

УДК 621.396.6

Д.Б. Кучер, А.И. Харланов, И.В. Медведь, Л.В. Литвиненко

Академия военно-морских сил имени П.С. Нахимова, Севастополь

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ МНОГОПРОВОДНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Показано, что после воздействия мощными электромагнитными излучениями (МЭМИ), особенно на высоких частотах, значительно ухудшаются основные характеристик подземных многопроводных линий связи и увеличиваются затухания проводимых полезных сигналов. Для повышения стойкости кабельных линий связи к энергетическому влиянию на них МЭМИ предлагается применять дополнительных средств защиты конструкционного типа.

**Ключевые слова:** подземные многопроводные линии связи, электромагнитное излучение, средства защиты.

### Введение

В настоящее время наблюдается активное развитие технологий, направленных на создание радиоэлектронных средств, являющихся искусственными источниками мощных электромагнитных излучений (МЭМИ). Воздействие переменных электромагнитных полей МЭМИ на современные линии связи может привести к наведению на их компонентах высоких уровней токов и напряжений, вследствие чего возможно значительное ухудшение характеристик линии связи, вплоть до их функционального поражения [1].

Анализ результатов экспериментальных исследований, приведенных в работе [1], показал, что в случае воздействия МЭМИ на подземные коаксиальные кабели максимальные уровни наводок будут на их металлических элементах. Не менее актуальным является анализ влияния электромагнитных полей МЭМИ на компоненты многопроводных линий связи. Однако вследствие иной конструкции данного типа кабеля процесс энергетического воздействия будет иметь другой характер [2, 3].

### Основная часть

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований изменения основных характеристик подземных многопроводных линий связи в результате воздействия на них мощных электромагнитных излучений.

**Выбор структуры образцов многопроводных линий связи, схемы экспериментальных исследований и измерительной аппаратуры.** Для проведения экспериментальных исследований было выбрано 30 образцов линий связи на базе наиболее распространенного кабеля e.net.cable.UTP5e (витая пара), конструкция которого представлена на рис. 1. Структурно кабель на витой паре представляет собой изолированные медные проводники, свитые попарно с определенным количеством витков на единицу длины для уменьшения перекрестных на-

водок (рис. 1). Разрывной шнур служит для зачистки внешней изоляционной оболочки кабеля.

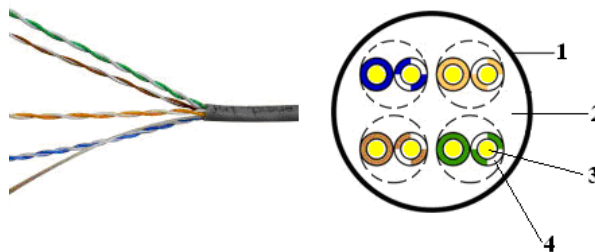


Рис. 1. Внешний вид и конструкция витой пары кабеля e.net.cable.UTP5e:

1 – внешняя изоляционная оболочка;

2 – разрывная нить; 3 – проводники (витая пара);

4 – внутренняя изоляция проводников

В данном многопроводном кабеле поддерживается симплексный характер обмена данными (одна пара – для приема и одна – для передачи).

Основные показатели и характеристики данного кабеля представлены в табл. 1.

Исследования проводились согласно методикам и программам проведения работ, разработанным в Академии ВМС и ХНУРЭ. Схема экспериментальных исследований, генератор МЭМИ и измерительное оборудование были аналогичны случаю для коаксиальных радиочастотных линий связи [1].

Схема проведения экспериментальных исследований, представленная на рис. 2, включает:

– многопроводную линию связи, размещенную внутри земного грунта на глубине 0,7 м;

– экранированную камеру, в которой размещались устройства измерения удельного сопротивления грунта по методу Бургсдорфа и ВЧ анализатор параметров цепей серии ENA-L (E5062A), основные характеристики которого представлены в табл. 2 [5];

– генератор мощных электромагнитных излучений, разработанный в ХНУРЭ для имитации деструктивного воздействия на радиоэлектронные элементы табл. 3, рис. 3 [4].

Таблица 1

Показатели и характеристики кабеля UTP5e

Материал внутренних проводников	медь
Материал внешней изоляционной оболочки	Полиэтилен (ПЭ)
Материал изоляции витых пар	Поливинилхлорид (ПВХ)
Температура плавления ПЭ, °С	90
Температура плавления ПВХ, °С	60
Материал разрывной нити	полиэстер
Температурный диапазон эксплуатации, °С	-20...+55
Сопротивление токопроводящей жилы Ом/км	не более 96
Электрическая емкость пар нФ/км	не более 56
Предельно допустимые вносимые потери в ЛС, Дб (на частоте, Гц): 0,02 ( $10^6$ ); 0,04 ( $4 \cdot 10^6$ ); 0,065 ( $10 \cdot 10^6$ ); 0,093 ( $20 \cdot 10^6$ ); 0,117 ( $31,3 \cdot 10^6$ ); 0,17 ( $62,5 \cdot 10^6$ ); 0,22 ( $62,5 \cdot 10^6$ ); 0,249 ( $125 \cdot 10^6$ ); 1,02 ( $10^9$ ); 1,64 ( $10^{10}$ )	
Предельнодопустимый коэффициент передачи (на частоте, Гц): 0,998 ( $10^6$ ); 0,995 ( $4 \cdot 10^6$ ); 0,993 ( $10 \cdot 10^6$ ); 0,99 ( $20 \cdot 10^6$ ); 0,989 ( $31,3 \cdot 10^6$ ); 0,981 ( $62,5 \cdot 10^6$ ); 0,975 ( $62,5 \cdot 10^6$ ); 0,972 ( $125 \cdot 10^6$ ); 0,889 ( $10^9$ ); 0,828 ( $10^{10}$ )	

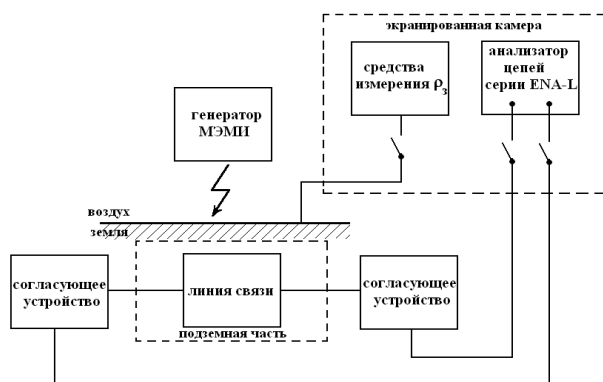


Рис. 2. Схема проведения эксперимента



Рис. 3. Генератор мощных электромагнитных излучений

Таблица 2

Основные параметры ВЧ анализатора параметров цепей серии ENA-L (E5062A)

Диапазон частот	от 300 кГц до 3 ГГц
Измерительный блок	S-параметры
Макс. выходная мощность порта	10 дБм
Импеданс порта	75 Ом
Динамический диапазон системы	115 дБ, полоса ПЧ = 10 Гц (от 300 кГц до 3 ГГц)
Число точек	от 2 до 1601
Уровень зашумленности графика	0,005 дБ (от 1 МГц до 3 ГГц)

Таблица 3

Основные параметры генератора МЭМИ

Емкость накопителя, мкФ	3360
Зарядное напряжение, кВ	2-4,5
Разрядный ток, кА	200-600
Индуктивность разрядного контура, нГн	48
Максимальная мощность, МВт	150
Длительность импульса, мкс	120

**Экспериментальные исследования деструктивного воздействия мощных электромагнитных излучений на подземные многопроводные линии связи.** Экспериментальные исследования состоят из трёх этапов. На первом этапе проводились измерения удельного сопротивления грунта и калибровка ВЧ анализатора цепей.

На втором этапе осуществлялось воздействие МЭМИ на линию связи, размещенную в земном

грунте. Третий этап включал в себя измерения S параметров и коэффициента передачи линий связи после воздействия МЭМИ.

Алгоритм проведения экспериментальных исследований следующий:

1. Провести измерения удельного сопротивления грунта по методу Бургсдорфа.
2. Разместить многопроводную линию связи в грунте технологической площадки.
3. Провести согласование линии связи и калибровку ВЧ анализатора цепей.
4. Провести измерение S параметров и коэффициента передачи линии связи.
5. Произвести заряд накопительной емкости генератора МЭМИ и осуществить деструктивное воздействие на подземную линию связи.
6. Провести измерение S параметров и коэффициента передачи линии связи после воздействия МЭМИ.

Первые три пункта порядка проведения работ были аналогичны экспериментальным исследованиям деструктивных воздействий МЭМИ на коаксиальные линии связи [1]. Значения удельного сопротивления определялись для наносных слоев земли с примесями глины двух типов: низкопроводящая земля (уровень атмосферных осадков за год не превышал 500 мм), высокопроводящая земля (уровень атмосферных осадков за год составлял более 500 мм). Для получения более точного значения к измеряемой величине вводилась поправка, учитывающая сезонное изменение не только влажности, но и температуры. С этой целью измеренная величина умножалась на поправочный коэффициент  $k$ , соответствующий условиям измерения и приводящий значение удельного сопротивления к наибольшей возможной величине. Значения поправочного коэффициента приведены в [6].

Величина удельного сопротивления грунта на момент измерения (июнь) составила: для низкопроводящего грунта  $\rho_3 = 62,409 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ; для высокопроводящего грунта  $\rho_3 = 24,704 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

При выполнении четвертого пункта измерялись значения параметров  $S_{21}$  и  $K_{21}$  до деструктивного воздействия МЭМИ на подземный многопроводный кабель UTP5e. Частотная зависимость параметра  $S_{21}$  отображалась на экране (рис. 4), а значения параметра  $K_{21}$  записывались в табличном виде на жестком диске ВЧ анализатора параметров цепей серии ENA-L (E5062A), после чего в графическом виде отображались с использованием пакета MathCAD (рис. 5).

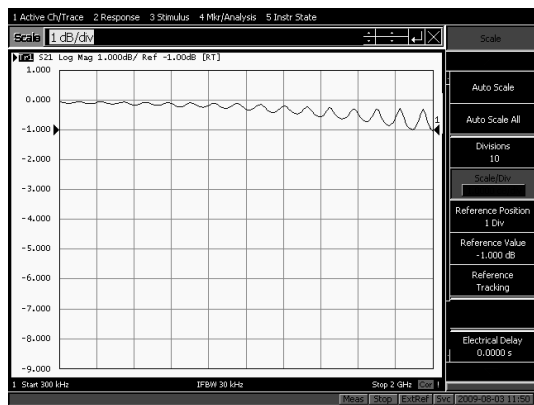


Рис. 4. Экспериментальная зависимость параметра  $S_{21}$  кабеля UTP5e до воздействия МЭМИ

Анализируя экспериментальные зависимости, представленные на рис. 4 и 5, необходимо заметить, что до воздействия МЭМИ на подземный кабель UTP5e значения основных параметров не превышают предельно допустимые величины (пунктирная линия на рис. 5).

На следующем этапе экспериментальных исследований осуществлялось воздействие МЭМИ на многопроводные линии связи, размещенные в низкопроводящем и высокопроводящем грунтах.

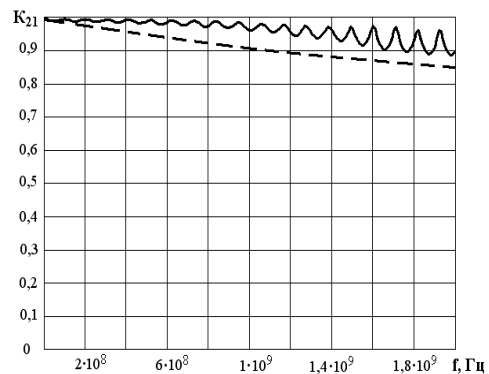


Рис. 5. Экспериментальная зависимость параметра  $K_{21}$  кабеля UTP5e до воздействия МЭМИ

Значения параметров  $S_{21}$  и  $K_{21}$  для низкопроводящего грунта ( $\rho_3 = 62,409 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) представлены на рис. 6 и 7.

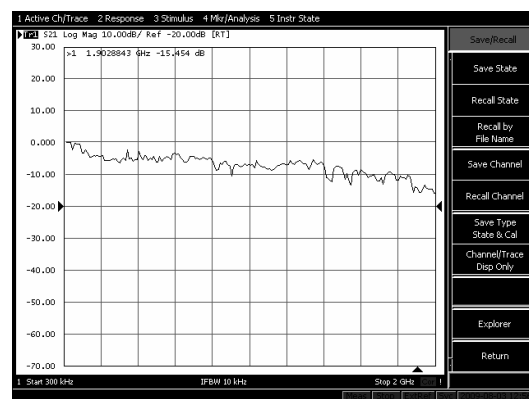


Рис. 6. Экспериментальная зависимость параметра  $S_{21}$  кабеля UTP5e, размещенного в низкопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

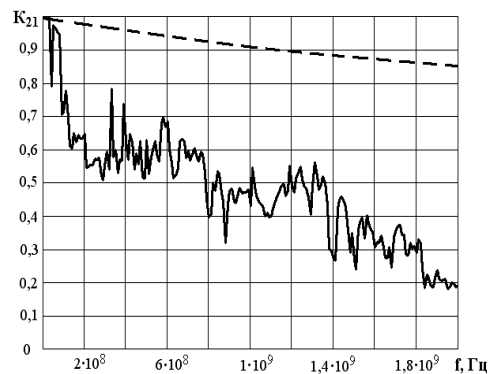


Рис. 7. Экспериментальная зависимость параметра  $K_{21}$  кабеля UTP5e, размещенного в низкопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

В результате анализа экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 6 и 7, можно сделать вывод, что основные характеристики подземного радиочастотного кабеля превышают предельно допустимые на частотах свыше  $1 \cdot 10^8 \text{ Гц}$ . Максимальное ослабление входного сигнала будет происходить на частоте  $\approx 1,9 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ . Это объясняется, прежде всего, тем, что для случая низкопроводяще-

го грунта внешнее воздействие МЭМИ будет наводить опасное напряжение на ближайший к земле проводник, являющийся влияющей цепью на остальные проводящие пары.

Данное воздействие будет приводить к опасному перегреву внутреннего диэлектрика (поливинилхлорида), вызывая его плавление (табл. 1), что неизменно приводит к изменению емкостного сопротивления и значительному ухудшению его частотных характеристик (рис. 6 и 7). Внешняя изоляционная оболочка, выполненная из более тугоплавкого материала (полиэтилена), из-за высокого сопротивления грунта в контуре «земля – влияющая цепь» останется практически не поврежденной. Фотографии среза исследуемого кабеля после воздействия МЭМИ представлены на рис. 8 и 9.



Рис. 8. Фотография общей деградации внутренних проводников кабеля UTP5e, размещенного в низкопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

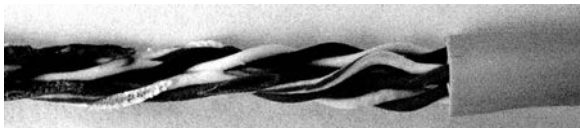


Рис. 9. Фотография общей деградации внутренних проводников и практически не поврежденной внешней оболочки кабеля UTP5e, размещенного в низкопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

Для подземного кабеля UTP5e, размещенного в высокопроводящем грунте, значения параметров  $S_{21}$  и  $K_{21}$  после воздействия МЭМИ представлены на рис. 10 и 11. В результате воздействия МЭМИ на подземный кабель UTP5e, размещенный в высокопроводящем грунте, основные характеристики подземного многопроводного кабеля превышают предельно допустимые практически на всем диапазоне частот (рис. 11).



Рис. 10. Экспериментальная зависимость параметра  $S_{21}$  кабеля UTP5e, размещенного в высокопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

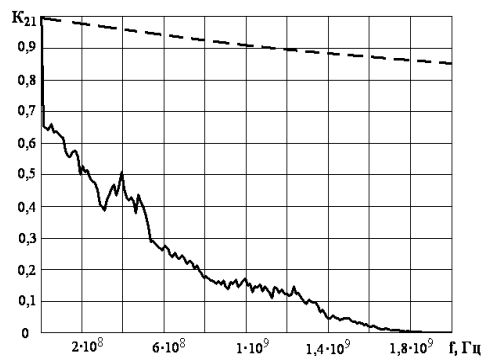


Рис. 11. Экспериментальная зависимость параметра  $K_{21}$  кабеля UTP5e, размещенного в высокопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

Максимальное ослабление входного сигнала будет происходить на частоте  $\approx 1,82 \cdot 10^9$  Гц. Такое значительное ухудшение характеристик кабеля можно объяснить тем, что для высокопроводящей земли внешнее воздействие МЭМИ будет вызывать опасные токи и напряжения в двух контурах: «земля – ближайший проводник» и «ближайший проводник – проводящие пары». В первом контуре ток, наводимый внешними полями МЭМИ, может вызывать опасный перегрев внешней изоляции (полиэтилена), приводя к непосредственному контакту ближайшего к земле проводника и грунта. Повреждение внешней изоляционной оболочки, из-за достаточно низкого сопротивления грунта в контуре «земля – ближайший проводник» наглядно демонстрируют фотографии, представленные на рис. 12.

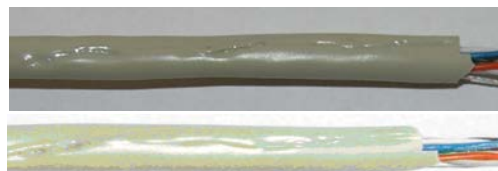


Рис. 12. Фотографии повреждения внешней изоляционной оболочки кабеля UTP5e, размещенного в высокопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

Во втором контуре «ближайший к земле проводник – проводящие пары», как и в случае с низкопроводящей землей, будет происходить плавление внутреннего диэлектрика, что в свою очередь вызывает изменение емкостного сопротивления и значительное ухудшение частотных характеристик кабеля. Фотография среза исследуемого кабеля после воздействия МЭМИ представлены на рис. 13.



Рис. 13. Фотографии повреждения внешней изоляционной оболочки и внутренних проводников кабеля UTP5e, размещенного в высокопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

### Результаты экспериментальных исследований:

1. При проведении экспериментальных исследований воздействия МЭМИ на подземные многопроводные линии связи необходимо учитывать неоднородность структуры верхних слоев земли, которая зависит от типа почв, колебаний уровней грунтовых вод, количества выпадающих осадков и т.д.

2. В зависимости от значения удельного сопротивления наносных слоев земли их можно разделить на низкопроводящие (количество осадков за год не превышает 500 мм) и высокопроводящие (количество осадков за год превышает 500 мм).

3. Для учета изменения удельного сопротивления грунта в зависимости от времени года к измеряемой величине необходимо вводить поправку, учитывающую сезонное изменение температуры.

4. Для анализа изменений частотных параметров подземной многопроводной линии связи можно использовать параметры  $S_{21}$  и  $K_{21}$ , характеризующие величину вносимых потерь и соотношения напряжений на выходе и входе линии связи.

5. После воздействия МЭМИ на многопроводную линию связи УТР5е, находящуюся в низкопроводящем грунте, опасное напряжение будет наводиться на ближайшем к земле проводнике, который является влияющей цепью на остальные проводящие пары. Основные характеристики кабеля будут превышать предельно допустимые на частотах свыше  $1 \cdot 10^8$  Гц. Максимальное ослабление входного сигнала будет происходить на частоте  $\approx 1,9 \cdot 10^9$  Гц.

6. При воздействии МЭМИ на многопроводную линию связи УТР5е, находящуюся в высокопроводящем грунте, токи и напряжения будут наводиться уже в двух контурах «земля – ближайший проводник» и «ближайший проводник – проводящие пары», вызывая опасный перегрев как внешней изоляции (полиэтилена), так и внутреннего диэлектрика, что в свою очередь вызывает изменение емкостного сопротивления и значительное ухудшение частотных характеристик кабеля на частотах свыше  $3 \cdot 10^5$  Гц.

### Выводы

Результаты экспериментальных исследований, представленные в данной работе, свидетельствуют о значительном ухудшении основных характеристик подземных многопроводных линий связи и увеличении затухания проводимых полезных сигналов после воздействия на них мощными электромагнитными излучениями, особенно на высоких частотах. Поэтому для повышения стойкости кабельных линий связи к энергетическому влиянию на них МЭМИ целесообразно применение дополнительных средств защиты конструкционного типа.

### Список литературы

1. Кучер Д.Б. Экспериментальные исследования деструктивного влияния мощных электромагнитных излучений на подземные коаксиальные линии связи / Д.Б. Кучер, А.И. Харланов, И.В. Медведь, Л.В. Литвиненко // *Інтерговані технології та енергозбереження*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – № 4. – С. 55-63.
2. Кучер Д.Б. Особенности воздействия мощных электромагнитных излучений на внешние металлические оболочки подземных радиочастотных линий связи / Д.Б. Кучер, А.И. Харланов, И.В. Медведь, Л.В. Литвиненко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – К.: ЦНДІ НіУ, 2008. – Вип. 2(6). – С. 167-171.
3. Михайлов М.И. Электромагнитное влияние на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Связь, 1979. – 264 с.
4. Чумаков В.И. Экспериментальный ускорительный комплекс ХНУРЭ для исследований ЭМС / В.И. Чумаков, Ю.А. Волколупов, М.А. Острижной, А.В. Столярчук, О.И. Харченко // *Сб. научн. Тр. 2-го Межд. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития»*. – 2005. – Т. 6. – С. 74-77.
5. Agilent Technologies, "Pulsed Measurements with the Agilent 8720ES and 8753ES Network Analyzers", Agilent Technologies Product Note, May 2000.
6. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств / С.И. Коструба. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Поступила в редколлегию 5.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕСТРУКТИВНОЇ ДІЇ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ НА ПІДЗЕМНІ БАГАТОПРОВІДНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ

Д.Б. Кучер, О.І. Харланов, І.В. Медвідь, Л.В. Літвіненко

Показано, що після дії потужними електромагнітними випромінюваннями (ПЕМВ), особливо на високих частотах, значно погіршуються основні характеристик підземних багатопровідних ліній зв'язку і збільшуються загасання проводимих корисних сигналів. Для підвищення стійкості кабельних ліній зв'язку до енергетичного впливу на них ПЕМВ пропонується застосовувати додаткові засоби захисту конструкційного типу.

**Ключові слова:** підземні багатопровідні лінії зв'язку, електромагнітне випромінювання, засоби захисту.

### EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DESTRUCTIVE INFLUENCE OF POWERFUL ELECTROMAGNETIC RADIATIONS ON UNDERGROUND MULTIPLE-WIRE FLOW LINES

D.B. Kucher, A.I. Harlanov, I.V. Medved', L.V. Litvinenko

It is rotined that after influence powerful electromagnetic radiations (PEMR), especially on high-frequencies, the basic are considerably worsened descriptions of underground multiple-wire flow lines and fadings of the conducted useful signals are increased. For the increase of firmness of cable lines to power influence on them it is suggested to apply PEMR additional funds of defence of construction type.

**Keywords:** underground multiple-wire flow lines, electromagnetic radiation, facilities of defence.