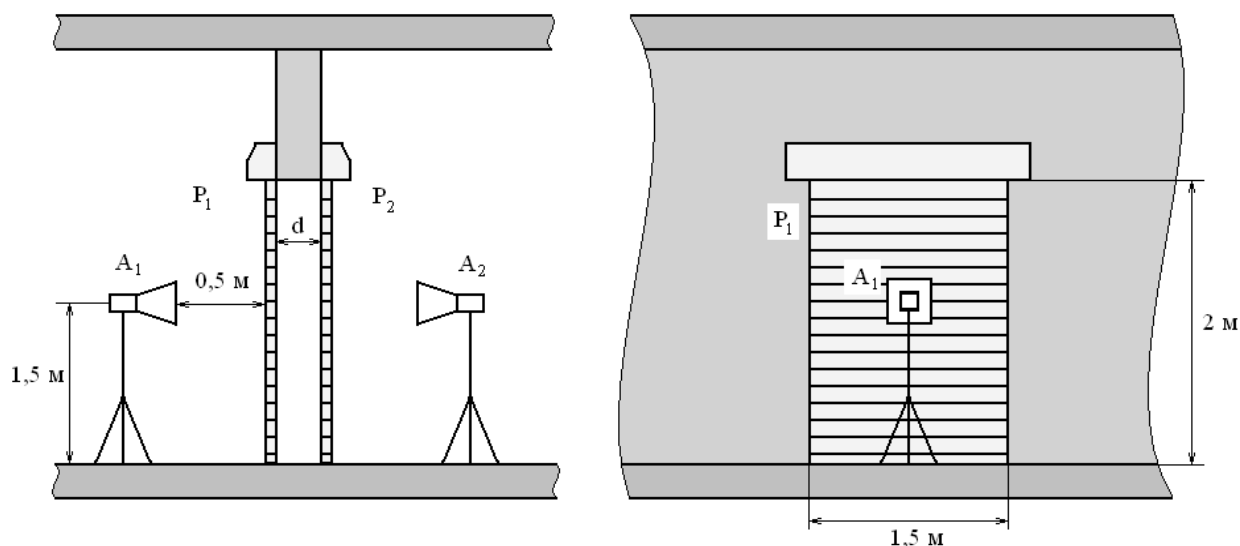


Рис. 2 Схема размещения антенн при измерении коэффициента электромагнитного экранирования рольставен в лабораторных условиях

Измерения проводились при одном и двух опущенных полотнах рольставен ( $P_1$  и  $P_2$ ) в отдельности. Рассматривались два варианта ориентации вектора напряженности электрического поля падающей волны относительно ориентации полос рольставен: вектор напряженности электрического поля параллелен направлению полос (в дальнейшем обозначается  $\parallel$ ); вектор напряженности электрического поля перпендикулярен направлению полос (в дальнейшем обозначается  $\perp$ ).

При проведении натурных измерений передающая антенна размещалась на высоте 1,5 м над землей и на удалении 15 м и 25 м от здания. Приемная антенна располагалась на первом этаже многоэтажного здания на высоте 1,5 м над полом и на удалении 3 м от окна (рис. 3). Производились излучение и прием вертикально поляризованных относительно земной поверхности радиоволн. При этом вектор напряженности электрического поля падающей на полотно рольставен волны был перпендикулярен направлению полос полотна. Рольставни были установлены на внутренней стороне оконного проема, экран из металлизированной ткани также перекрывал оконный проем с внутренней стороны комнаты. Размер оконного проема составлял 1,5 м×1,5 м.

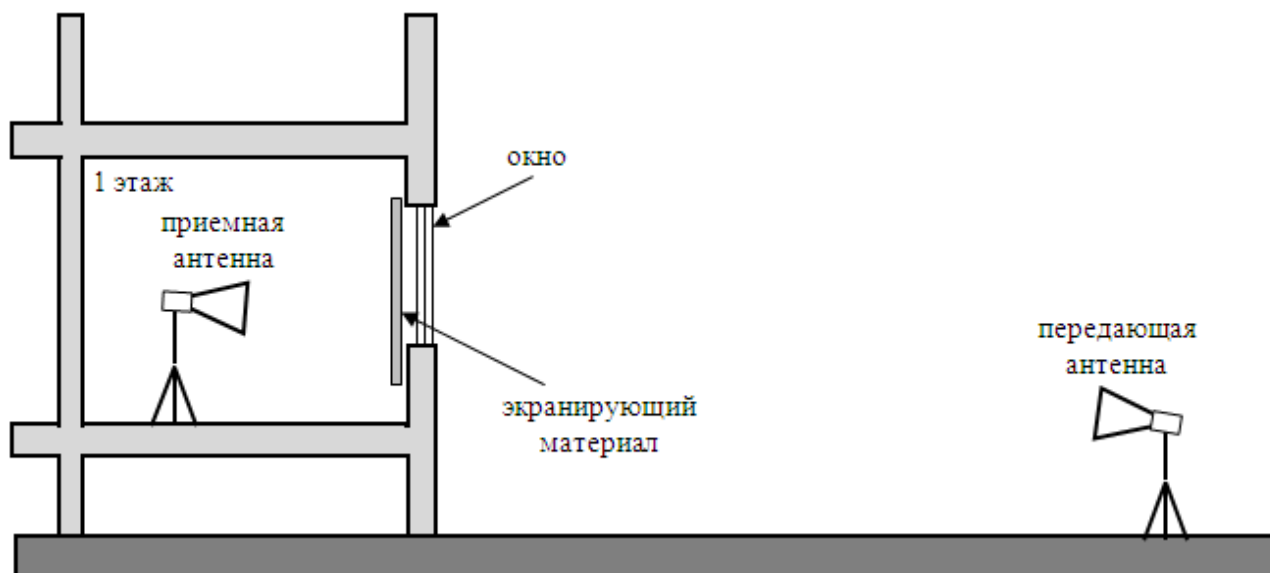


Рис. 3 Схема размещения антенн при проведении натуральных измерений коэффициента экранирования металлизированной ткани и рольставен на трассе распространения радиоволн с улицы в здание

Для определения коэффициента экранирования сначала проводились измерения уровня напряжения сигнала на входе приемника (анализатора спектра)  $U_0(f)$  на заданной частоте  $f$  при отсутствии экранирующего материала. Затем измерялся уровень напряжения сигнала на входе приемника  $U_э(f)$  при наличии экрана (металлизированной ткани или рольставен) между антеннами (в лабораторном эксперименте) или на оконном проеме (в натурном эксперименте). Коэффициент электромагнитного экранирования определялся по формуле  $K_э(f) = U_0(f)/U_э(f)$ .

## Результаты экспериментальных исследований и их анализ

### *Результаты лабораторных измерений.*

На рис. 4 приведены частотные зависимости коэффициентов экранирования металлизированных тканей 1П4-Н3 и 1П16-Н5, полученные в лабораторных условиях.

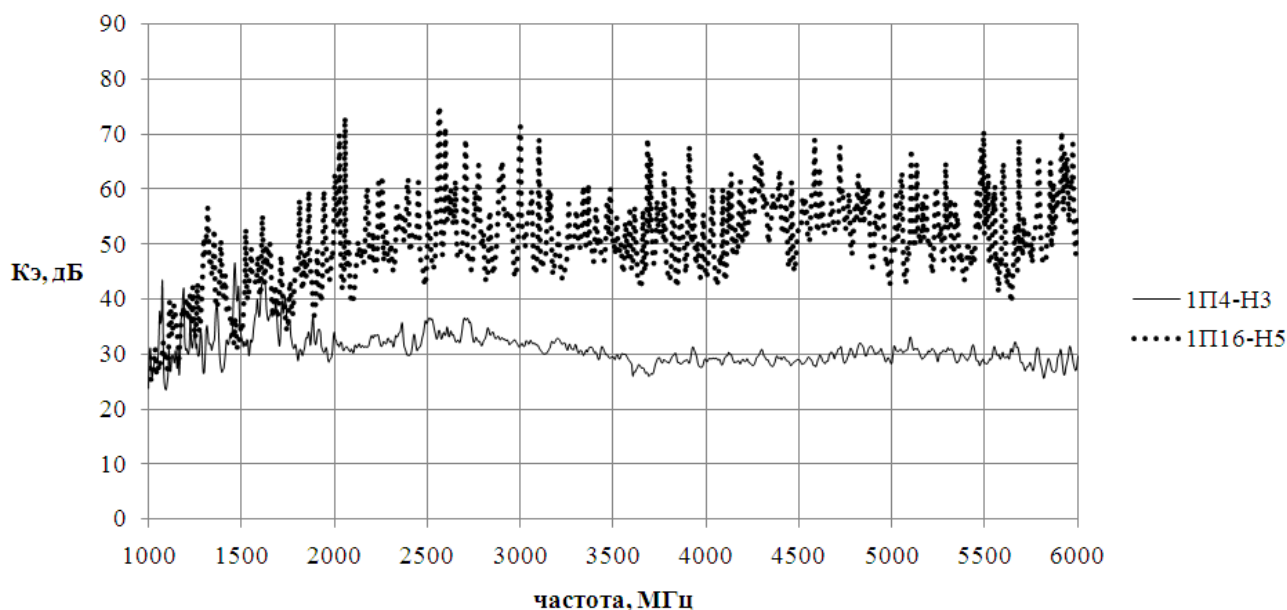


Рис. 4 Частотные зависимости коэффициента экранирования металлизированных тканей, полученные при проведении лабораторного эксперимента

Анализ рис. 4 показывает, что при малом расстоянии между передающей и приемной антеннами доминирует сквозная волна через тонкую металлизированную ткань 1П4-Н3 (размах осцилляций коэффициента экранирования при изменении частоты в диапазоне 3-6 ГГц не превышает 5 дБ). Однако при снижении частоты до 1-2 ГГц наблюдаются существенные колебания коэффициента экранирования, достигающие 20 дБ. Это связано с улучшением дифракционных возможностей радиоволн при уменьшении частоты. При этом в точке размещения приемной антенны уровень принимаемого сигнала определяет не только сквозной луч, но и дифракционные и отраженные от удаленных предметов лучи, формирующие сложное интерференционное поле. Для более толстой металлизированной ткани 1П16-Н5 существенные осцилляции коэффициента экранирования (до 30 дБ) наблюдаются во всем диапазоне частот, что объясняется значительным ослаблением сквозного луча и конкуренцией доминирующих дифракционных и отраженных лучей в точке приема. Следует отметить, что на частотах менее 1,5 ГГц средние значения коэффициентов экранирования для обоих типов ткани практически равны вследствие преобладания дифракционных и отраженных волн над сквозной волной.

На рис. 5 приведены частотные зависимости коэффициента экранирования одного полотна рольставен (P1) при различной ориентации вектора напряженности электрического поля относительно направления полос рольставен.

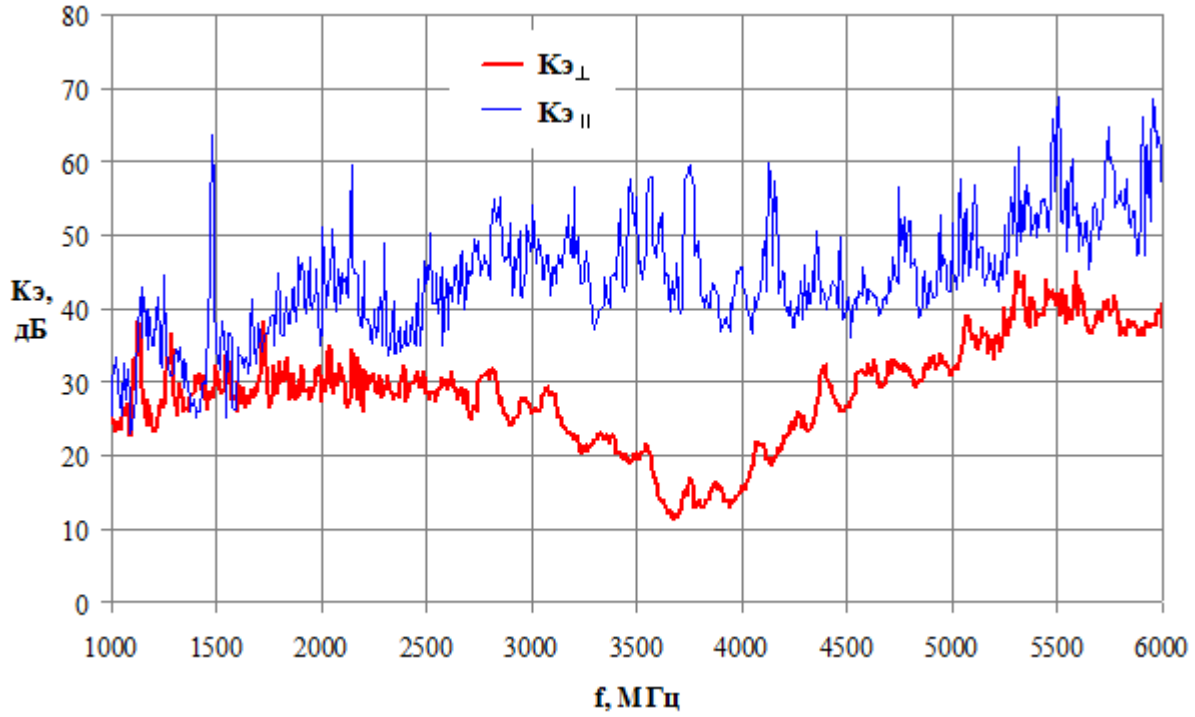


Рис. 5 Частотные зависимости коэффициента экранирования одного полотна рольставен

Из рис. 5 видно, что коэффициент экранирования  $K_{э\perp}$  ниже коэффициента экранирования  $K_{э\parallel}$ . При этом в диапазоне частот 3-4,5 ГГц наблюдается существенное снижение  $K_{э\perp}$  (минимальное значение достигает 12 дБ). Кроме того осцилляции коэффициента  $K_{э\perp}$  во всем диапазоне частот незначительные, что позволяет сделать вывод о преобладании сквозной волны в точке приема. Наоборот, осцилляции коэффициента  $K_{э\parallel}$  весьма существенны и достигают 20 дБ при незначительном изменении частоты, что обусловлено интерференцией в точке приема сквозной, дифракционной и отраженной волн. Окно прозрачности для коэффициента  $K_{э\perp}$  в диапазоне частот 3-4,5 ГГц определяется очевидно шириной полос полотна рольставен. Минимальные значения коэффициента

экранирования наблюдаются при длине волны соизмеримой с шириной полос, что приблизительно соответствует частотам 3,6 - 4 ГГц.

Следует отметить, что полученные результаты не вполне согласуются с теоретическими результатами исследования дифракции радиоволн на периодических структурах, представленными в [8]. На рис. 6а показан случай нормального падения волны (Е-поляризация) на решетку из металлических прямоугольных брусков. Согласно [8] при параметрах решетки  $b/l=1,1$  (наличие между брусками видимого просвета),  $\varphi=75^\circ$  и  $b \approx \lambda$  ( $\lambda$  – длина волны) коэффициент экранирования  $K_{\perp}$  превышает 30 дБ. Соответственно предполагается, что при  $\varphi=90^\circ$  волна практически полностью отражается от решетки.

Развернутые рольставни представляют собой решетку из брусков практически прямоугольной формы, при этом  $\varphi=90^\circ$ . Кроме того видимый просвет между профилями отсутствует (рис. 6б). Однако коэффициент экранирования  $K_{\perp}$  на некоторых частотах снижается до 12 дБ (рис. 5), то есть весьма существенная часть энергии падающей волны проходит через экранирующий материал.

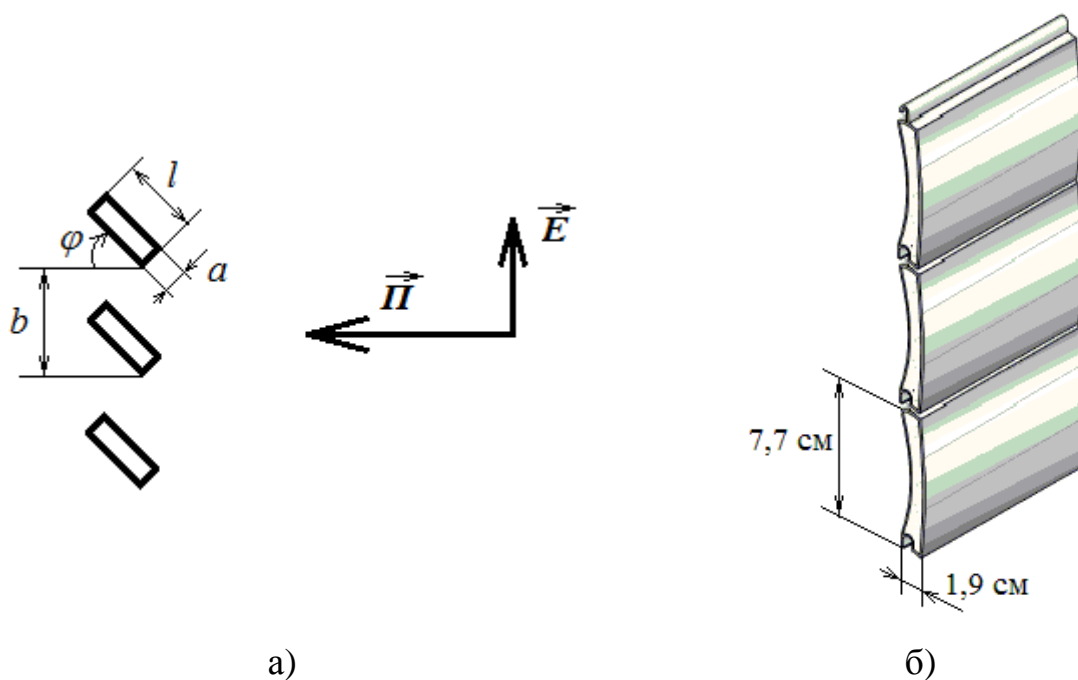


Рис. 6 Модель решетки из прямоугольных брусков (а) и структура полотна рольставен (б)



На рис. 7 представлены частотные зависимости коэффициента экранирования двух полотен рольставен (P1 и P2), развернутых одновременно.

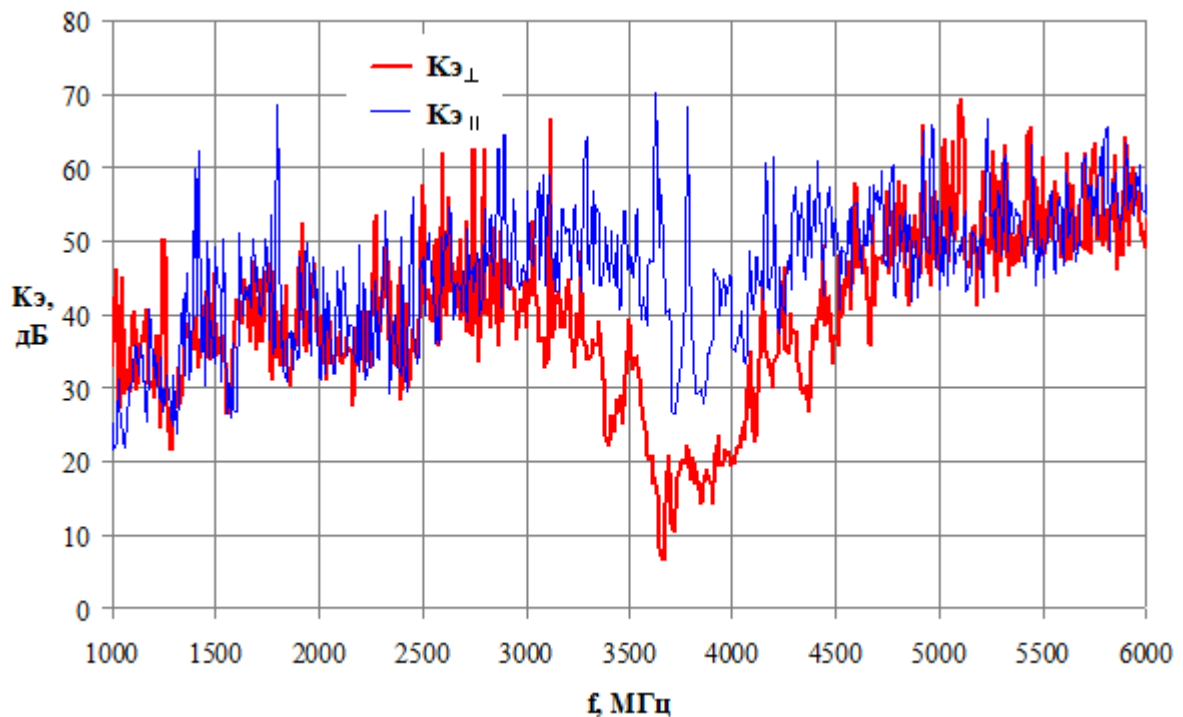


Рис. 7 Частотные зависимости коэффициента экранирования двух полотен рольставен

При размещении между антеннами двух полотен рольставен в диапазонах частот 1-3 ГГц и 4,5-6 ГГц коэффициенты экранирования  $K_{э\perp}$  и  $K_{э\parallel}$  практически равны. Существенные осцилляции значений коэффициентов экранирования свидетельствуют о многолучевом характере поля в точке приема. Однако аналогично результатам, представленным на рис. 5, в диапазоне частот 3-4,5 ГГц также наблюдается окно прозрачности, в пределах которого коэффициент экранирования  $K_{э\perp}$  снижается до 8 дБ. Такое существенное уменьшение коэффициента экранирования и весьма заметные колебания его значений в пределах окна прозрачности объясняются многочисленными переотражениями сквозной волны в резонаторе, образованном двумя полотнами рольставен.

Для сравнительного анализа на рис. 8, 9 представлены частотные зависимости коэффициентов экранирования одного и двух полотен рольставен при

перпендикулярной (рис. 8) и параллельной (рис. 9) ориентации вектора напряженности электрического поля относительно полос полотна.

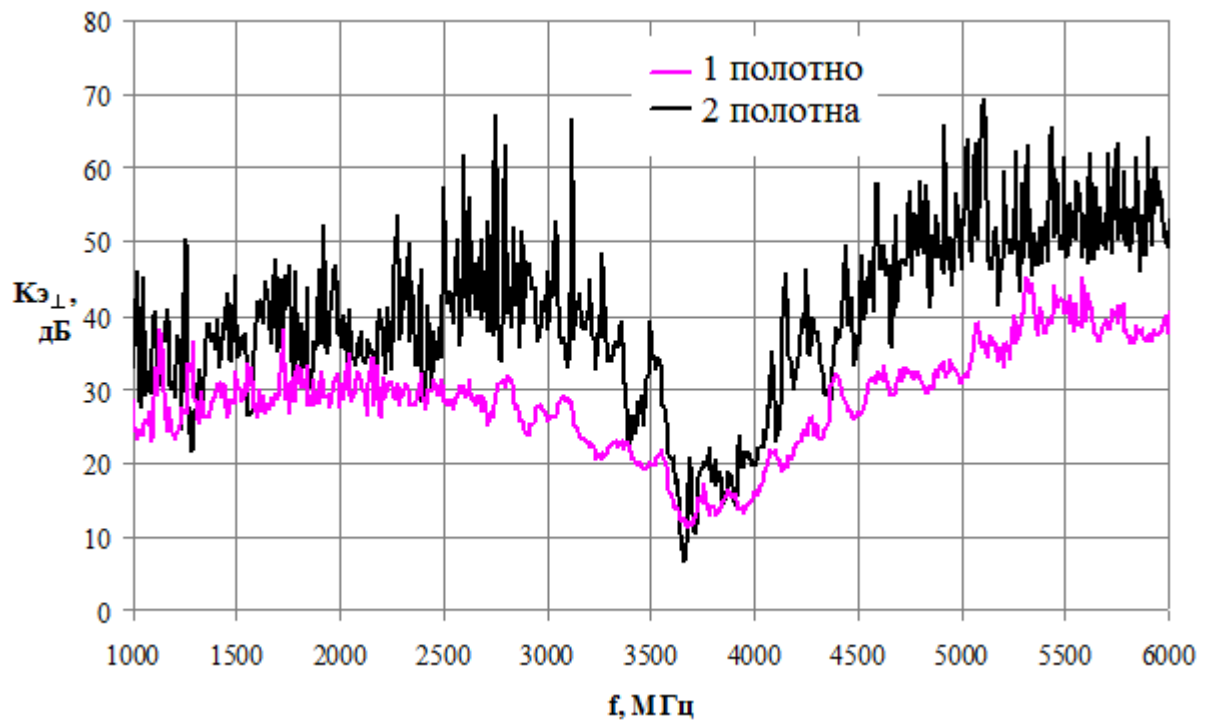


Рис. 8 Частотные зависимости коэффициента экранирования  $K_{\perp}$

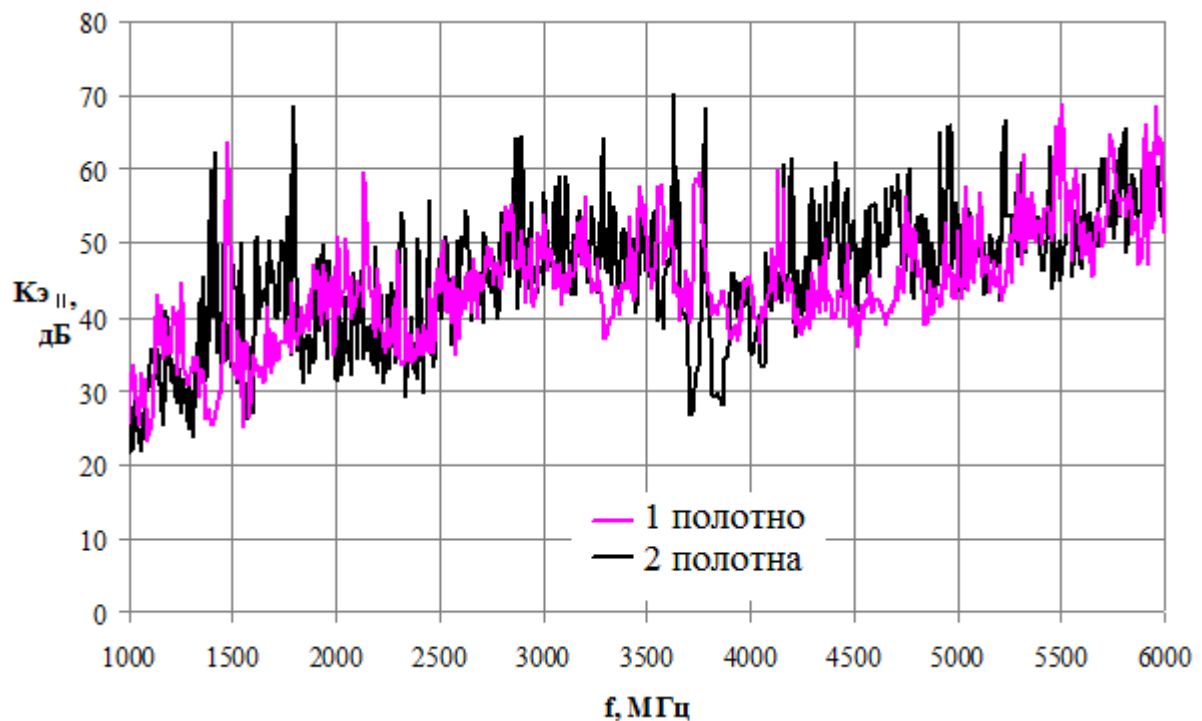


Рис. 9 Частотные зависимости коэффициента экранирования  $K_{\parallel}$

Из анализа рис. 8 видно, что в результате применение двух полотен рольставен происходит увеличение коэффициента экранирования  $K_{э\perp}$  на 10-20 дБ, однако в области окна прозрачности коэффициент экранирования практически не зависит от количества полотен, и на некоторых частотах добавление второго полотна приводит даже к снижению эффективности экранирования.

Средние значения коэффициента экранирования  $K_{э\parallel}$  при наличии одного и двух полотен рольставен практически не отличаются во всем диапазоне частот (рис. 9), что объясняется весьма малым уровнем сквозной компоненты волны и доминированием дифракционных и отраженных волн в точке приема. Исключением является небольшая область частот (3,6-3,8 МГц) в районе выявленного окна прозрачности, в пределах которой при добавление второго полотна  $K_{э\parallel}$  снижается на 10-12 дБ.

### *Результаты трассовых измерений.*

На рис. 10, 11 приведены частотные зависимости коэффициента экранирования металлизированных тканей 1П4-Н3, 1П16-Н5 и рольставен, полученные в результате проведения натурного эксперимента при размещении передающей антенны на расстоянии 15 м (рис. 10) и 25 м (рис. 11) от здания.

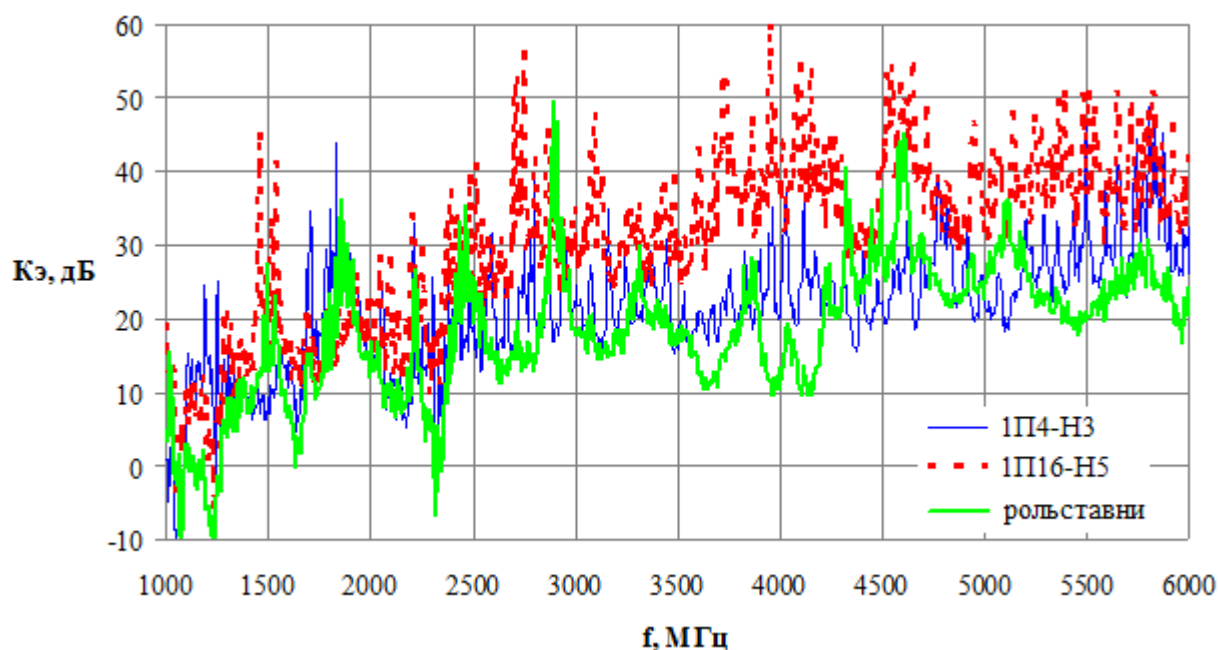


Рис. 10 Частотные зависимости коэффициента экранирования при размещении передающей антенны на расстоянии 15 м от здания

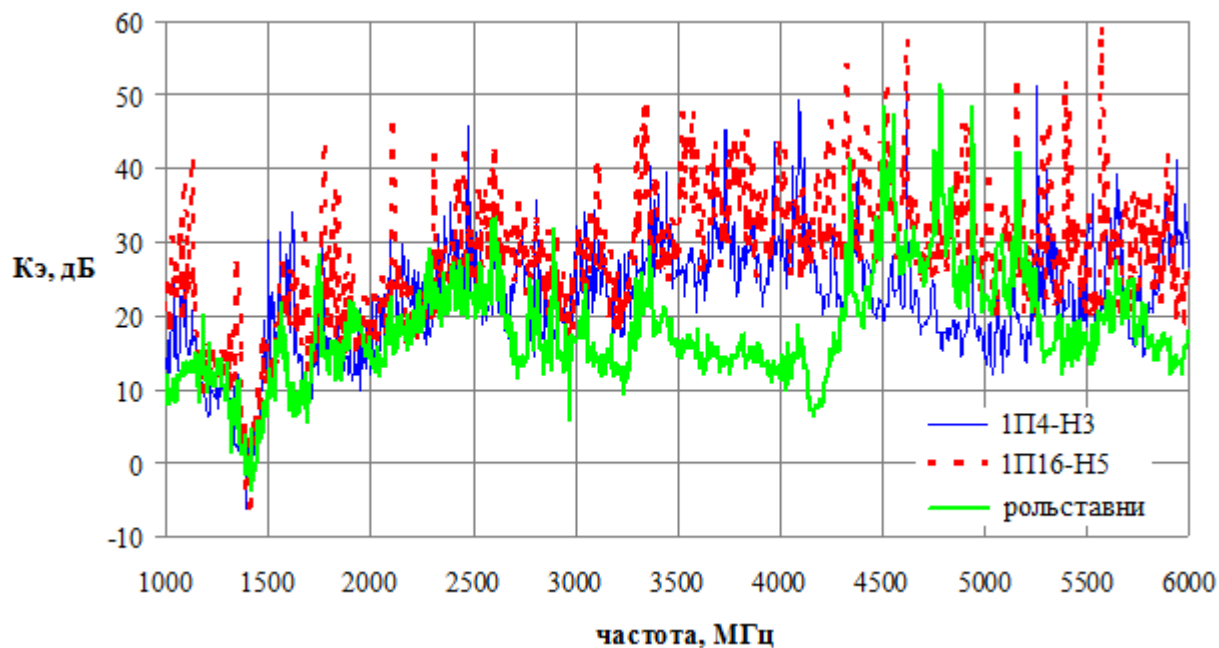


Рис. 11 Частотные зависимости коэффициента экранирования при размещении передающей антенны на расстоянии 25 м от здания

Анализ рис. 10, 11 показывает, что коэффициент экранирования существенно изменяется (до 30 дБ) при незначительном изменении частоты как для ткани 1П4-Н3, так и для ткани 1П16-Н5, вследствие интерференции в точке размещения приемной антенны сквозной волны, отраженных и дифракционных волн. При этом средние значения коэффициента экранирования на 10-20 дБ меньше соответствующих значений, полученных в лабораторных условиях (ср. с рис. 4). Объясняется это существенным увеличением коэффициентов дифракции на ребрах экрана при увеличении расстояния между передающей и приемной антеннами. Кроме того, в диапазоне частот 1-2,5 ГГц средние значения коэффициентов экранирования тканей 1П4-Н3, 1П16-Н5 и рольставен практически совпадают, что свидетельствует о доминировании в точке приема дифракционных и отраженных лучей. При увеличении расстояния между зданием и передающей антенной до 25 м средние значения коэффициентов экранирования металлизированных тканей 1П4-Н3 и 1П16-Н5 совпадают практически во всем диапазоне частот. Средние значения коэффициента экранирования рольставен практически соответствуют средним значениям коэффициента экранирования металлизированной ткани 1П4-Н3 (рис. 10) и средним значени-

ям коэффициентов экранирования металлизированных тканей 1П4-Н3 и 1П16-Н5 (рис. 11). При этом в частотной зависимости коэффициента экранирования рольставен так же, как и в зависимости, полученной при проведении лабораторного эксперимента, наблюдается окно прозрачности в диапазоне 3-4,5 ГГц, в пределах которого коэффициент экранирования снижается до 7-10 дБ.

## **Выводы**

1. Проведенные экспериментальные исследования показывают существенное отличие коэффициентов экранирования, полученных при трассовых измерениях, от аналогичных коэффициентов экранирования, измеренных в лабораторных условиях. Объясняется это многолучевостью радиоволн, проходящих с улицы в здание. При этом наличие в точке приема кроме сквозного луча доминирующих дифракционных и отраженных лучей приводит к существенному ухудшению (на 10-20 дБ) экранирующих свойств металлизированных тканей.

2. В качестве экранирующего материала могут использоваться алюминиевые рольставни. Однако при этом необходимо учитывать зависимость экранирующих свойств рольставен от поляризации падающей волны, а также наличие окна прозрачности при длинах волн соизмеримых с шириной полос полотна рольставен, в пределах которого коэффициент экранирования может снижаться на 10-20 дБ.

3. В экспериментах использовались направленные рупорные антенны, существенно ослабляющие сигналы, приходящие в точку приема со стороны боковых лепестков. Очевидно, что при использовании ненаправленных антенн уровень принимаемого сигнала внутри здания может быть существенно выше, а, следовательно, коэффициенты экранирования помещений могут значительно снизиться.

## **Литература**

1. Авдеев В.Б., Катруша А.Н. Особенности формирования помех мобильной УКВ радиосвязи в городе и зданиях в условиях многолучевости. Моногра-

фия. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2012, 138 с.

2. Мощные сверхкороткоимпульсные и сверхширокополосные электромагнитные излучения и их помеховое и поражающее воздействие на электронную аппаратуру передачи-приема, обработки и хранения информации / под ред. В.Г. Герасименко, В.Б. Авдеева, А.В. Бердышева. Воронеж: Научная книга, 2008, 397 с.

3. Металлизированная электропроводящая ткань Метакрон для защиты от излучений [Электронный ресурс]: ООО НПП «Техностиль». URL: <http://www.metakron.ru>.

4. Радиоэкранирующие материалы [Электронный ресурс]: ООО НПП «Радиострим». URL: <http://www.radiostrim.ru/100-screen.html>.

5. European Comission: European cooperation on the field of scientific and technical research (EURO-COST 231): “Digital mobile radio towards future generation systems“, Final report, Bruxelles, 1999, <http://www.lx.it.pt/cost231/>.

6. P. Kyosti et al. “WINNER II channel models,” WINNER II Public Deliverable, Sep. 2007.

7. Y. Miura, Y. Oda, T. Taka, ”Outdoor-to indoor propagation modelling with the identification of path passing through wall openings”, IEEE 13th PIMRC, Vol. 1, pp. 130-134, 2002.

8. Галишникова Т.Н., Ильинский А.С. Численные методы в задачах дифракции. М.: Изд-во МГУ, 1987, 208 с.