

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

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ МНОГОПРОВОДНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ

Актуальность и постановка задачи. Одним из факторов, представляющих угрозу нормальному функционированию подземных кабельных радиочастотных линий связи (КРЛС), является воздействие на них мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) различного происхождения [1–4]. Под влиянием переменных электромагнитных полей, создаваемых источниками МЭМИ (грозовой разряд, излучение мощных радиопередающих средств и новейшие системы радиоэлектронной борьбы), на проводящих элементах линий связи наводятся напряжения и токи, которые могут стать причиной расплавления диэлектрических компонентов (функционального поражения) [1–4].

При анализе воздействия МЭМИ на линии передачи информации следует учитывать место их расположения, поскольку процессы взаимодействия переменных электромагнитных полей с проводниками зависят и от среды, окружающей кабель. Так для подземных радиочастотных линий связи земля выступает в роли проводящего полупространства и существенным образом влияет на их электрические характеристики [5, 6].

Цель исследования. Анализ результатов исследований функционального поражения подземных коаксиальных КРЛС [1, 2], показал, что максимальные уровни наводок в результате воздействия МЭМИ можно ожидать на внешних металлических оболочках КРЛС. Для многопроводных структур, применяемых в данное время наиболее часто, особенности энергетического воздействия будут иными, в связи с другой конструкцией КРЛС. Поэтому целью данной работы является моделирование функционального поражения подземных многопроводных КРЛС мощными электромагнитными излучениями.

Рассмотрим электромагнитное влияние МЭМИ на подземную многопроводную линию связи, помещенную вглубь земной поверхности. Для определения наводимых МЭМИ токов и напряжений представим структуру представленную на рисунке 1. Данная структура включает в себя внешнюю изоляционную оболочку и внутренние проводники, которые для уменьшения взаимного влияния тоже покрыты изоляцией.

Если кабель включает в себя n проводников, то методику определения наведенных токов и напряжений в результате воздействия МЭМИ будем проводить из условий, что от земного грунта на ближайший проводник (жилу) будет наведено опасное напряжение. В этом случае данный проводник будем считать влияющей цепью на все остальные $n - 1$ жилы.

В общем случае напряжения в начале и конце участка воздействия определяются следующим образом [4–6]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{U}_1(0)z_{e2}N_n [1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2\gamma_2; \\ \dot{U}_k &= \dot{U}_1(0)z_{e2}N_k [1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2\gamma_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{U}_1(0)$ – напряжение во влияющей цепи; z_{e2} – волновое сопротивление цепи, подверженной электромагнитному влиянию; γ_2 – постоянная распространения электромагнитных волн в цепи, подверженной влиянию; l – раскрыт рупора генератора МЭМИ [3, 4]; $N_n = Y_{12} + Z_{12} / z_{e1}z_{e2}$, $N_k = Y_{12} - Z_{12} / z_{e1}z_{e2}$ – коэффициенты, учитывающие влияние индуктивности и емкости между жилами, где $Y_{12} \approx j\omega C_{12}$ и $Z_{12} \approx j\omega M_{12}$ – проводимость электрической связи и сопротивление магнитной связи на единицу длины между жилами соответственно; C_{12} – коэффициент емкостной связи; M_{12} – взаимная индуктивность.

Поскольку рассматриваемая система не имеет замкнутых контуров, взаимная индуктивность M_{12} между жилами будет близка к нулю [6]. Кроме того, учитывая, что воздействие происходит на небольшом участке трассы кабеля, определяемом линейными размерами рупора, коэффициент $N_n = N_k$. Таким образом, напряжение \dot{U} в начале и конце участка воздействия будет определяться следующей зависимостью:

$$\dot{U} = \dot{U}_1(0)z_{e2}N[1 - \exp(-\gamma_2 l)]/2\gamma_2, \quad (2)$$

где $N \approx j\omega C_{12}$.

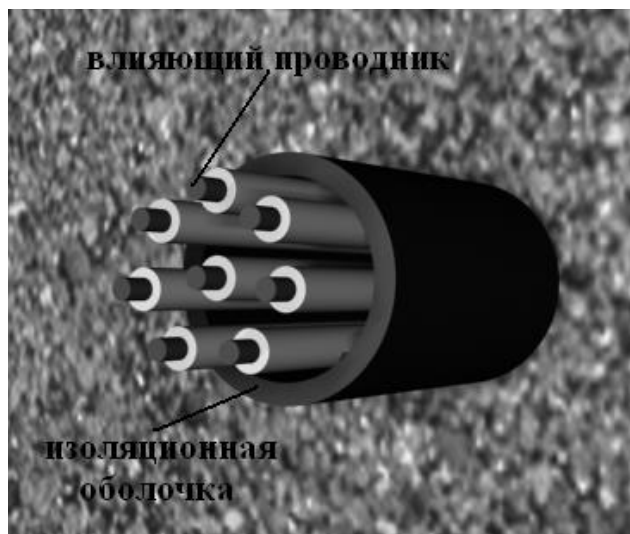


Рисунок 1 – Структура подземной многопроводной линии связи

В этом случае, задача нахождения суммарного напряжения будет сводиться на первом этапе к определению емкостной связи между жилами подземного радиочастотного кабеля [5, 6].

Величина емкости между двумя проводниками зависит не только от их размеров и свойств окружающей среды, но и от наличия соседних проводов.

Определение емкостных связей между жилами осуществляется путем нахождения зависимости между потенциалами и зарядами соседних жил при помощи уравнений Максвелла [6]:

$$\begin{cases} U_1 = 18 \cdot 10^6 (q_1 \alpha_{11} + q_2 \alpha_{12} + q_n \alpha_{1n}) \\ U_2 = 18 \cdot 10^6 (q_1 \alpha_{21} + q_2 \alpha_{22} + q_n \alpha_{2n}) \\ \dots \dots \dots \\ U_n = 18 \cdot 10^6 (q_1 \alpha_{n1} + q_2 \alpha_{n2} + q_n \alpha_{nn}), \end{cases} \quad (3)$$

где U_1, U_2, \dots, U_n – потенциалы соответствующих жил; q_1, q_2, \dots, q_n – заряды на жилах; $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1n}, \alpha_{21}, \dots, \alpha_{nn}$ – коэффициенты, определяемые по формуле:

$$\alpha_{ik} = \alpha_{ki} = \ln \frac{D_{ik}}{r_i} \quad (4)$$

Здесь D_{ik} – расстояние между проводником i и зеркальным изображением проводника k , $\alpha_{ik} = \alpha_{ki}$ – расстояние между проводниками i и k . (При $i = k$: D_{ii} – расстояние между проводником и его зеркальным изображением; r_i – радиус проводника i).

Упростим дальнейшее решение системы уравнений и определение емкостей, заменив:

коэффициенты $\alpha_{12}, \alpha_{13}, \dots, \alpha_{1n}$ – их средним арифметическим значением $\overline{\alpha_{12}}$;

коэффициенты $\alpha_{22}, \alpha_{33}, \dots, \alpha_{nn}$ – их средним арифметическим значением $\overline{\alpha_{22}}$;

коэффициенты $\alpha_{23}, \alpha_{34}, \alpha_{24}, \dots, \alpha_{2n}, \alpha_{3n}$ – их средним арифметическим значением $\overline{\alpha_{23}}$.

Допустим, что по сравнению с зарядом на влияющем проводнике, заряды всех проводов связи приблизительно одинаковы, т.е.

$$q_2 \approx q_3 \approx q_4 \approx \dots \approx q_n.$$

Таким образом,

$$\left\{ \begin{aligned} \overline{\alpha_{12}} &= \frac{1}{n-1} (\alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{14} + \dots + \alpha_{1n}) \\ \overline{\alpha_{22}} &= \frac{1}{n-1} (\alpha_{22} + \alpha_{33} + \dots + \alpha_{nn}) \\ \overline{\alpha_{23}} &= \frac{1}{n-2} (\alpha_{23} + \alpha_{24} + \dots + \alpha_{2n}) = \frac{1}{n-2} (\alpha_{32} + \alpha_{34} + \alpha_{35} + \dots + \alpha_{3n}) = \\ &= \frac{1}{n-2} (\alpha_{n2} + \alpha_{n3} + \alpha_{n4} + \dots + \alpha_{n(n-1)}). \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Подставляя эти выражения в уравнения системы (3), получим:

$$\left\{ \begin{aligned} U_1 &= 18 \cdot 10^6 (q_1 \alpha_{11} + (n-1) q_2 \overline{\alpha_{12}}) \\ U_2 &= 18 \cdot 10^6 \{ q_1 \overline{\alpha_{12}} + q_2 [\overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}}] \} \\ &\dots \dots \dots \\ U_n &= 18 \cdot 10^6 \{ q_1 \overline{\alpha_{12}} + q_2 [\overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}}] \}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Из системы уравнений (6) видно, что $U_2 = U_3 = \dots = U_n$.

Далее из первого уравнения системы (6) получаем

$$q_1 = \frac{U_1 - 18 \cdot 10^6 q_2 (n-1) \overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 \alpha_{11}}.$$

Подставив во второе уравнение системы (6) значение q_1 и пренебрегая членом, содержащим $\overline{\alpha_{12}^2}$, получим:

$$q_2 = \frac{1}{18 \cdot 10^6} \left[\frac{\alpha_{11}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_2 - \frac{\overline{\alpha_{12}}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_1 \right]. \quad (7)$$

Подставим это значение q_1 в первое уравнение системы (6):

$$U_1 = 18 \cdot 10^6 q_1 \alpha_{11} + \frac{(n-1) \overline{\alpha_{12}} \alpha_{11}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_2 - \frac{(n-1) \overline{\alpha_{12}^2}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_1. \quad (8)$$

Пренебрегая членом, содержащим $\overline{\alpha_{12}^2}$, получим:

$$q_1 = \frac{1}{18 \cdot 10^6} \left[\frac{1}{\alpha_{11}} U_1 - \frac{(n-1) \overline{\alpha_{12}}}{\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23}} \alpha_{11}} U_2 \right]. \quad (9)$$

Перепишем выражения (9) и (7) в следующем виде:

$$\begin{cases} q_1 = k_{11}U_1 + (n-1)k_{12}U_2, \\ q_2 = k_{12}U_1 + k_{22}U_2 \end{cases}, \quad (10)$$

где $k_{11} = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \alpha_{11}}$, $k_{22} = \frac{\alpha_{11}}{18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}]}$, $k_{12} = -\frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}]}$.

Выразим правые части уравнений системы (10) через частичные емкости:

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}U_1 + (n-1)C_{12}(U_1 - U_2) \\ q_2 = C_{22}U_2 + C_{12}(U_2 - U_1) + (n-2)C_{23}(U_2 - U_3) \end{cases}. \quad (11)$$

Здесь C_{11} представляет ту часть общего заряда системы пучка проводов, которая приходится на долю первого провода, когда все провода соединены между собой и им сообщены потенциалы, равные единице, то есть ту часть общей емкости всех проводов, которая обусловлена присутствием первого провода в данном пучке проводов (все остальные провода соединены между собой). Аналогичную величину представляет и C_{22} .

Величина C_{12} представляет частичную (взаимную) емкость между первым и каждым последующим проводом пучка. Величина C_{23} представляет частичную (взаимную) емкость между вторым и каждым последующим проводом.

Так как $U_2 = U_3 = \dots = U_n$, то уравнения системы (11) можно привести к следующему виду:

$$\begin{cases} q_1 = [C_{11} + (n-1)C_{12}]U_1 - (n-1)C_{12}U_2 \\ q_2 = (C_{12} + C_{22})U_2 - C_{12}U_1 \end{cases}. \quad (12)$$

Из сравнений уравнений (10) и (12) видно, что

$$k_{11} = C_{11} + (n-1)C_{12}; \quad k_{12} = -C_{12}; \quad k_{22} = C_{12} + C_{22}. \quad (13)$$

Из равенств (13) следует, что $C_{12} = -k_{12}$. После подстановки принятого ранее выражения для k_{12} , получаем, что взаимная емкость между первым и каждым последующим проводом пучка будет определяться из следующего выражения:

$$C_{12} = \frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}]}. \quad (14)$$

Подставив уравнение (14) в (2), получаем:

$$\dot{U} = \dot{U}_1(0)z_{e2}j\omega \frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}]} [1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2\gamma_2. \quad (15)$$

Определим напряжение во влияющей цепи $\dot{U}_1(0)$. Как было сказано выше, влияющей цепью следует считать жилу, являющуюся ближайшей к проводящей оболочке кабеля при воздействии на него МЭМИ.

Экспериментально установлено, что спектральная плотность излучаемого источником МЭМИ воздействия может иметь вид [3, 4]:

$$U_0(j\omega) = \frac{\omega_n}{(a + j\omega_n)^2 + \omega_n^2}. \quad (16)$$

Выражение для тока, протекающего во влияющей цепи, можно записать следующим образом [2]:

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_0 h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l} \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h}{Z_{u3} k_1}} \alpha e^{j\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)}$$

или, учитывая (16):

$$i = \frac{\omega_n}{(a + j\omega_n)^2 + \omega_n^2} \frac{h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l} \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h}{Z_{u3} k_1}} \alpha e^{j\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)}, \quad (17)$$

где h – глубина расположения кабеля в земном грунте; l – длина отрезка кабеля подверженного влиянию МЭМИ; r_l – радиус жилы; σ_{31} – удельная проводимость верхнего горизонтального слоя грунта; $F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})$ – зависимость между удельной проводимостью верхнего горизонтального слоя σ_{31} и общей удельной проводимостью земли σ_3 при известной глубине залегания верхнего слоя грунта h_1 и частоте f воздействующего излучения; Z_{u3} – сопротивление изоляции жилы; μ_1 – магнитная проницаемость оболочки жилы; $k_1 = \sqrt{\omega\mu_1\sigma_1}$ – коэффициент.

Следовательно, напряжение во влияющей цепи определяется выражением:

$$\dot{U} = \frac{\omega}{(a + j\omega)^2 + \omega^2} \frac{h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l z_{e1}} \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h}{Z_{u3} k_1}} \alpha e^{j\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)}. \quad (18)$$

Считая, что волновые сопротивления всех жил кабеля одинаковы, т.е. $z_{e1} = z_{e2} = \dots = z_{en}$, запишем выражение для нахождения суммарного напряжения:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \frac{\omega}{(a + j\omega)^2 + \omega^2} \frac{U_m h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l z_{e2}} \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h}{Z_{u3} k_1}} \alpha e^{j\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)} \times \\ &\times j\omega \frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\overline{\alpha_{11}\alpha_{22}} + (n-2)\overline{\alpha_{23}\alpha_{11}}]} [1 - \exp(-\gamma_2 l)] / 2\gamma_2 \end{aligned} \quad (19)$$

Или

$$\begin{aligned} U(t) &= e^{-at} \left[\omega \cos(\omega_n t) - a \sin(\omega t) - \omega_n \left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{8} \right) \sin(\omega t) \right] \sqrt{\frac{\omega\mu_1 h \alpha}{Z_{u3} k_1}} \times \\ &\times \frac{U_m h^2 \sigma_{31} F(h_1 \sqrt{\frac{10\sigma_{31}\omega}{2\pi}})}{2lr_l z_{e2}} \frac{\overline{\alpha_{12}}}{18 \cdot 10^6 [\overline{\alpha_{11}\alpha_{22}} + (n-2)\overline{\alpha_{23}\alpha_{11}}]} \frac{1 - e^{-\gamma_2 l}}{2\gamma_2} \end{aligned} \quad (20)$$

Найдем энергию, выделяющуюся на диэлектрических компонентах кабеля при воздействии МЭМИ:

$$W = \int_0^{\tau} \frac{U^2(t)}{R_n} dt, \quad (21)$$

где $R_n = \frac{\rho_{uz} \cdot l}{S_c}$.

Подставив выражение (20) в (21) и произведя интегрирование, получим:

$$W = \left[\frac{U_m^2 h^5 \sigma_{31}^2 F^2 (h_1 \sqrt{\frac{10 \sigma_{31} \omega}{2\pi}})}{4l^2 r_l^2 z_{e2}^2} \frac{\overline{\alpha_{12}^2}}{(18 \cdot 10^6 [\alpha_{11} \overline{\alpha_{22}} + (n-2) \overline{\alpha_{23} \alpha_{11}}])^2} \right] \times \quad (22)$$

$$\times \frac{\omega \mu_1 \alpha [1 - e^{-\gamma_2 l}]^2}{Z_{uz} k_1 4\gamma_2^2 R_n} \left[\begin{aligned} &\omega^2 a^2 \cos(2\omega\tau) - \omega^3 a \sin(2\omega\tau) + \omega^2 a^2 + \\ &+ \omega^4 - 2\omega^2 \left[a - \omega \left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{8} \right) \right] a^2 \sin(2\omega\tau) + \\ &+ a^2 + \omega^2 - a^2 \cos(2\omega\tau) + (\omega \sin(2\omega\tau) a) - \\ &- 2\omega^2 a^2 - \omega^4 + 2\omega^2 \left[a - \omega \left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{8} \right) \right] a \end{aligned} \right]$$

Выражение (22) позволяет определять энергию, выделяемую на диэлектрических компонентах многожильного кабеля при воздействии на него МЭМИ. На рисунке 2 представлена графическая зависимость энергии, выделяемой на диэлектрических компонентах 8-ми жильного кабеля, находящегося в земном грунте на глубине 3 метра, от напряжения на генераторе МЭМИ.

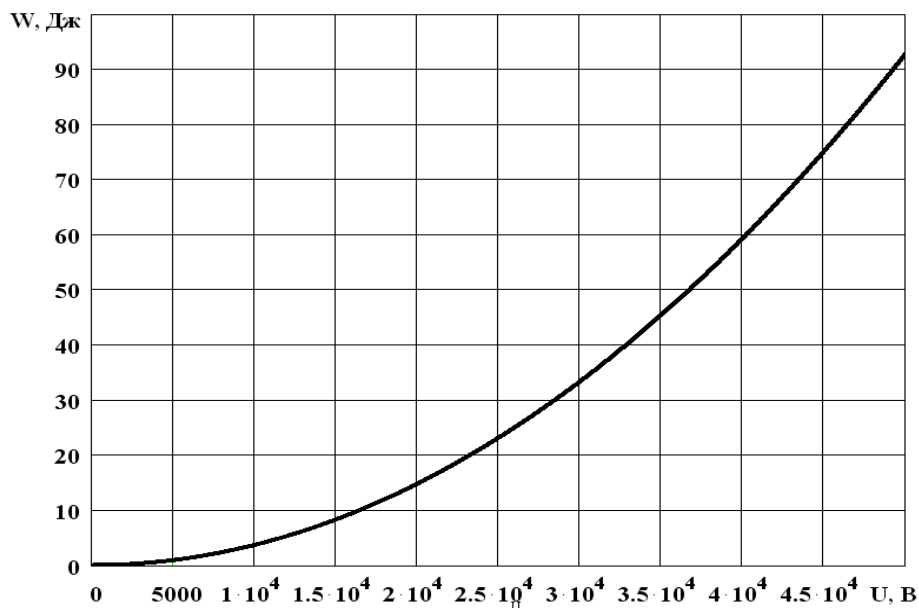


Рисунок 2 – Зависимость энергии, выделяющейся на диэлектрических компонентах многожильного кабеля, от напряжения на генераторе

Выводы. Таким образом, при воздействии МЭМИ на многопроводные КРЛС, достаточно большие уровни энергии выделяются на его диэлектрических элементах (см. рисунок 1). Это может приводить к локальному плавлению диэлектрических материалов, из-за невозможности отвода тепла в области нагрева кабеля [2, 5, 6], что неизменно приведет во всей линии связи к ухудшению её электрических свойств, которые неразрывно связаны с определением функционального поражения систем связи.

Литература

1. Кучер Д.Б. Мощные электромагнитные излучения и сверхпроводящие устройства / Д.Б. Кучер. – С.: 1997. – 188 с.
2. Кучер Д.Б. Особенности функционального поражения подземных радиочастотных линий связи мощными электромагнитными излучениями / Д.Б. Кучер, А.И. Харланов, И.В. Медведь, Л.В. Литвиненко // МРФ-2008. – Харьков, 2008. – Том 6. – С. 175–181.
3. Гладков В.С. Генераторы наносекундных импульсов напряжения амплитудой до 5 Мв / В.С. Гладков, А.А. Гученко, П.Н. Мельников, А.В. Шестериков // МРФ-2005. – Харьков, 2005. – С. 84–87.
4. Чумаков В.И. Параллельная кумуляция на основе многолайнерных систем / В.И. Чумаков, А.В. Столярчук // ННЦ ХФТИ. Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения» – Харьков -2006. – №5 – С. 235–239.
5. Ефимов И.Е. Радиочастотные линии передачи / И.Е. Ефимов. – М.: 1964. – 599 с.
6. Михайлов М.И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия / М.И. Михайлов. – М.: Связьиздат, 1959. – 583 с.

УДК 621.373.7

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

МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПОРАЗКИ ПІДЗЕМНИХ БАГАТОДРОТОВИХ РАДІОЧАСТОТНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ПОТУЖНИМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ВИПРОМІНЮВАННЯМИ

В роботі представлена математична модель впливу потужних електромагнітних випромінювань на підземні багатодотові радіочастотні кабельні лінії зв'язку. Також розглянуті питання взаємних впливів дровів між собою, як складових ліній зв'язку, та приведені результати розрахунків енергії, що буде виділятися на діелектричних матеріалах в залежності від рівнів напруг потужних електромагнітних випромінювань, що впливають.

Kucher D.B., Kharlanov O.I., Medved I.V., Litvinenko L.V., Koroshchenko M.M.

THE MODEL OF FUNCTIONAL INJURY OF MULTIWIRED RADIOFREQUENCY COMMUNICATIONS WITH STRONG ELECTROMAGNETIC RADIATIONS

The mathematical model of strong electromagnetic radiation influence on underground multiwired radiofrequency cable communication is presented. The problem of mutual interaction of wires is discussed too. As well as results of calculations of energy discharged on dielectric materials according to levels of voltages of strong electromagnetic radiations.