

УДК 621.396: 004.056

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЗАТУХАНИЕ НАВОДОК В ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЛИНИИ

А. Н. Катруша

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а**

Статья поступила в редакцию 7 июня 2017 г., после доработки – 14 июля 2017 г.

Аннотация. Результаты измерений затухания токов, приведенных в типовых проводных линиях, актуальны при решении задачи оценки защищенности информации от утечки по каналу побочных электромагнитных излучений и наводок. Полученные в результате экспериментальных исследований закономерности могут также использоваться для построения и корректировки аналитических моделей каналов утечки информации. Как правило, технические средства размещаются внутри помещений многоэтажных зданий. В связи с этим при оценке затухания наводок в линии необходимо учитывать влияние близкорасположенных предметов на распределение поля вблизи линии и тока в линии. В статье рассмотрена упрощенная модель формирования наводок в тонком проводе, расположенном в комнате многоэтажного здания вблизи поглощающей поверхности в виде бетонного пола. В качестве внешнего источника излучения использовался генератор гармонических сигналов с антенной в виде симметричного вибратора. Рассмотрены два типовых варианта ориентации антенны относительно провода линии: ось антенны параллельна и перпендикулярна проводу. На основе метода моментов выполнен расчет токов, наведенных внешним полем в тонком проводе с изоляцией с учетом влияния близкорасположенной подстилающей поверхности. Сравнительный анализ показал достаточно хорошее соответствие результатов экспериментальных исследований и численных расчетов. Выявлено существенное влияние близкорасположенной

поверхности и ориентации излучающей антенны на затухание сигнала в линии. Таким образом, затухание сигнала, наведенного в токопроводящей линии, характеризует не отдельно взятую линию, а целую систему, состоящую из источника излучения, токопроводящей линии и окружающего пространства вблизи проводника линии. Показано, что уровень затухания сигнала вдоль линии меняется неравномерно, и на некоторых участках линии амплитуда наведенного тока практически не меняется. В связи с этим для анализа уровней наводок в линии некорректно использовать широко известный аппарат теории длинных линий. Предлагается рассматривать электродинамическую задачу определения токов, наведенных в линии внешним электромагнитным полем с учетом влияния окружающего пространства.

Ключевые слова: побочные электромагнитные излучения и наводки, экспериментальные исследования, защита информации, затухание сигналов, численные методы.

Abstract. The results of electromagnetic interference measurements are actual for the estimation of information security from signal leak on conductive line. Received experimental regularities can be used also for construction and updating of analytical models of information leakage channels. Usually, technical equipment is located inside multistorey buildings. In this connection for the estimation of spurious signal attenuation in a line it is necessary to consider the influence of closely located objects on the distribution of the current and near field. The article considers a simplified model for the formation of interference in a thin wire, located in a room of a multistorey building in close proximity to the absorbing surface in the form of a concrete floor. The harmonic generator with symmetric antenna was used as an external radiation source. Two typical orientations of the antenna with respect to the wires of the line are considered: the axis of the antenna is parallel and perpendicular to the wire. Based on the moment method, the level of electromagnetic interference in a thin wire with isolation was calculated. Also it was taking into account the influence of the underlying close located surface. The comparative analysis has shown good enough correspondence of experimental researches results and numerical calculations. We re-

vealed the significant effect of close located surface and the orientation of the radiating antenna to the signal attenuation in the line. Thus, the attenuation of electromagnetic interference is not a characteristic of individual lines. It describes a system consisting of radiation source, conductive line and surrounding space near the conductor line. It is shown that the level of signal attenuation along the line varies non-uniformly, and on certain sections the amplitude of the induced current does not change. Therefore to analyze the level of interference in the lines it is incorrect to use widely known theory of long lines. It is proposed to consider the electromagnetic problem of determining the currents induced in the line by external electromagnetic field taking into account the influence of the surrounding space.

Keywords: compromising emanations, experimental researches, information protection, attenuation of signals, numerical methods.

Введение

Канал утечки информации за счет наводок в токопроводящих линиях, расположенных вблизи технических средств обработки конфиденциальной информации, является одним из наиболее существенных и доступных для перехвата при условии выхода линии за границу контролируемой зоны [1]. Как правило, технические средства размещаются внутри помещений многоэтажных зданий. В связи с этим при оценке защищенности информации от утечки за счет наводок необходимо учитывать особенности достаточно сложного пространства, окружающего проводную линию. Очевидно, что затухание наведенного в линии сигнала складывается из затухания сигнала в материалах проводов и затухания, обусловленного влиянием окружающего пространства. Весьма часто при исследовании наводок в проводных линиях используют теорию длинных линий и измеряют погонное затухание сигнала в линии [2]. Однако применение теории длинных линий при облучении линии внешним электромагнитным полем является неоправданным, так как источник сигнала не включается в линию. Распространение сигнала в проводной линии более целесообразно описывать поверхностными электромагнитными волнами [3]. Особенностью поверхност-

ной волны является значительная концентрация энергии в пространстве вблизи проводника. Причем, чем больше концентрация энергии вблизи проводника, тем менее чувствительна линия к влиянию внешних предметов на передачу энергии. Концентрация энергии зависит как от параметров проводника, так и от частоты сигнала. При распространении сигнала в классической длинной линии за счет противофазности токов волна вблизи проводника практически отсутствует. В этом случае внешние предметы весьма слабо влияют на затухание сигнала в линии. При облучении линии внешним полем токи в разных проводах синфазны, а поля, создаваемые этими токами в окружающем линию пространстве, складываются. Поэтому волна распространяется не только в проводах, но и в некоторой области пространства возле проводов [4]. В этом случае внешние предметы вблизи линии могут существенно влиять на затухание сигнала. Следует также отметить, что электромагнитная волна облучает не одну отдельно взятую точку линии, а всю линию целиком или часть линии. В результате уровни наведенных в линии сигналов будут зависеть не только от параметров линии и окружающего пространства, но и от характеристик излучателя: диаграммы направленности и ориентации излучателя относительно линии. Поэтому представлять наведенный в линии сигнал в виде поверхностной волны можно только в первом приближении. Для более адекватного анализа наведенных сигналов необходимо рассматривать электродинамическую задачу определения токов, наведенных в линии внешним электромагнитным полем с учетом влияния окружающего пространства.

В работе [5] показано, что затухание сигнала, обусловленное потерями только в проводящем и изоляционном материале типовых проводных линий длиной порядка десяти метров при размещении линии на удалении более 1 м от поверхностей стен, пола и потолка весьма незначительно. Эти результаты вполне согласуются с данными, представленными в [3, 6]. Аналогичные результаты были получены аналитическими методами [7], при этом тепловые потери в линии из медного проводника, покрытого диэлектриком, на частотах менее 300 МГц не превышают 1 дБ при длине линии порядка 10 м. Однако прак-

тика показывает, что в реальных линиях затухание сигнала может быть весьма существенным. Например, в [8-10] были измерены достаточно значительные уровни затухания сигналов в различных проводных линиях. Однако в данных работах не учитывалось влияние пространства вблизи исследуемой линии на результаты измерений. В связи с этим предполагалось, что измеренное затухание сигналов зависит только от параметров и структуры самой линии.

Следует полагать, что наблюдаемые на практике существенные затухания наведенных сигналов в линии обусловлены не столько потерями в материалах проводной линии, сколько влиянием внешних факторов, например, наличием вблизи линии отражающих и поглощающих поверхностей в виде земли, стен, пола, потолка.

Цель работы – экспериментально оценить влияние близкорасположенной поверхности с конечной проводимостью на затухание сигнала в типовой однопроводной линии; сравнить полученные результаты измерений с результатами численных расчетов распределения тока в линии и обосновать возможность применения данного численного аппарата прогнозирования уровней наведенных сигналов для условий размещения линии внутри здания.

1. Измерительная установка и условия проведения экспериментальных исследований

Измерительная установка аналогична используемой в работе [5]:
источник сигнала – генератор сигналов R&S SMF 100A;
приемник – анализатор спектра R&S FSU 26B;
излучающая антенна Пб-61 с длиной плеча 0,2 м;
токосъемник ТИ-2,3.

Источник сигнала и излучающая антенна представляют собой модель источника побочных электромагнитных излучений (технического средства обработки информации). Исследования проводились в диапазоне частот от 100 МГц до 300 МГц (максимальная частота ограничена диапазоном рабочих частот токосъемника). На частоте 300 МГц антенна Пб-61 практически настроена в резонанс и представляет собой полуволновой симметричный вибратор, на более

низких частотах антенна является укороченным симметричным вибратором, характеристики которого близки к характеристикам дипольного излучателя. Измерения проводились в комнате размером $15 \text{ м} \times 5 \text{ м}$ и высотой потолка 3 м .

В качестве проводной линии рассматривался тонкий медный провод радиусом $0,25 \text{ мм}$ в изоляции из полипропилена толщиной $0,2 \text{ мм}$ (из состава сетевого кабеля CAT-5). Длина линии составляла $8,7 \text{ м}$. Следует отметить, что структура поля двухпроводной линии при малом расстоянии между проводами и синфазных токах в проводах линии аналогична структуре поля однопроводной линии [4]. Значит и затухание сигнала при распространении в однопроводной линии соответствует затуханию в двухпроводной линии (например, линии электропитания), расположенной вблизи поглощающей поверхности.

Для исследования влияния близкорасположенной поглощающей поверхности на затухание сигнала в линии измерения проводились при размещении исследуемой линии на высоте $0,01 \text{ м}$ над уровнем пола. В соответствии с моделью формирования наводок в токопроводящей линии, предложенной в [11] излучающая антенна размещалась на диэлектрическом штативе над линией на высоте 1 м от начала линии. Рассматривались два варианта ориентации антенны в пространстве: ось антенны параллельна проводу (рис. 1а) и перпендикулярна проводу линии (рис. 1б).

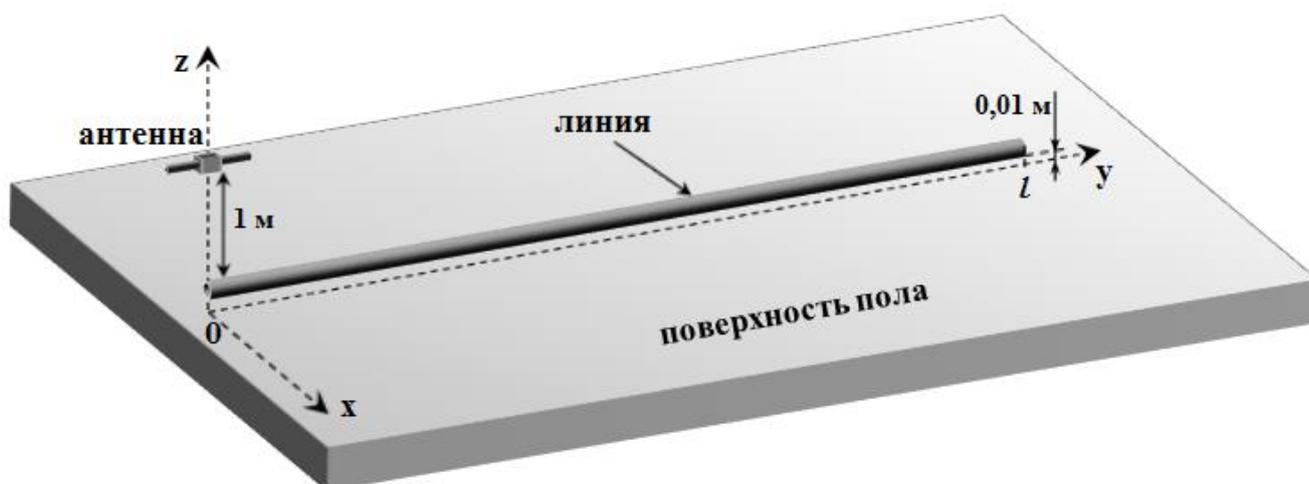


Рисунок 1. Схема размещение излучающей антенны параллельно проводной линии

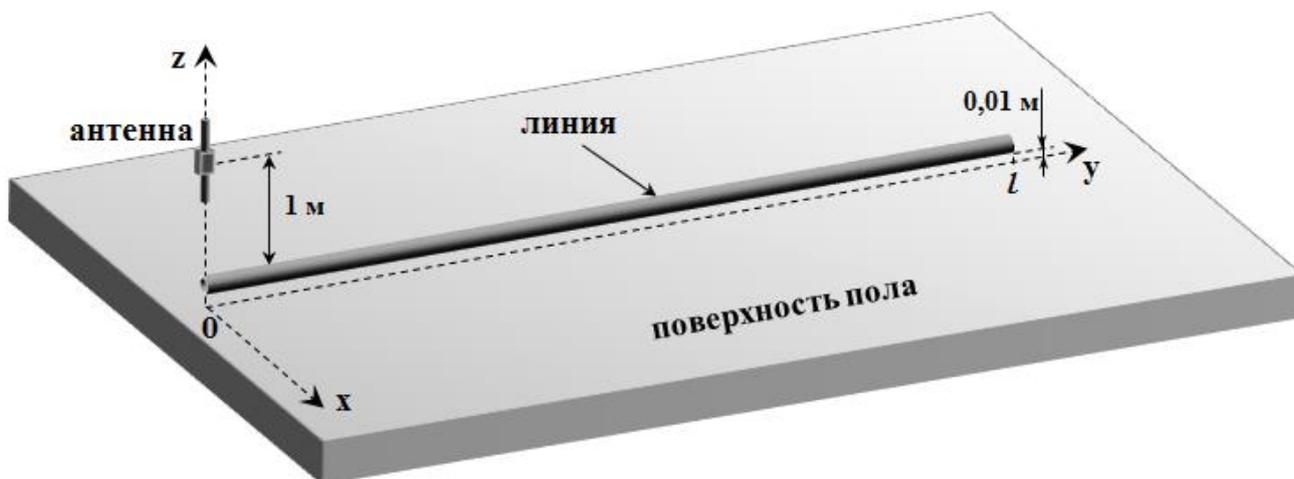


Рисунок 2. Схема размещения излучающей антенны перпендикулярно проводной линии

Определялось значение амплитуды тока в проводной линии, отнесенное к максимальному значению амплитуды тока в излучающей антенне:

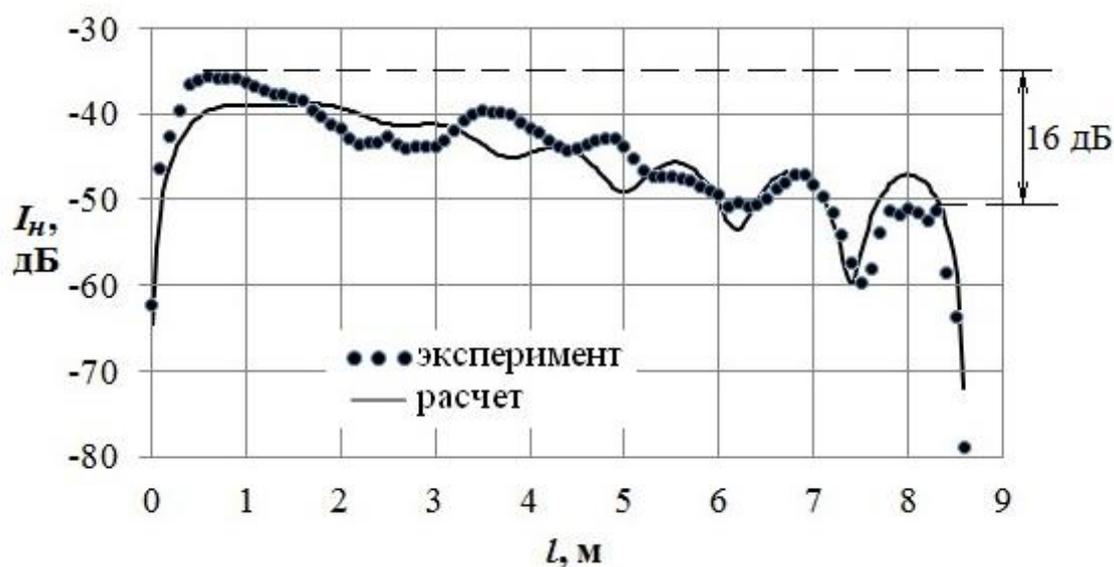
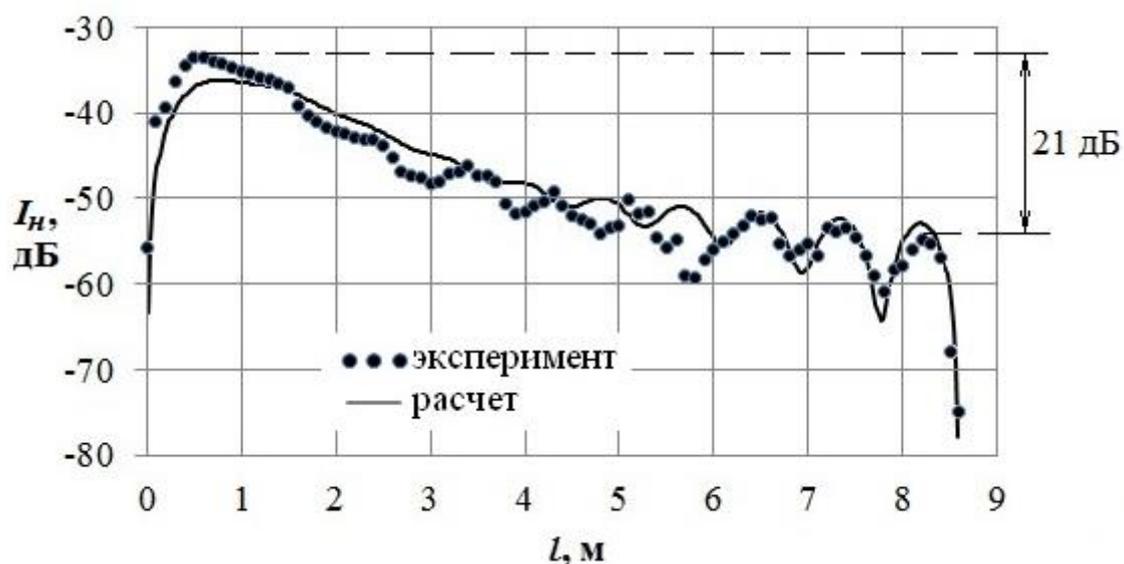
$$I_n(f, l) = I(f, l) / I_A(f)$$

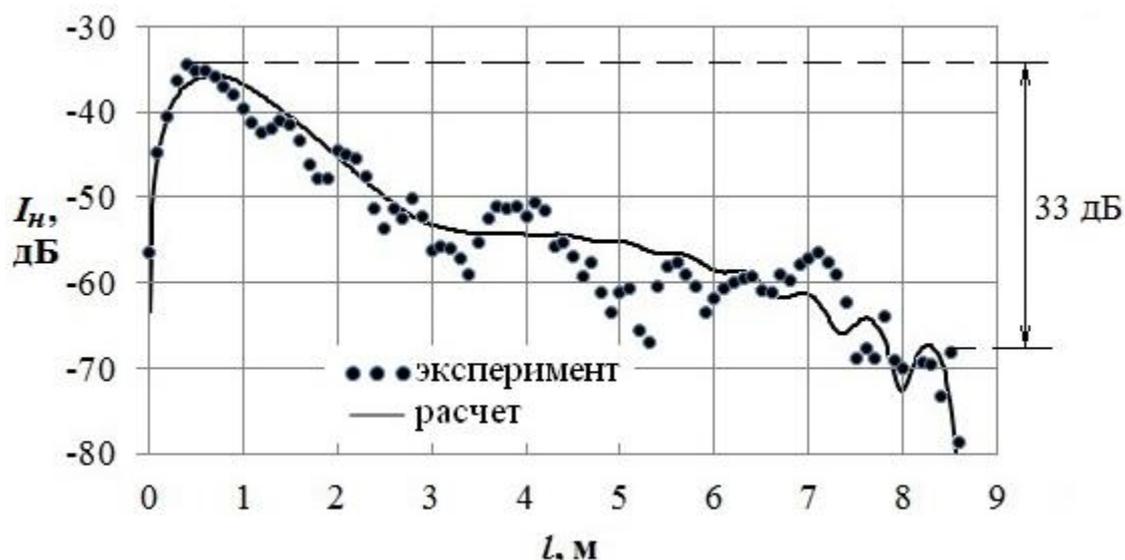
где $I_A(f)$ - измеренное значение амплитуды тока на зажимах передающей антенны; $I(f, l)$ - измеренное распределение уровня наведенного тока в линии.

2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

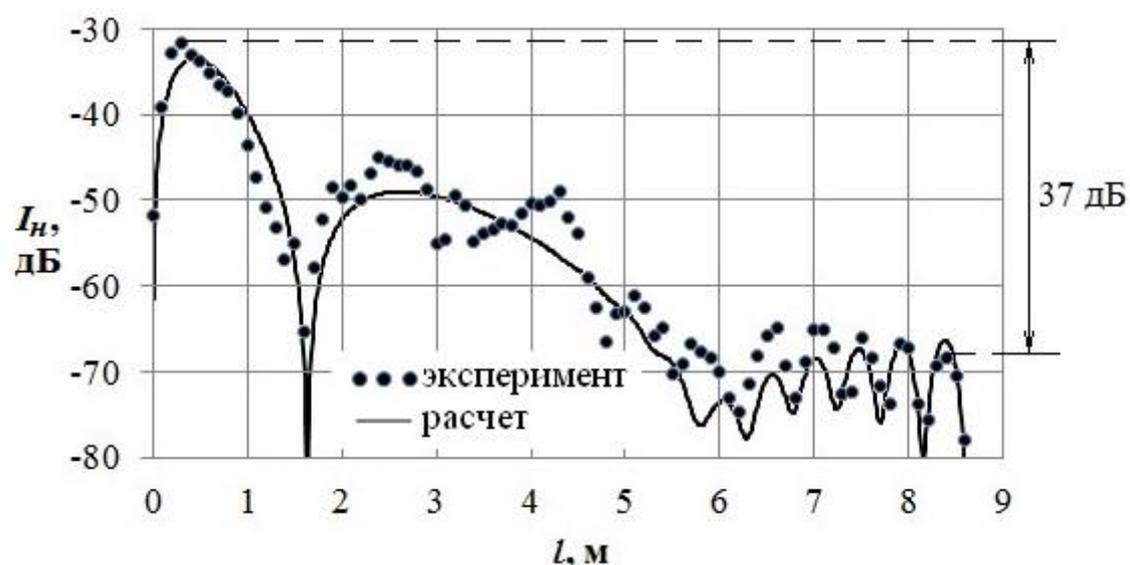
Результаты измерений относительного уровня тока в линии, расположенной вблизи поверхности пола, представлены на рис. 3, 4. Также на рисунках приведены результаты численных расчетов распределения тока вдоль тонкого медного провода расположенного на высоте 0,01 м над поверхностью с параметрами $\epsilon=5$ и $\sigma=5 \cdot 10^{-3}$ См/м. Расчеты проводились на основе метода моментов [12] с учетом наличия изоляции провода [13]. Диэлектрическая проницаемость изоляции (полипропилена) принята равной 2,2 [14]. Для учета влияния подстилающей поверхности (пола) использовалась модель земной поверхности Зоммерфельда-Нортон [13, 15, 16]. Влияние стен и потолка при расчетах не учитывалось. Следует отметить, что модель поверхности Зоммерфельда-

Нортон позволяет проводить расчеты тока в проводе с хорошей для практики точностью при весьма малом расстоянии между проводом и поверхностью. При этом минимальная высота провода над поверхностью должна удовлетворять условию: $\sqrt{a^2 + h^2} > \lambda \cdot 10^{-6}$, где a - радиус провода, h - высота подвеса, λ - длина волны [13]. Однако поверхность пола представляет собой слой бетона, ограниченный стенами, и отличается от модельной бесконечной поверхности земли. Поэтому целесообразна экспериментальная проверка возможности применения данной модели к ситуации размещения проводной линии в комнате.

а) $f = 100$ МГцб) $f = 150$ МГц



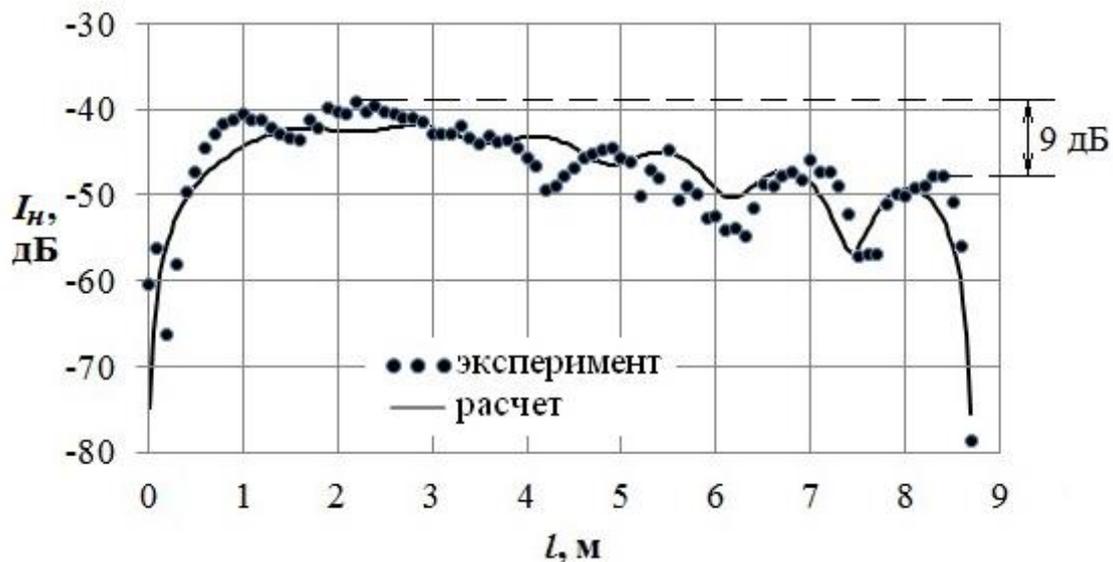
в) $f = 200$ МГц



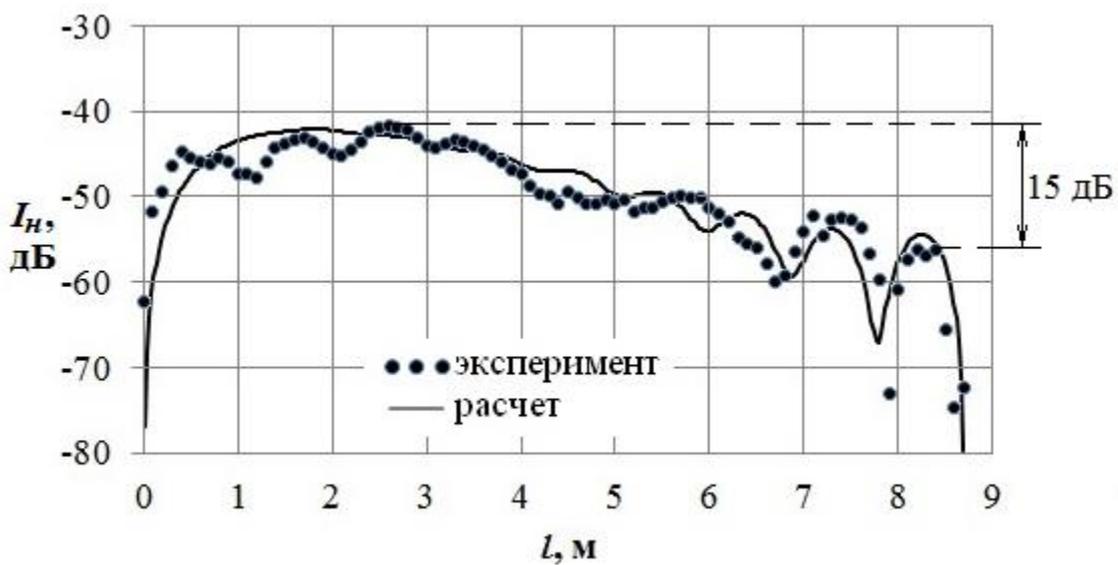
г) $f = 300$ МГц

Рисунок – 3 Результаты измерений и расчетов относительного уровня тока, наведенного в тонком проводе, при параллельном расположении антенны

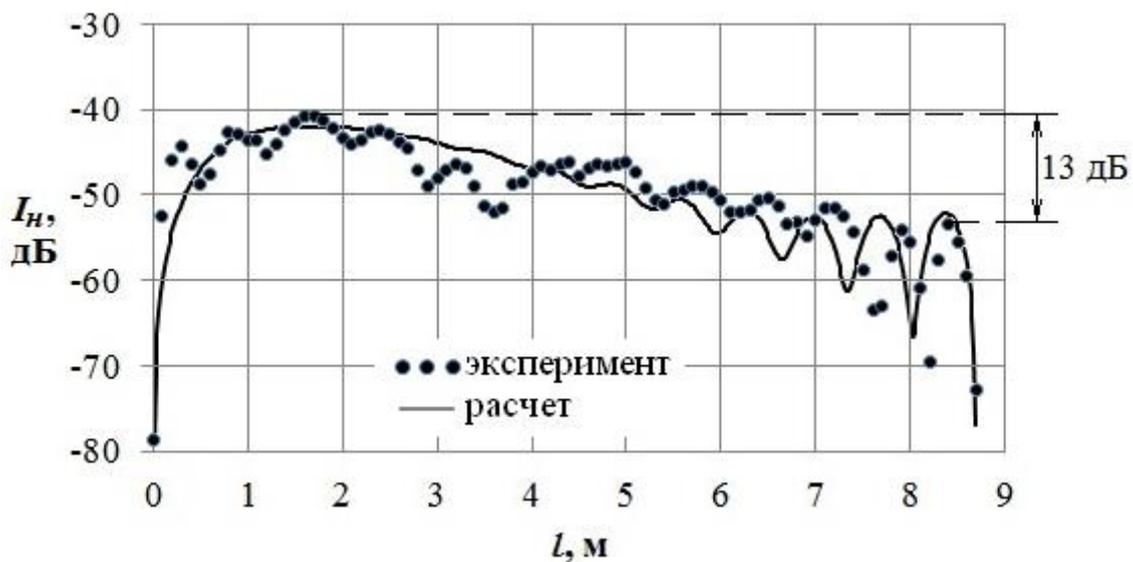
Анализ рисунков 3, 4 показывает, что подстилающая поверхность вблизи проводной линии оказывает существенное влияние на распределение наведенного в линии тока. При этом становится заметным затухание сигнала вдоль линии. Особенно велико затухание при параллельном размещении излучающей антенны относительно линии (рис. 3). Кроме того, наблюдается существенная зависимость затухания от частоты.



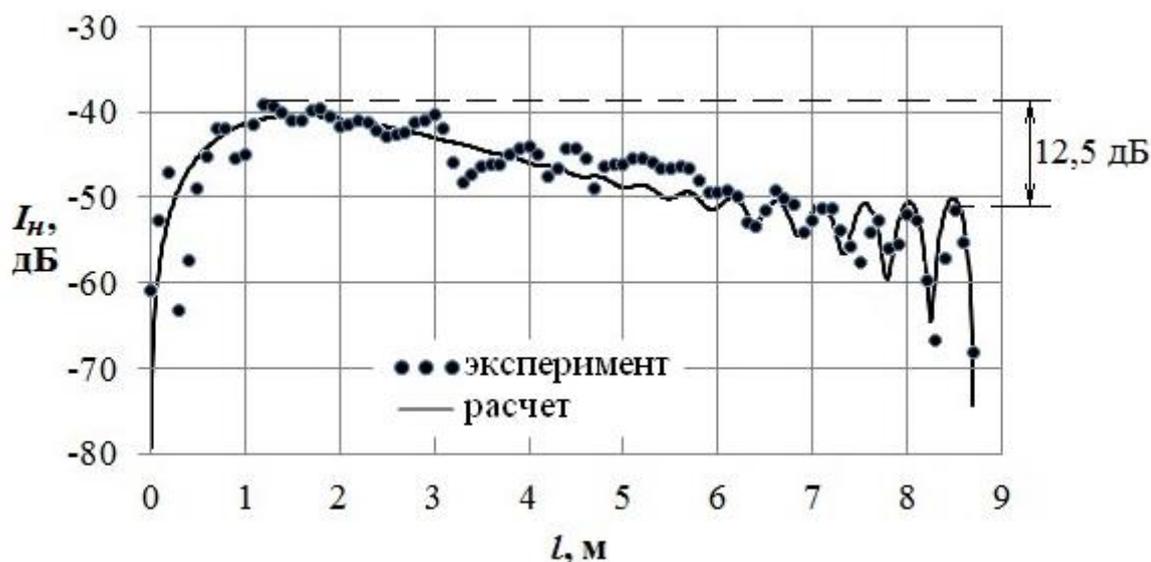
а) $f = 100$ МГц



б) $f = 150$ МГц



в) $f = 200$ МГц



г) $f = 300$ МГц

Рисунок 4. Результаты измерений и расчетов относительного уровня тока, наведенного в тонком проводе, при перпендикулярном расположении антенны

Рассмотрим полное (максимальное по току в пучности) затухание сигнала в проводе, рассчитанное как отношение максимального уровня тока в пучностях на начальном участке провода к уровню тока в пучности в конце провода. Из рис. 3 видно, что полное затухание составляет 16 дБ, 21 дБ, 33 дБ и 37 дБ при частоте сигнала 100 МГц, 150 МГц, 200 МГц и 300 МГц соответственно. То есть при увеличении частоты сигнала полное затухание растет. Однако погонное затухание тока в линии, рассчитываемое как отношение изменения уровня тока (в децибелах) на небольшом участке провода к длине этого участка, носит неравномерный характер и, как правило, на начальном участке провода после пучности тока имеет наибольшее значение, а при удалении уменьшается или даже близко к 0 дБ/м (например, на частоте 300 МГц на участке провода 6-8,7 м, рис. 3г).

При ориентации антенны перпендикулярно проводу полное затухание сигнала существенно меньше. При этом не наблюдается однозначной зависимости полного затухания от частоты. Минимальное значение полного затухания 9 дБ наблюдается на частоте 100 МГц (рис. 4а). На частоте 150 МГц полное затухание максимально и составляет 15 дБ (рис. 4б). Однако при дальнейшем

увеличении частоты полное затухание снижается и достигает 12,5 дБ на частоте 300 МГц (рис. 4г). Как и в предыдущем случае погонное затухание носит неравномерный характер и на частоте 300 МГц на удалении 6-8,7 м практически равно 0 дБ/м. На данном участке линии затухание сигнала практически отсутствует. В результате при сложении прямого и отраженного от конца линии сигнала появляется ярко выраженные осцилляции сигнала. Кроме того, на участке провода от 0 до 2 м погонное затухание имеет отрицательный знак, уровень сигнала на указанном участке возрастает с удалением от начала провода. В связи с существенной нелинейностью зависимости уровня тока в линии от расстояния и неравномерностью погонного затухания сигнала вдоль линии данная характеристика, широко используемая в теории длинных линий, теряет смысл и не может применяться для исследования сигналов, наведенных в проводной линии под воздействием внешнего электромагнитного поля.

Для обоснования данного вывода рассмотрим произвольную нелинейную зависимость нормированного уровня тока в линии от расстояния (рис. 5, сплошная линия). При этом на практике [2] задача состоит в измерении погонного затухания на начальном участке АВ и определении на его основе полного затухания на участке АС (длина 5 м).

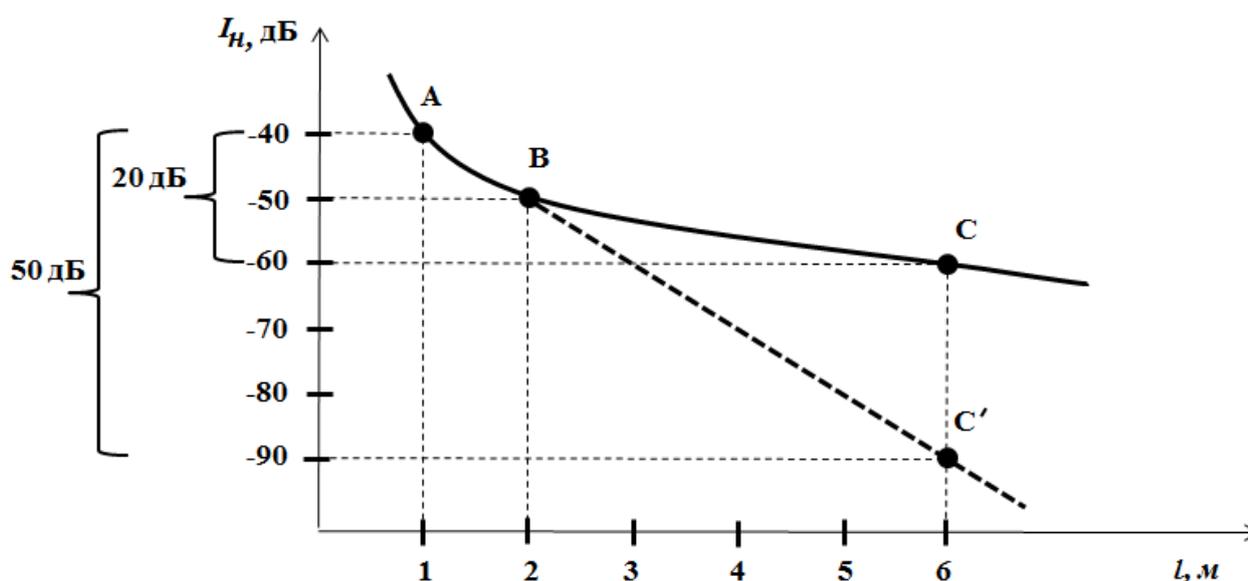


Рисунок 5. Пояснение ошибки, возникающей при использовании погонного затухания для нелинейной зависимости уровня сигнала от расстояния

Выполнив измерения в точках А и В, можно рассчитать погонное затухание [2]:

$$K = \frac{I_{нА} - I_{нВ}}{\Delta l},$$

где $I_{нА}$, $I_{нВ}$ - уровень тока в точках А и В соответственно; Δl - длина участка АВ.

Погонное затухание в данном случае составляет 10 дБ/м. Тогда на участке АС прогнозируемое затухание определяется как произведение погонного затухания на длину данного участка и составляет 50 дБ (на рисунке прогнозируемые значения уровня тока показаны штриховой линией, а действительные – сплошной линией). Однако действительное значение затухания составляет 20 дБ. Таким образом, в данной ситуации, применив измеренное на начальном участке линии значение погонного затухания, получили существенную переоценку полного затухания на участке АС. Такая переоценка приводит к негативным последствиям при оценке защищенности информации от утечки за счет наводок. При этом может быть сделан ошибочный вывод о существенном ослаблении сигнала на границе контролируемой зоны и выполнении требований защищенности информации. Однако в действительности уровень сигнала будет значительно выше прогнозируемого, что позволит злоумышленнику использовать канал утечки информации за счет наводок для получения конфиденциальной информации.

Таким образом, измеренное на начальном участке проводной линии погонное затухание сигнала не может применяться к другим участкам линии. Следовательно, оценка уровня сигнала в линии на границе КЗ по методике, предложенной в [2], может приводить к существенным ошибкам, как в сторону переоценки, так и в сторону недооценки уровня сигнала, в зависимости от выбранных для проведения измерений контрольных точек на начальном участке провода.

Наблюдается достаточно хорошее соответствие экспериментальных результатов и результатов численных расчетов. Следовательно, модель земной

поверхности Зоммерфельда-Нортонa может использоваться при расчетах наведенных в линии токов внутри здания при размещении линии вблизи поверхностей пола, потолка, и стен.

Выводы

1. Исследовано затухание сигнала, наведенного в проводной линии при ее размещении вблизи поверхности с конечной проводимостью (поверхности пола). Выявлено существенное влияние близкорасположенной поверхности на полное затухание сигнала в линии. Однако в данном случае затухание сигнала существенно зависит от характеристик излучающей антенны, в частности от ориентации оси антенны относительно провода линии. Кроме того, характер зависимости затухания от частоты неоднозначен, и при увеличении частоты затухание может даже уменьшаться. Таким образом, затухание зависит от взаимного расположения антенны и провода линии и определяется наличием вблизи линии поглощающих поверхностей. Следовательно, целесообразно рассматривать затухание сигнала, наведенного в токопроводящей линии, которое характеризует не отдельно взятую линию, а целую систему, состоящую из источника излучения, токопроводящей линии и окружающего пространства вблизи проводника линии.

2. Характер изменения затухания сигнала в линии при увеличении расстояния неоднозначен. Так на некоторых участках провода затухание нарастает весьма существенно, в то время, как на других участках практически не меняется (вблизи окончания провода) или даже уменьшается с расстоянием (в начале провода при перпендикулярной ориентации оси антенны относительно линии). В связи с этим такой часто используемый на практике параметр, как погонное затухание сигнала в линии, не может применяться для прогнозирования полного затухания в рассматриваемой системе возбудитель-линия-поверхность.

3. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных результатов и результатов численных расчетов наведенных токов на основе метода моментов с использованием модели подстилающей поверхности Зоммерфельда-Нортонa. Показано достаточно хорошее соответствие экспериментальных и расчетных

результатов, что позволяет сделать вывод о возможности использования предлагаемого численного аппарата прогнозирования уровней сигналов в токопроводящей линии при ее размещении внутри здания вблизи поглощающих поверхностей.

Литература

1. Бузов Г.А., Калинин С.В., Кондратьев А.В. Защита от утечки информации по техническим каналам. Учебное пособие. М.: Горячая линия–Телеком, 2005. 416 с.
2. Трушин В.А, Быков С.В. Защита конфиденциальной информации от утечки по цепям электропитания: учебно-метод. пособие. Новосибирск: НГТУ. 2007. 36 с.
3. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. М.: Гос. из-во литературы по вопросам радио и связи. 1957. 698 с.
4. Зоммерфельд А. Электродинамика. М: Издательство иностранной литературы. 1958. 504 с.
5. Катруша А.Н. Экспериментальные исследования уровней наводок в токопроводящей линии. Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/4/text.pdf>.
6. George J. E. Goubau. Surface wave transmission line. U.S. Patent 2 685 068. – July 1954.
7. Грачев Г.Г., Шевченко В. В., Возбуждение линии поверхностной волны электрическим дипольным источником. Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2014. № 7. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jul14/10/text.pdf>.
8. Пятачков А.Г. О результатах исследования сетей электропитания технических средств, используемых для обработки конфиденциальной информации. Вопросы защиты информации. 1996. № 1.
9. Пятачков А.Г. Кое-что о каналах утечки информации в сетях электропитания. Конфидент. 2000. № 3.

10. Акчурин Р.Ф., Анищенко Е.Н., Трошин В.А., Зайцев А.П. Исследование реальных затуханий сигналов в проводных линиях. Современные наукоемкие технологии. 2010. № 3. с. 28-29.

URL: http://www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=6046.

11. Авдеев В.Б., Катруша А.Н. Особенности инструментального контроля защищенности информации, обрабатываемой техническими средствами, от утечки за счет наводок в токопроводящих линиях. Специальная техника. 2015. № 4. с. 21-31.

12. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике. М.: Издательство «Мир». 1977. 485 с.

13. Федоров Д. Утилита «NEC-2 for MMANA» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.qsl.net/ua3avr/Read_me_Rus.htm.

14. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: Уч.-справ. пос. СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. 240 с.

15. Sommerfeld A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. Annalen der Physik. 1909. vol. 28. pp. 665-737; 1926. vol. 81. pp. 1135-1153.

16. Norton K. A. The Propagation of Radio Waves Over the Surface of the Earth. Proceedings of the IRE. 1936. vol. 24. pp. 1367-1387; 1937. vol. 25. pp. 1203-1236.

Ссылка на статью:

А. Н. Катруша. Экспериментальные исследования влияния поглощающей поверхности на затухание наводок в токопроводящей линии. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/2/text.pdf>