

УДК 537.811

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРОВНЕЙ 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»**

Статья поступила в редакцию 27 июля 2016 г.

Аннотация. Результаты измерений затухания токов, наведенных 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. В статье рассмотрена упрощенная модель формирования наводок в токопроводящей линии в виде отрезка провода, расположенного в комнате многоэтажного здания на достаточном удалении от поглощающих поверхностей. 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. Приведены результаты измерений уровней токов, наведенных внешним электромагнитным полем в однопроводной линии и в типовом кабеле, используемом при построении телекоммуникационных и компьютерных сетей. На основе метода моментов выполнен расчет токов, наведенных внешним полем в тонком проводе с изоляцией с учетом влияния подстилающей поверхности. Сравнительный анализ показал достаточно хорошее соответствие результатов экспериментальных исследований и численных расчетов. Выявлен осциллирующий характер распределения тока вдоль провода, обусловленный интерференцией прямой волны и волн, отраженных от концов линии. Существенных затуханий сигнала при распространении в линии длиной порядка 9 м не обнаружено

вследствие весьма низких потерь в металлических проводах линии и изоляционном материале.

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

Abstract. Electronic equipment can emit unintentional signals which if properly intercepted and processed allow certain amounts of information to be reconstructed on the base of on these compromising emanations. Furthermore, compromising emanation signals can then escape out of a controlled area by conductive line. Therefore results of electromagnetic interference measurements are actual for the solution of information security estimation problem when signal of the conductive line is leak. Received experimental regularities can be used also for construction and updating of analytical models of information leakage channels. The article considers a simplified model for the formation of interference in conductive lines. The line as wire piece locates in a many-storeyed building room on sufficient distance from absorbing surfaces. The harmonic generator with symmetric antenna was used as an external radiation source. It considers two typical antenna orientations with respect to the line: the antenna axis is parallel and perpendicular to the wire. The article gives measurements results of interference signal levels for two line tapes: a single-wire line and typical networks cable. Based on the moments method the electromagnetic interference levels in a thin wire with isolation was calculated. Also it was taking into account the influence of the underlying surface. The comparative analysis has shown good enough correspondence of experimental researches results and numerical calculations. It was revealed the oscillating character of the current distribution along the wire due to the addition of direct waves and waves reflected from ends of the line. Significant attenuation of signal propagation in the 9 m length line is not detected due to very low losses in the metal wires of the line and the insulation material.

Keywords: a side electromagnetic radiation and induced currents, experimental researches, information protection, attenuation of signals, numerical methods.

Введение

Наличие различных проводных линий (например, телефонных, электропитания, сигнализации, проводных компьютерных сетей и т.д.) вблизи технических средств обработки информации приводит к появлению угрозы утечки информации за счет возникновения и распространения вдоль линии сигналов, наведенных в результате воздействия на токопроводящую линию побочных электромагнитных излучений технических средств. Задача оценки защищенности информации от утечки за счет наводок сводится к определению уровня наведенного в линии информативного сигнала на границе контролируемой зоны [1]. Однако непосредственные измерения амплитуды тока информативного сигнала в линии на границе контролируемой зоны на практике выполнить достаточно сложно в связи с недостаточной чувствительностью измерительного приемника и весьма низким уровнем сигнала на фоне внешних и внутренних шумов приемника. В связи с этим представляет интерес разработка численных и аналитических моделей исследуемого канала утечки информации, которые в последствие могут использоваться для предварительной оценки защищенности информации от утечки за счет наводок. При построении и проверке адекватности таких моделей актуальными являются экспериментальные исследования затухания токов, наведенных в типовых проводных линиях.

В ряде экспериментальных работ [2-4] исследуемая проводная линия представлялась в виде классической длинной линии. В итоге после обработки результатов измерений определялась одна из основных характеристик длинной линии – погонное затухание сигнала в линии, предполагающее монотонное убывание уровня сигнала вдоль линии. Например, в [5] предлагается экспериментально-расчетная методика оценки защищенности помещений от утечки конфиденциальной информации за счет наводок на цепи электропитания. Основу данной методики составляет определение затухания сигнала на начальном участке линии и расчет погонного затухания сигнала. При этом полагается, что погонное затухание на всем протяжении линии остается неизменным. В то же время условием возможности применения теории длинных линий является обя-

зательное включение источника сигнала (генератора) непосредственно в линию [6]. Однако при формировании наводок в линии под воздействием внешнего электромагнитного излучения указанное основополагающее условие не выполняется. Следовательно, применение теории длинных линий и использование в качестве основной характеристики исследуемой линии погонного затухания сигнала в данном случае является некорректным. Объясняется это тем, что в классической двухпроводной длинной линии, подключенной к источнику сигнала, токи в проводах противофазны. В то же время при воздействии внешнего поля (побочных электромагнитных излучений) токи в проводах линии синфазны. При этом параметры линии существенно меняются.

Кроме того, известно [7, 8], что потери сигнала при распространении в однопроводной токопроводящей линии с изоляцией, расположенной в свободном пространстве, весьма малы и могут составлять всего лишь несколько децибел в диапазоне частот 1-5 ГГц при длине линии 100 м (для сравнения, потери в коаксиальном кабеле аналогичной длины составляют несколько десятков децибел). В связи с такими низкими потерями в настоящее время ведутся работы по исследованию возможностей построения однопроводных линий передачи в терагерцовом диапазоне частот [9]. Однако реальные проводные линии имеют более сложную структуру и могут существенно отличаться от однопроводной линии, поэтому также представляет интерес исследование затухания наводок в типовых проводных линиях, используемых, например, для построения компьютерных сетей.

Цель работы – экспериментально исследовать распределение токов, наведенных внешним излучением в типовых линиях: однопроводной линии с изоляцией и сетевом кабеле (витой паре); сравнить полученные результаты измерений с результатами численных расчетов распределения тока в тонкой однопроводной линии и обосновать возможность применения численного аппарата прогнозирования уровней наведенных сигналов для условий размещения линии внутри здания на достаточном удалении от поглощающих поверхностей; выявить затухание наведенного сигнала в материалах проводной линии.

Измерительная установка и условия проведения экспериментальных исследований

При проведении измерений использовалось следующее оборудование:
генератор сигналов R&S SMF 100A – в качестве источника сигнала;
анализатор спектра R&S FSU 26B – в качестве приемника;
излучающая антенна Пб-61 с длиной плеча 0,2 м;
токоъемник ТИ-2,3.

Известно, что с повышением частоты затухание сигнала в линии должно возрастать. Для определения наибольшей величины затухания исследования проводились в достаточно высоком диапазоне частот от 100 МГц до 300 МГц (максимальная частота ограничена диапазоном рабочих частот токоъемника). На частоте 300 МГц передающая 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 м×5 м и высотой потолка 3 м.

В качестве проводной линии рассматривались:

- тонкий медный провод радиусом 0,25 мм в изоляции из полипропилена толщиной 0,2 мм (из состава сетевого кабеля CAT-5) – длина линии 8,7 м;
- сетевой кабель CAT-5 (витая пара) с внешней изоляцией из поливинилхлорида толщиной 0,5 мм – длина линии 8,3 м.

Для ослабления влияния стен, пола и потолка на результаты измерений проводная линия растягивалась между диэлектрическими штативами посреди комнаты на высоте 1 м над уровнем бетонного пола и на удалении 2,5 м от стен. В известной методике оценки защищенности информации от утечки за счет наводок [5] используется модель формирования наводок, в которой генератор сигналов с помощью индуктора подключается к проводной линии. В работе [1] показано, что более адекватной и соответствующей реальной ситуации является модель формирования наводок за счет облучения линии внешним полем с помощью антенны, расположенной на некотором удалении от линии (например, в

точке вероятного размещения технического средства обработки информации). В соответствии с данной моделью при проведении измерений излучающая антенна размещалась на диэлектрическом штативе на высоте 1 м над полом и на удалении (по нормали к проводу) 1 м от начала проводной линии. Схема размещения антенны и исследуемой линии приведена на рис. 1, при этом плоскость xOy совпадает с плоскостью пола, а началом системы координат является проекция начала проводной линии на плоскость пола. Очевидно, что рассматриваемый вариант размещения проводной линии отличается от практически важных случаев расположения линии в непосредственной близости от различных поверхностей. Однако оценка влияния близкорасположенных к линии отражающих и поглощающих поверхностей является отдельной задачей и в данной работе не рассматривается.

В общем случае ось антенны может быть произвольно ориентирована в пространстве, и от этого должны существенно зависеть результаты измерений. Для получения наиболее общих зависимостей рассмотрим 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

Как известно уровень наведенного в линии сигнала определяется уровнем тока в излучающей антенне. Поэтому целесообразно рассматривать значение амплитуды тока в проводной линии, отнесенное к максимальному значению амплитуды тока в антенне, которое в полуволновом и укороченном симметричном вибраторе наблюдается на зажимах антенны. Таким образом, сначала с помощью токосъемника проводилось измерение амплитуды тока на зажимах передающей антенны $I_A(f)$, а затем измерялось распределение уровня наведенного тока вдоль исследуемой линии $I(f, l)$ с шагом 0,1 м. Распределение относительного (нормированного) уровня тока в линии рассчитывалось по формуле:

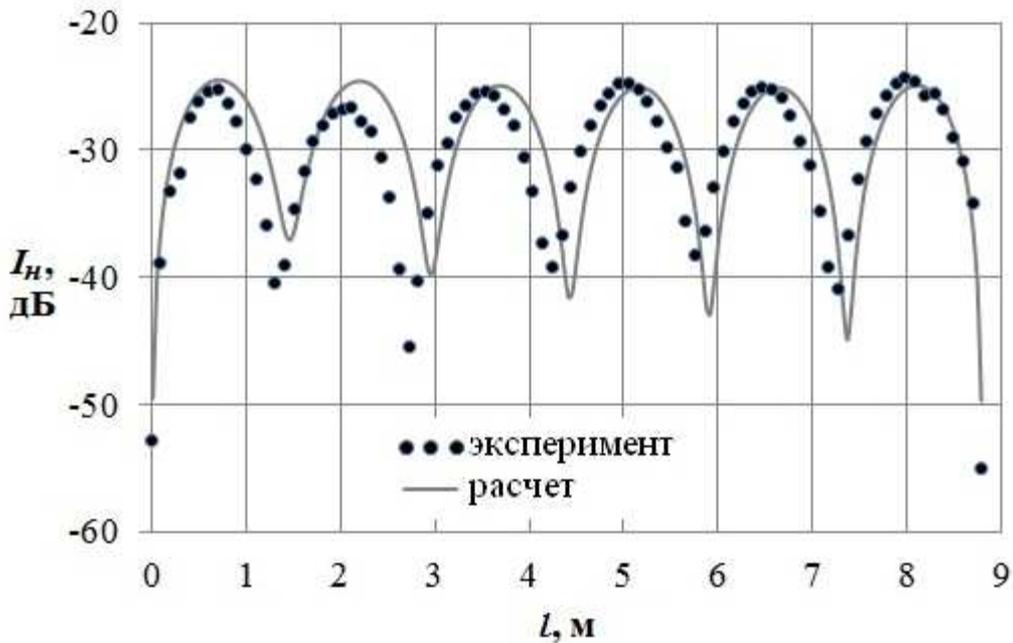
$$I_n(f, l) = I(f, l) / I_A(f).$$

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

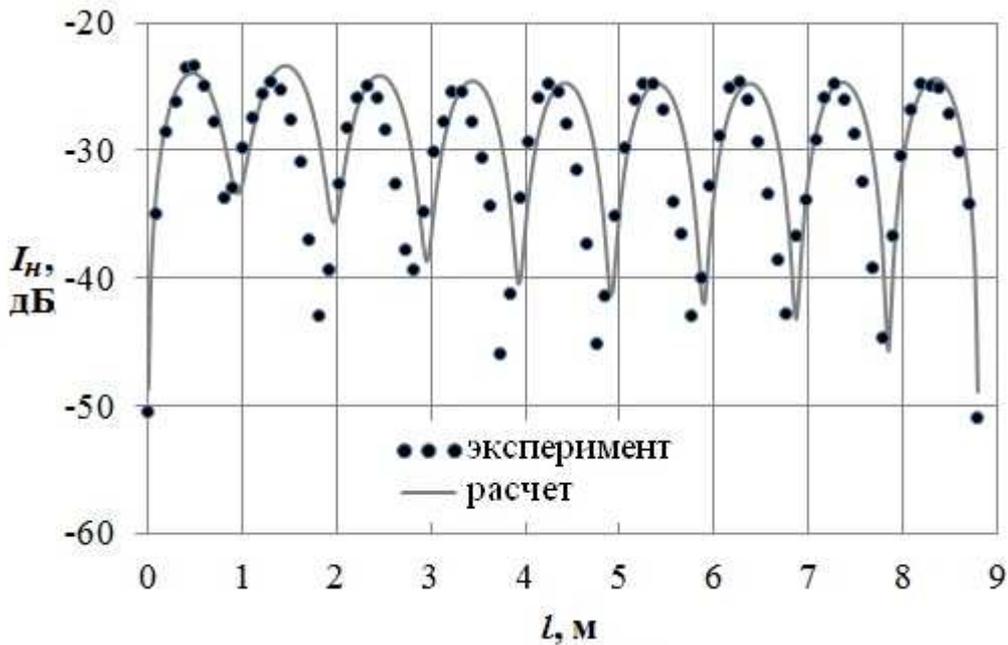
Исследование затухания наводок в однопроводной линии с изоляцией

На рис. 3, 4 приведены результаты измерений нормированного распределения тока вдоль тонкого провода с изоляцией. Для сравнительного анализа также показаны результаты численных расчетов распределения тока вдоль медного провода расположенного на высоте 1 м над поверхностью с параметрами $\epsilon=5$ и $\sigma=5 \cdot 10^{-3}$ См/м. Расчеты проводились на основе метода моментов [10] с учетом наличия изоляции провода [11]. Диэлектрическая проницаемость изо-

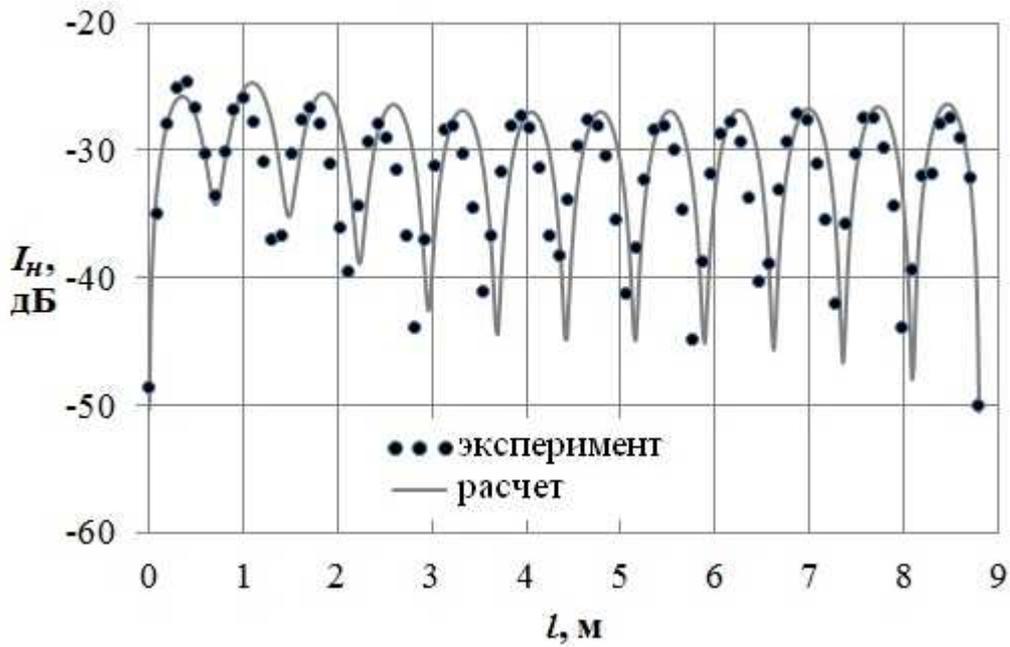
ляции (полипропилена) принята равной 2,2 [12]. Для учета влияния подстилающей поверхности (пола) использовалась модель земной поверхности Зоммерфельда-Нортон [11, 13, 14]. Влияние стен и потолка при расчетах не учитывалось. Результаты получены при параллельной (рис. 3) и перпендикулярной (рис. 4) ориентации оси антенны относительно проводной линии.



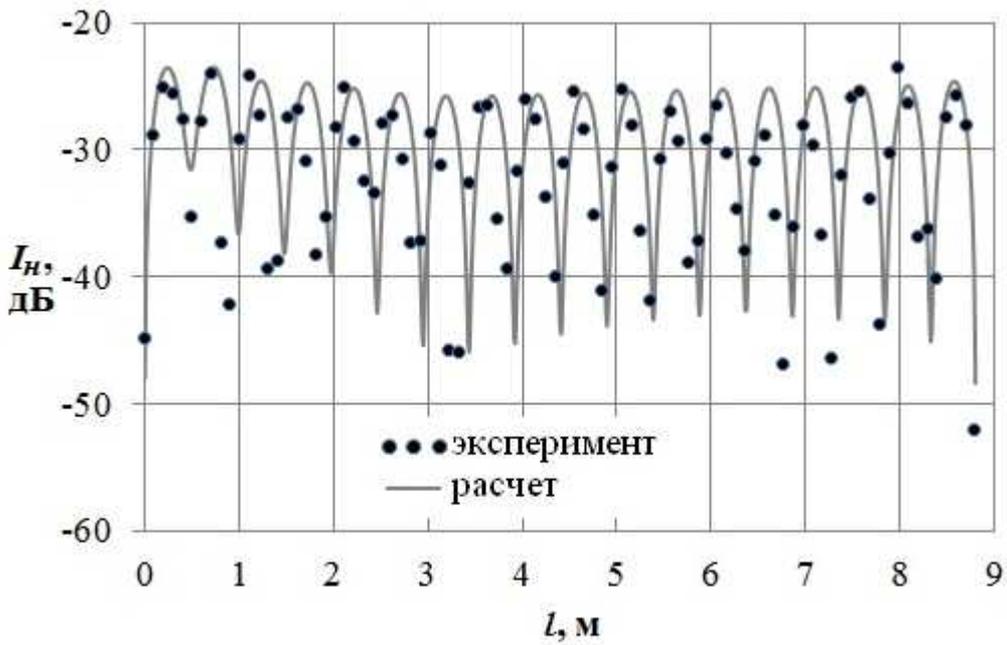
а) $f = 100$ МГц



б) $f = 150$ МГц



в) $f = 200$ МГц

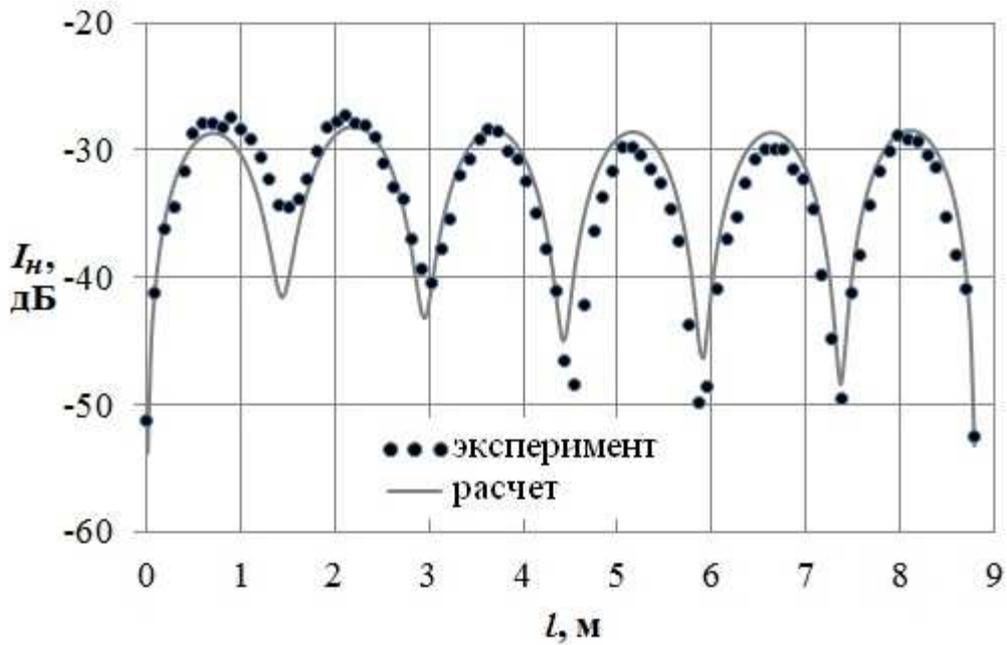


г) $f = 300$ МГц

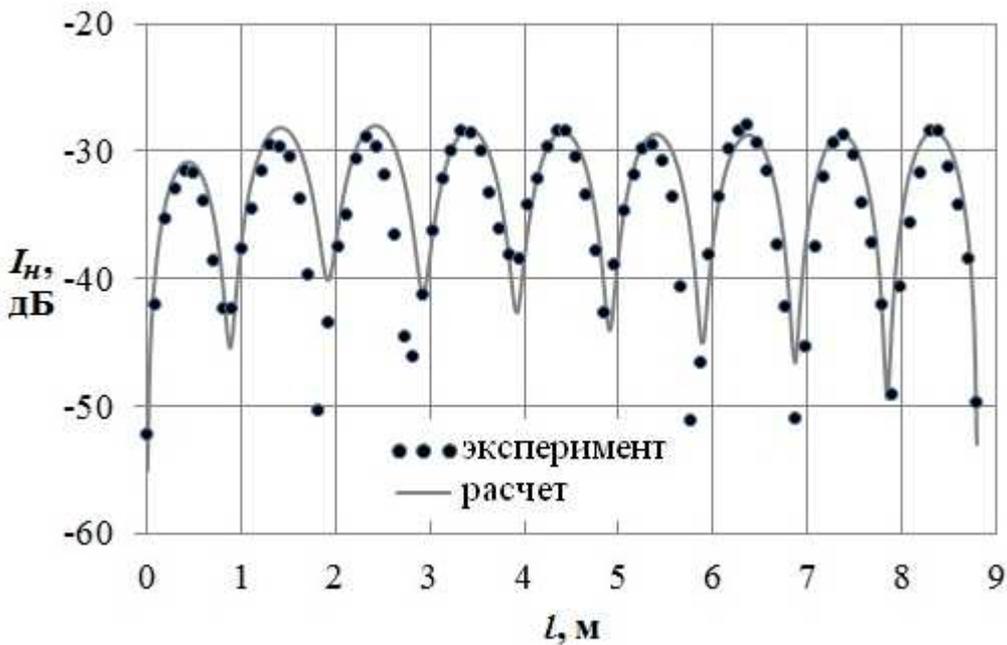
Рисунок 3 – Результаты измерений и расчетов относительного уровня тока, наведенного в тонком проводе, при параллельном расположении антенны

Анализ рис. 3 показывает достаточно хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов. Однако наблюдается незначительное смещение вдоль провода пучностей и узлов измеренного тока относительно

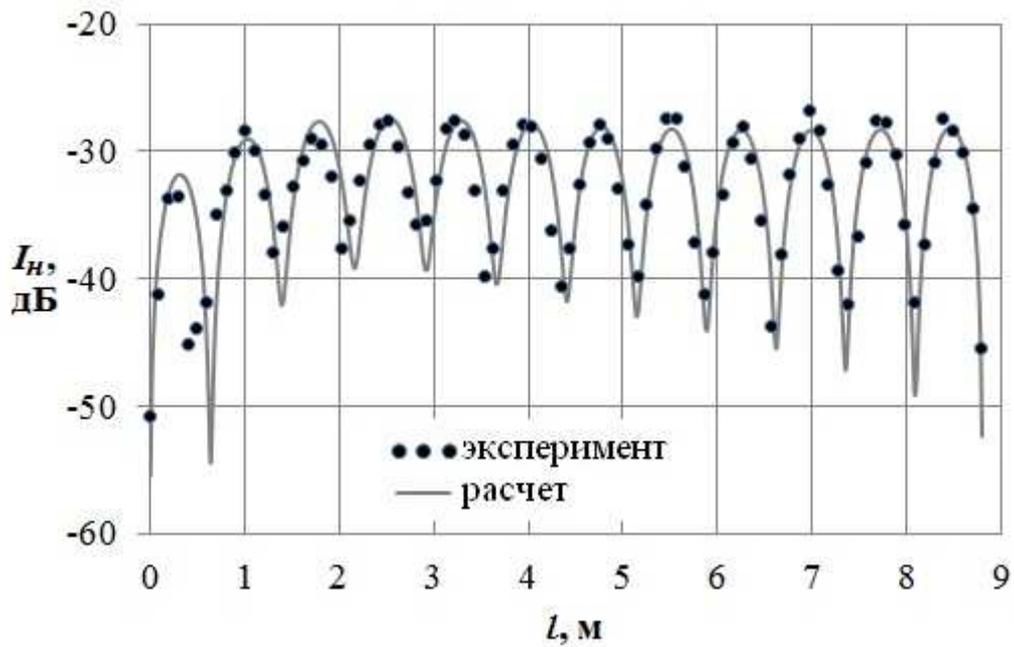
рассчитанных значений. Возможно, это объясняется расположением антенны параллельно стенам. Отраженные от стен волны имеют весьма существенный уровень и оказывают влияние на результирующее поле в точках размещения проводной линии (что при расчетах не учитывалось), а, следовательно, и на распределение тока в проводной линии.



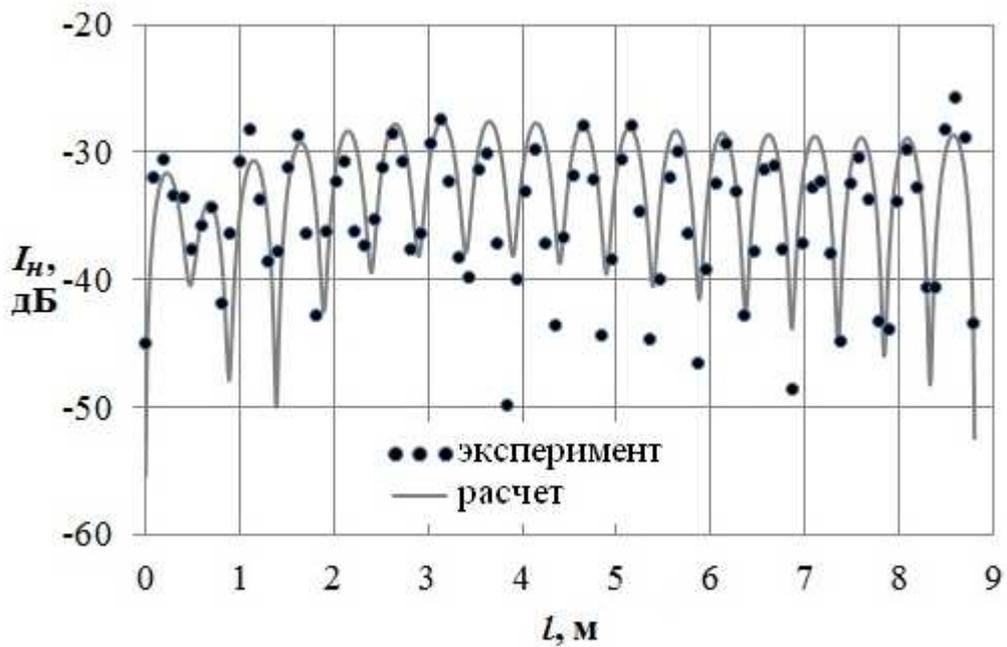
а) $f = 100$ МГц



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

Анализ рис. 4 показывает лучшее согласование экспериментальных и теоретических результатов (в сравнение с предыдущим вариантом размещения

излучателя). В данном случае ось антенны перпендикулярна стенам и влияние отраженных от стен волн не столь существенно.

Распределение тока в линии носит осциллирующий характер (режим стоячих волн), что обусловлено отражением сигнала от концов проводной линии. Частота осцилляций зависит от длины волны сигнала. Следует отметить, что на практике концы линии могут подключаться к оконечным устройствам (например, к телефонным аппаратам). Однако нагрузка, оказывающая существенное влияние на уровень информационного (например, телефонного) сигнала, практически не влияет на распределение наведенного тока в линии: закон распределения тока в проводах линии с нагрузкой повторяет закон распределения тока в разомкнутой на концах линии. Поэтому на практике в линиях часто наблюдаются стоячие волны наведенных сигналов [15].

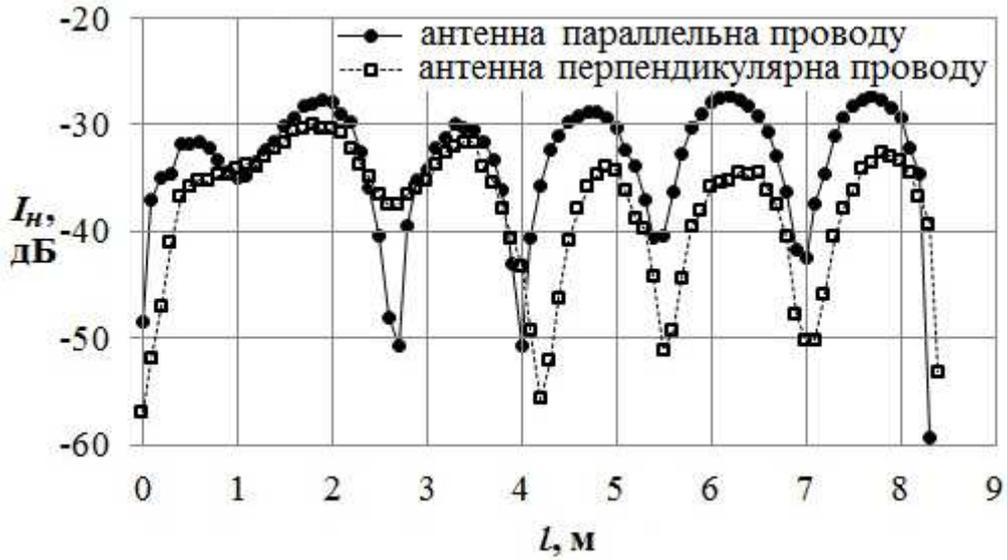
Поскольку с точки зрения перехвата информации наиболее опасными являются максимальные значения осциллирующего тока, в дальнейшем анализ затухания наведенного сигнала будет проводиться по уровню тока в пучностях.

Важно отметить, что монотонного убывания уровня тока в пучностях при удалении от начала провода не наблюдается даже при увеличении частоты сигнала до 300 МГц. При этом на начальном участке проводной линии (до 1-2 м) максимальные уровни токов в пучности могут убывать или возрастать с расстоянием в зависимости от ориентации излучателя относительно провода, однако при дальнейшем увеличении расстояния уровни тока в пучностях практически не меняются.

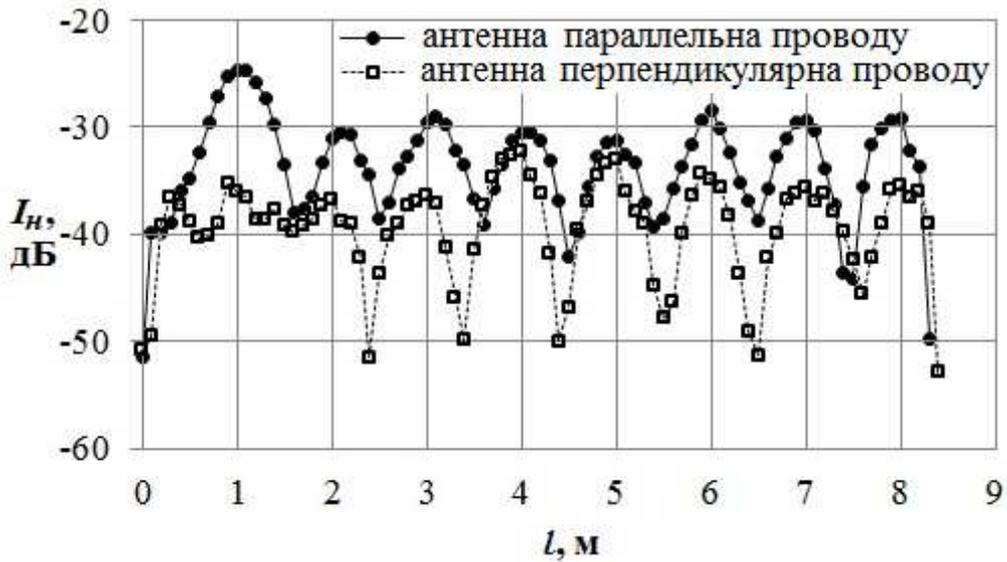
Исследование затухания наводок в сетевом кабеле.

Для сравнения также проведены измерения уровней токов, наведенных в более сложной токопроводящей линии – сетевом кабеле CAT-5 (4 витые пары), покрытом внешней изоляцией. Следует отметить, что под воздействием внешнего излучения токи наводятся в каждом проводе кабеля. Однако в отличие от токов стандартного информационного сигнала, протекающих в проводах отдельной витой пары противофазно, наведенные внешним полем токи синфазны. Токосъемник реагирует на суммарное магнитное поле, создаваемое токами,

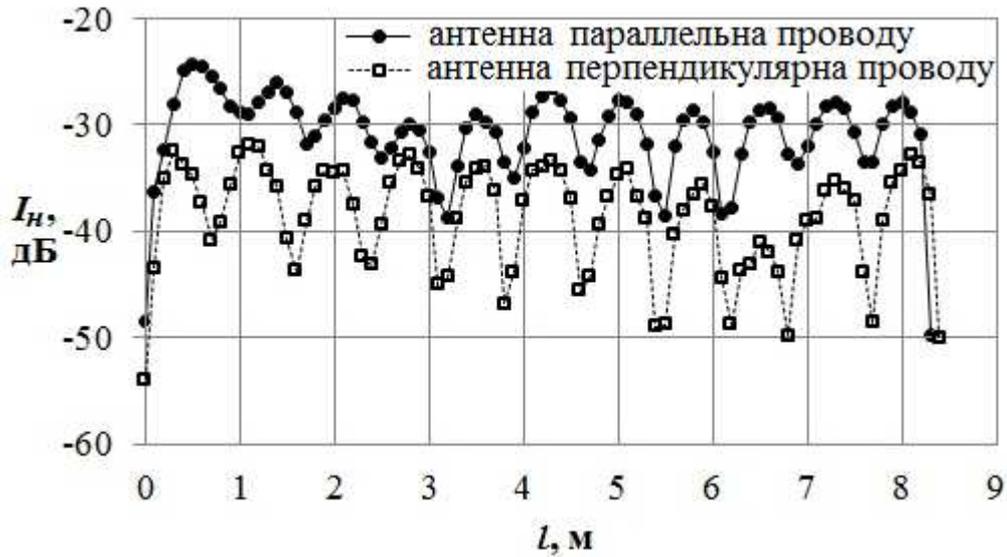
протекающими по всем проводам кабеля. Поэтому в данном случае измеряется не ток в отдельном проводе, а некоторый эквивалентный (суммарный) ток всего кабеля. Полученные результаты представлены на рис. 5.



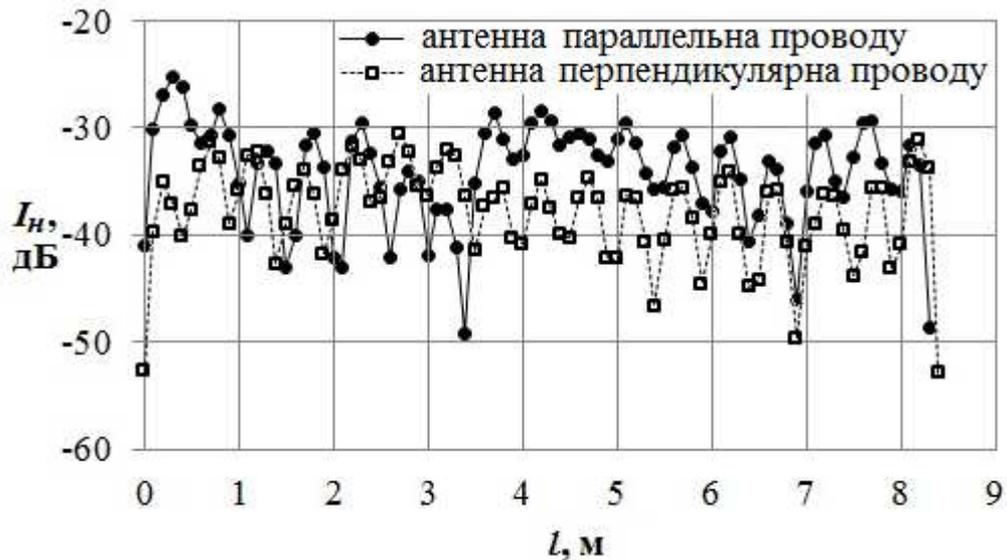
а) $f = 100$ МГц



б) $f = 150$ МГц



в) $f = 200$ МГц



г) $f = 300$ МГц

Рисунок 5 – Результаты измерений относительного уровня тока, наведенного в сетевом кабеле, при параллельном и перпендикулярном расположении антенны

Анализ рис. 5 показывает, что также как и в простейшей однопроводной линии, в многопроводном кабеле (витой паре) не наблюдается монотонного затухания сигнала вдоль линии. При этом характер изменения уровней тока в пучностях на начальном участке линии также обусловлен вариантом расположения антенны относительно кабеля.

Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования уровней наведенного сигнала при размещении линии в комнате на высоте 1 м над уровнем пола. Показано, что на частотах до 300 МГц при длине линии порядка 9 м измерить затухание сигнала в материалах однопроводной линии не представляется возможным в связи с весьма малой величиной потерь. Аналогичные результаты получены при исследовании затухания сигналов в сетевой кабеле (витой паре) с внешней изоляцией. Следует полагать, что данный тип затухания будет весьма мал и при длине линии в несколько десятков метров, что также подтверждается известными данными [7, 8] для однопроводной линии в свободном пространстве.

2. Характер изменения уровней тока в пучностях на начальном участке линии определяется ориентацией антенны относительно провода линии.

3. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных результатов и результатов численных расчетов уровней наведенных токов на основе метода моментов с использованием модели подстилающей поверхности Зоммерфельда-Нортон. Показано достаточно хорошее соответствие экспериментальных и расчетных результатов, что позволяет сделать вывод о возможности использования данного численного аппарата прогнозирования уровней сигналов в токопроводящей линии при ее размещении над поверхностью пола на достаточном удалении от стен.

4. В качестве направления дальнейших исследований предполагается оценка влияния близкорасположенных к линии поверхностей пола, потолка, стен на затухание наведенного сигнала.

Литература

1. 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.

2. Пятачков А.Г. О результатах исследования сетей электропитания технических средств, используемых для обработки конфиденциальной информации // Вопросы защиты информации. – 1996. – № 1. – С. 26-30.
3. Пятачков А.Г. Кое-что о каналах утечки информации в сетях электропитания // Конфидент. – 2000. – № 3. – С. 52-58.
4. 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.
5. Трушин В.А, Быков С.В. Защита конфиденциальной информации от утечки по цепям электропитания: учебно-метод. пособие. – Новосибирск: НГТУ. – 2007. – 36 с.
6. Черкашин М.В., Бабак Л.И. Линии передачи и согласующие цепи для СВЧ МИС : учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – 54 с.
7. George J. E. Goubau. Surface wave transmission line. [U.S. Patent 2 685 068](#). – July 1954.
8. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. М.: Гос. из-во литературы по вопросам радио и связи. – 1957. – 698 с.
9. Tahsin Akalin. Single-wire transmission lines at terahertz frequencies // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (IEEE-MTT). – Volume 54. – Issue 6. – June 2006. – P. 2762-2767.
10. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике. М.: Издательство «Мир». – 1977. – 485 с.
11. Федоров Д. Утилита «NEC-2 for MMANA» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.qsl.net/ua3avr/Read_me_Rus.htm.
12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. Тупота В.И., Петигин А.Ф. Контроль защищенности средств вычислительной техники от утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений и наводок. Учебное пособие. – Воронеж: Центр повышения квалификации специалистов по технической защите информации. – 2010. – 140 с.