

УДК 621.396.6

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Введение. Современный этап развития научно-технического прогресса характеризуется широким распространением информационных технологий в различных сферах жизнедеятельности общества. В этой связи все более актуальными становятся вопросы обеспечения передачи информации по различным линиям связи, в основе функционирования которых лежат электромагнитные процессы, связанные с распространением сигналов. Однако, развитие различных радиоэлектронных средств как военного, так и гражданского назначения приводит к усложнению электромагнитной обстановки, влияющей на нормальное функционирование линий передачи информации [1, 2].

Одним из наиболее распространенных видов линий связи являются подземные радиочастотные кабели, на работу которых могут оказывать воздействие электромагнитные излучения от различных источников как естественного, так и искусственного происхождения [1]. Именно этим объясняется актуальность исследований, результаты которых представлены в данной работе.

Целью работы является проведение экспериментальных исследований изменений основных характеристик подземных коаксиальных линий связи после воздействия мощных электромагнитных излучений.

Выбор структуры образцов радиочастотных линий связи, схемы экспериментальных исследований и измерительной аппаратуры. Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено 30 образцов линий связи на базе наиболее распространенного коаксиального кабеля РК-75-4-11, основные показатели и характеристики которого представлены в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Показатели и характеристики кабеля РК-75-4-11

Материал внутреннего и внешнего проводника	медь
Материал изоляции и оболочки	ПЭ
Конструкция внешнего проводника	оплетка
Температурный диапазон эксплуатации, °С	-60...+85
Волновое сопротивление, Ом	75±2,5
Предельно-допустимый коэффициент передачи (на частоте, Гц)	0,997 (10 ⁷)
	0,988(10 ⁸)
	0,944(10 ⁹)
	0,799(10 ¹⁰)
Напряжение начала внутренних разрядов, кВ	2,5

Исследования проводились согласно методикам и программам проведения работ, разработанных в Академии ВМС и ХНУРЭ. Схема проведения экспериментальных исследований представлена на рис. 1.

Структурно данная схема экспериментальных исследований включает в себя:

- согласованную коаксиальную 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) (см. рис. 2), основные характеристики которого представлены в таблице 2 [4];
- генератор мощных электромагнитных излучений, разработанный в ХНУРЭ для имитации деструктивного воздействия на радиоэлектронные элементы (табл. 3, рис. 3), [3].

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 шумленности графика	0, 005 дБ (от 1 МГц до 3 ГГц)

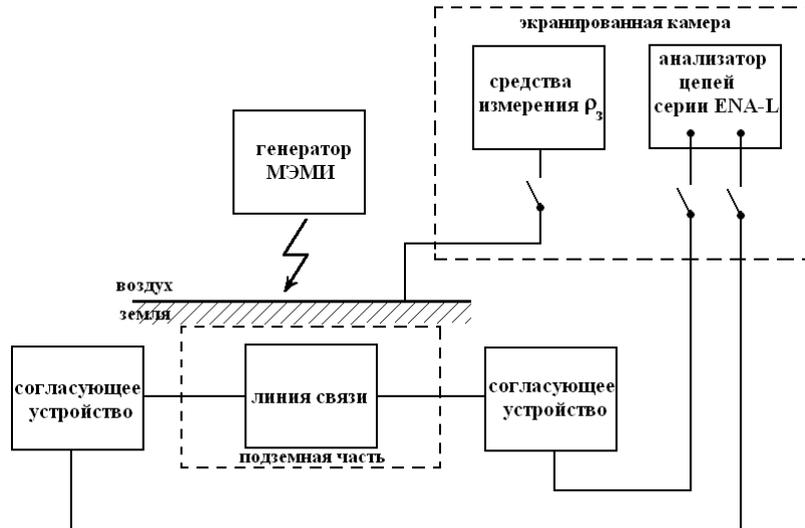


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента

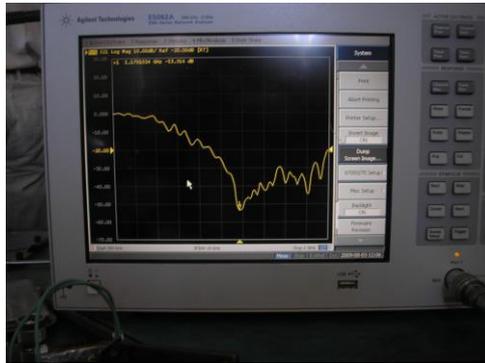


Рисунок 2 – Внешний вид ВЧ анализатора параметров цепей серии ENA-L (E5062A)



Рисунок 3 – Генератор мощных электромагнитных излучений

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 воздействия МЭМИ на подземные коаксиальные линии связи. Экспериментальные исследования проводились в три этапа. 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. На третьем этапе проводились измерения S параметров и коэффициента передачи линий связи после воздействия МЭМИ.

Порядок проведения работ был следующим:

1. Провести измерения удельного сопротивления грунта по методу Бургсдорфа.
2. Разместить коаксиальную 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.

Основной причиной проведения измерений удельного сопротивления грунта по методу Бургсдорфа (первый этап) является неоднородность структуры верхних слоев земли [5]. Степень неоднородности может изменяться во времени и зависит от типа почв, колебаний уровней грунтовых вод, количества выпадающих осадков, температуры и влажности воздуха, характера растительности и хозяйственной деятельности человека.

Схема измерения удельного сопротивления грунта представлена на рисунке 4.

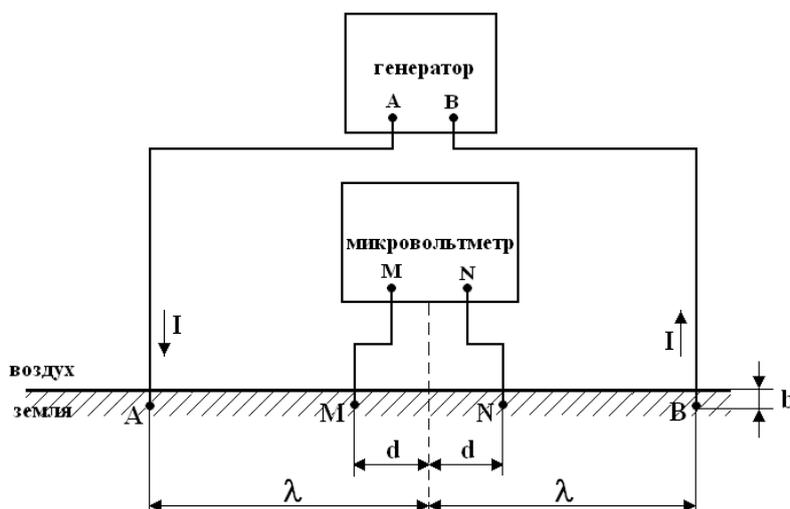


Рисунок 4 – Схема измерения удельного сопротивления грунта по методу Бургсдорфа

Структурно она состоит из генератора стабилизированного электрического тока, микровольтметра, двух потенциальных электродов М и N и двух токовых электродов А и В, которые перед зондированием должны быть погружены в землю. Все электроды расположены на одном уровне. Глубина расположения электродов b выбиралась из условия [5]:

$$b \leq \frac{2d}{3},$$

где d – половина расстояния между точками М и N (см. рисунок 4).

Значение удельного сопротивления определялось с использованием следующего выражения [2, 5]:

$$\rho_3 = \frac{U_{MN}}{I} \left[\frac{\pi(\lambda^2 - d^2)}{2d} \right],$$

где U_{MN} – напряжение между точками М и N, определяемое микровольтметром; I – ток стабилизированного генератора; λ – половина расстояния между точками А и В.

Значения удельного сопротивления определялись для наносных слоев земли с примесями глины двух типов. Для первого типа учитывалось, что с учетом климата уровень атмосферных осадков за год не превышал 500 мм (низкопроводящая земля). Для второго случая имитировался уровень осадков превышающий 500 мм в год (высокопроводящая земля). Поскольку удельное сопротивление грунта изменяется также в зависимости от времени года, то 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 представлены в таблице 4.

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

Таблица 4 – Значения поправочного коэффициента k по месяцам года для различных областей Украины

Районы измерения	Месяца измерения											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Северные области Украины	1,2	1,1	1	1,2	1,3	1,55	1,75	1,55	1,7	1,5	1,3	1,35
Южные области Украины	1,15	1	1,1	1,24	1,74	1,73	1,55	1,49	1,57	1,6	1,6	1,3

Для проведения эксперимента использовались два участка технологической площадки (низкопроводящая и высокопроводящая). После измерения величин удельного сопротивления грунта, образцы линий передачи размещались в существующих горизонтальных шахтах двух участков технологической площадки, находящихся на глубине 0,7 м и обеспечивающих непосредственный контакт внешней изоляции с землей.

После согласования линии связи проводилась калибровка ВЧ анализатора цепей ENA-L (E5062A) при помощи модуля ECal (см. рисунок 5). Данный модуль, в отличие от традиционного механического метода, позволяет проводить автоматически электронную калибровку однократным подключением к портам анализатора цепей [4].



Рисунок 5 – Внешний вид модуля электронной калибровки ECal

По окончании калибровки анализатора цепей измерялись значения параметров S_{21} и K_{21} .

Параметр S_{21} характеризует величину вносимых потерь в линии связи на определенной частоте. Коэффициент передачи K_{21} характеризует соотношения напряжений на выходе и входе линии связи также для определенной частоты.

Частотная зависимость параметра S_{21} отображалась на экране (см. рисунок 6). 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 (см. рисунок 7).

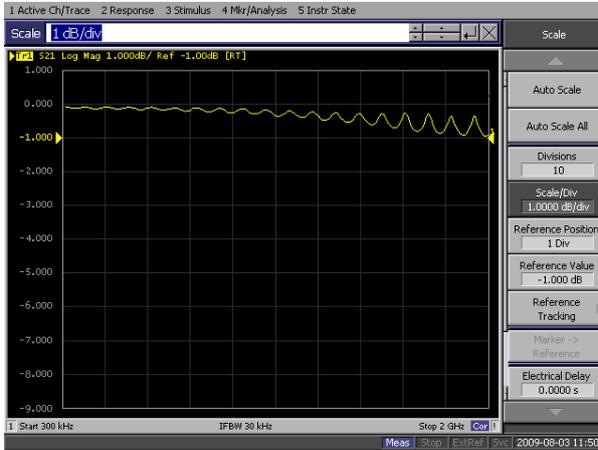


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость параметра S_{21} коаксиального кабеля РК-75-4-11 до воздействия МЭМИ

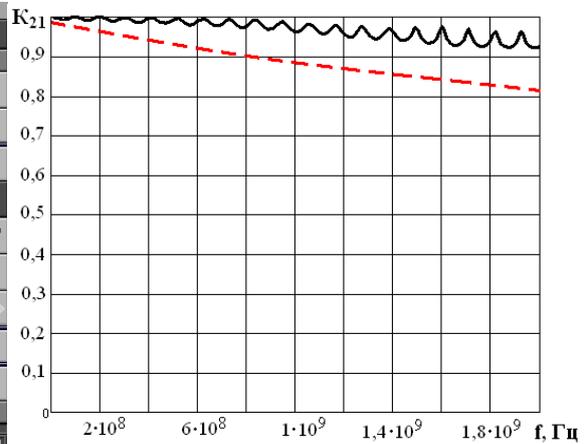


Рисунок 7 – Экспериментальная зависимость параметра K_{21} коаксиального кабеля РК-75-4-11 до воздействия МЭМИ

Анализируя экспериментальные зависимости, представленные на рисунках 6 и 7, необходимо заметить, что до воздействия МЭМИ на подземный коаксиальный кабель РК-75-4-11, значения основных параметров не превышают предельно допустимые величины (пунктирная линия на рисунке 7).

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

Значения параметров S_{21} и K_{21} для низкопроводящего грунта представлены на рисунках 8 и 9.

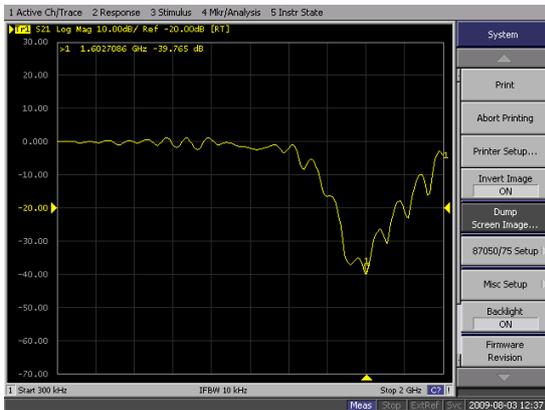


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость параметра S_{21} коаксиального кабеля РК-75-4-11, размещенного в низкопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

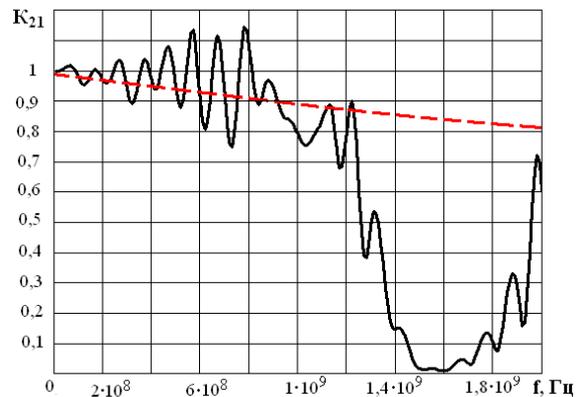


Рисунок 9 – Экспериментальная зависимость параметра K_{21} коаксиального кабеля в РК-75-4-11, размещенного в низкопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

Анализируя экспериментальные зависимости, представленные на рисунках 8 и 9, необходимо заметить, что основные характеристики подземного радиочастотного кабеля превышают предельно допустимые на частотах свыше $3 \cdot 10^8$ Гц. Максимальное ослабление входного сигнала будет происходить на частоте $\approx 1,6 \cdot 10^9$ Гц. Это объясняется, прежде всего, тем, что для случая низкопроводящей земли

внешнее воздействие МЭМИ будет вызывать опасные токи и напряжения в контуре «металлическая оболочка–жила» (см. рисунок 10), определяемого конструкцией коаксиального кабеля [1]. Данное воздействие будет приводить к опасному перегреву внутреннего диэлектрика (полиэтилена), вызывая его плавление, что неизменно приводит к изменению емкостного сопротивления и значительному ухудшению его частотных характеристик (см. рисунки 8 и 9). Фотографии среза исследуемого кабеля после воздействия МЭМИ представлены на рисунке 11.

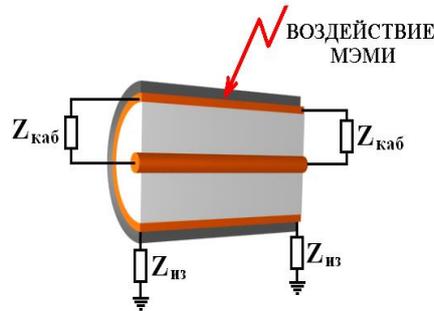


Рисунок 10 – Основные контуры воздействия полей МЭМИ на подземный коаксиальный кабель

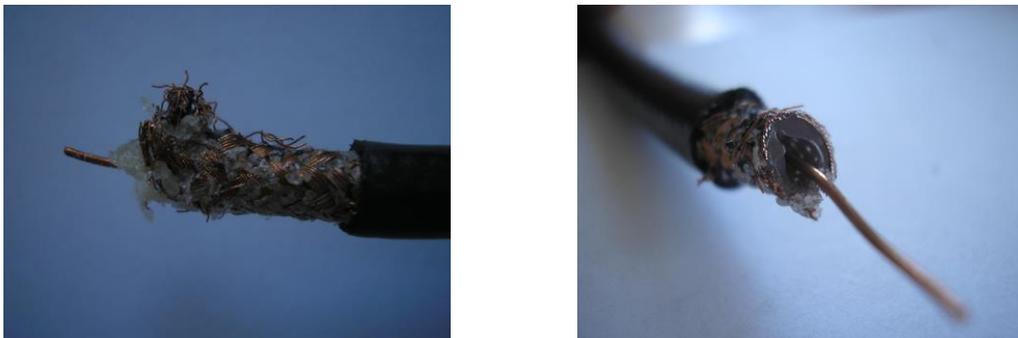


Рисунок 11 – Фотографии коаксиального кабеля РК-75-4-11, размещенного в низкопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

Для коаксиального кабеля, размещенного в высокопроводящем грунте, значения параметров S_{21} и K_{21} после воздействия МЭМИ представлены на рисунках 12 и 13.



Рисунок 12 – Экспериментальная зависимость параметра S_{21} коаксиального кабеля РК-75-4-11, размещенного в высокопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

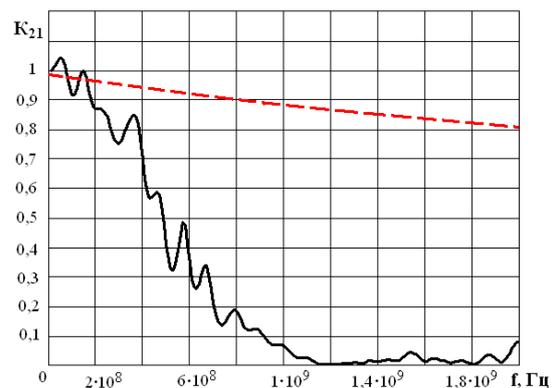


Рисунок 13 – Экспериментальная зависимость параметра K_{21} РК-75-4-11, размещенного в высокопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

Анализируя экспериментальные зависимости, представленные на рисунках 12 и 13, необходимо заметить, что основные характеристики подземного радиочастотного кабеля превышают предельно допустимые уже на частотах свыше $0,3 \cdot 10^8$ Гц. Максимальное ослабление входного сигнала будет происходить на частотах свыше $1,17 \cdot 10^9$ Гц. В данном случае изменение частотных характеристик можно объяснить тем, что для высокопроводящей земли внешнее воздействие МЭМИ будет вызывать опасные токи и напряжения в двух контурах «металлическая оболочка – земля» и «металлическая оболочка – жила» (см. рисунок 10) [1, 2]. В первом контуре ток, наводимый внешними полями МЭМИ, может вызывать опасный перегрев внешней изоляции, приводя к непосредственному контакту металлической оболочки и грунта. Во втором контуре будет происходить плавление внутреннего диэлектрика, что приведет к изменению емкостного сопротивления и значительному ухудшению частотных характеристик кабеля. Фотографии срезов исследуемого кабеля после воздействия МЭМИ представлены на рисунках 14 и 15.



Рисунок 14 – Фотография общей деградации коаксиального кабеля РК-75-4-11, размещенного в высокопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

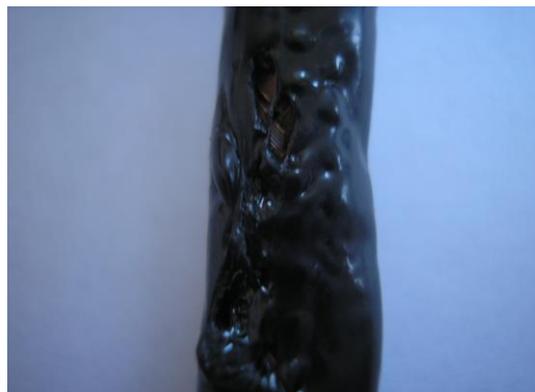


Рисунок 15 – Фотография деградации внешней изоляции коаксиального кабеля РК-75-4-11, размещенного в высокопроводящем грунте, после воздействия МЭМИ

Результаты экспериментальных исследований.

1. При проведении экспериментальных исследований воздействия МЭМИ на подземные радиочастотные линии связи необходимо учитывать неоднородность структуры верхних слоев земли. Степень неоднородности слоев земли может изменяться во времени и зависит от типа почв, колебаний уровней грунтовых вод, количества выпадающих осадков, температуры и влажности воздуха и т.д.

2. Значения удельного сопротивления наносных слоев земли 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. При внешнем воздействии полей МЭМИ на коаксиальный кабель, расположенный под земной поверхностью, необходимо рассматривать два электрических контура, связанных с расположением и конструктивными особенностями линии передачи: «земля–металлическая оболочка» и «металлическая оболочка–жила».

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

6. После воздействия МЭМИ на коаксиальную линию связи РК-75-4-11, находящуюся в низкопроводящем грунте, основной ток будет наводиться в контуре «металлическая оболочка – жила», определяемом конструкцией коаксиального кабеля, вызывая плавление внутреннего диэлектрика (полиэтилена) и сужение его амплитудно-частотной характеристики с $3 \cdot 10^9$ Гц до $3 \cdot 10^8$ Гц. Максимальное ослабление входного сигнала будет происходить на частоте $\approx 1,6 \cdot 10^9$ Гц.

7. После воздействия МЭМИ на коаксиальную линию связи РК-75-4-11, находящуюся в высокопроводящем грунте, опасные токи и напряжения будут наводиться в двух контурах «металлическая оболочка–земля» и «металлическая оболочка–жила», вызывая плавление не только внутреннего, но и внеш-

него диэлектриков и сужение его амплитудо-частотной характеристики с $3 \cdot 10^9$ Гц до $0,3 \cdot 10^8$ Гц. Максимальное ослабление входного сигнала будет происходить на частоте $1,17 \cdot 10^9$ Гц.

Выводы. В результате воздействия мощных электромагнитных излучений на подземные линии связи в их диэлектрических элементах происходят необратимые изменения, которые будут вызывать значительные затухания полезных сигналов, особенно на высоких частотах.

Для ограничения влияния МЭМИ как естественного (грозовой разряд), так и искусственного (излучения специализированных высоковольтных установок) происхождения, необходимо применять конструкционные методы защиты.

Литература

1. 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.:Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління, 2008.– Вип..2(6).– С. 167–171.

2. Михайлов М.И. Электромагнитное влияние на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А.Соколов.– М.: Связь, 1979. – 264 с.

3. 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 // Сборник научных трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», 2005, том 6.– С. 74–77.

4. AgilentTechnologies, "Pulsed Measurements with the Agilent 8720ESand 8753ES Network Analyzers", Agilent Technologies Product Note, May 2000.

5. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств / С.И. Коструба. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

УДК 621.396.6

Кучер Д.Б., Харланов О.І., Медведь І.В., Литвиненко Л.В.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕСТРУКТИВНОГО ВПЛИВУ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ НА ПІДЗЕМНІ КОАКСІАЛЬНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ

У роботі розглядаються та аналізуються результати проведення експериментальних досліджень змін основних характеристик підземних коаксіальних ліній зв'язку після впливу потужних електромагнітних випромінювань.

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

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DESTRUCTIVE INFLUENCE OF POWERFUL ELECTROMAGNETIC RADIATIONS ON UNDERGROUND COAXIAL FLOW LINES

In work examined and analyzed results of realization of experimental researches of changes of basic descriptions of underground coaxial flow lines after influence of powerful electromagnetic radiations.