

УДК 621.396

В. Д. САХАЦКИЙ, канд. техн. наук

### К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО И НЕГАРМОНИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

---

В нашей стране и за рубежом расширяется применение радиосистем, использующих негармонические электромагнитные сигналы и волны. Это позволяет повысить избирательность систем радиосвязи, разрешающую способность радиолокационных станций, увеличить направленность антенн и уменьшить их габаритные размеры [1].

Развитие радиотехнических систем, излучающих волны, обуславливает необходимость в изучении и решении ряда сопутствующих вопросов (биологическая защита от таких излучений, электромагнитная совместимость, экранирование и др.).

Для увеличения направленности антенн наибольший практический интерес представляет запитка антенных систем трапецевидным импульсным током. В этом случае напряженность электромагнитного поля в дальней зоне излучения — периодическая серия разнополярных прямоугольных импульсов [1].

Рассмотрим проникающую способность такого рода негармонического излучения в тело человека и эффективность его экранирования. Модель человека представляется в виде плоской многослойной структуры [2]. При этом электрофизические параметры первого слоя (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  и удельная проводимость  $\sigma$ ) соответствуют параметрам кожи, второго слоя — электрофизическим параметрам жирового слоя и третьего полубесконечного слоя — электрофизическим параметрам мышечной ткани.

Временные зависимости тока в антенне и электрической составляющей напряженности излучаемого поля, падающего на тело человека, показаны на рис. 1.

Напряженность поля  $E$  данной серии импульсов можно представить в виде следующего ряда Фурье [1]:

$$E = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\Omega t + \psi_k),$$

где  $\Omega = 2\pi/T$ ;  $T$  — период повторения сигнала;

$$A_k = 8E_m \frac{\sin d_k x}{d_k} \sin d_k (y - x),$$

$$d_k = \pi(2k - 1), \quad x = \Delta t/T, \quad y = \tau_u/T.$$

Вводя коэффициент прохождения каждой гармоники поля  $\Pi_k(z) = |\Pi_k| e^{j\varphi_k}$ , напряженность поля внутри тела человека на расстоянии  $z$  от его поверхности записываем следующим образом:

$$E = \operatorname{Re} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |C_k| |\Pi_k| e^{j(k\Omega t + \psi_k + \varphi_k)}, \quad k \neq 0, \quad |C_k| = A_k/2. \quad (2)$$

В этом случае среднее за период значение вектора Умова-Пойтинга в  $i$ -м слое можно найти по формуле [3]

$$p = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{|C_k|^2 |\Pi_k|^2}{|W_k|} \cos \theta_k, \quad k \neq 0. \quad (3)$$

Здесь  $W_k$  — волновое сопротивление  $i$ -го слоя,

$$W_k = \frac{377}{\sqrt{\epsilon_{ri}^*}} = |W_k| e^{j\theta_k};$$

$\epsilon_{ri}^*$  — его комплексная относительная диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_{ri}^* = \epsilon_{ri} + j60\sigma_i \lambda_k$ ;  $\lambda_k$  — длина волны в свободном пространстве, соответствующая частоте  $k\Omega$ .

Аналогично определяется среднее за период значение вектора Умова-Пойтинга падающего на человека излучения из свободного пространства

$$\bar{P}_0 = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{|C_k|^2}{W_0}, \quad k \neq 0, \quad (4)$$

где  $W_0 = 120\pi$  — волновое сопротивление свободного пространства, Ом.

Тогда коэффициент прохождения в тело человека негармонического излучения определяется по формуле  $\mathcal{E}_{нг} = 10 \lg \bar{p}/\bar{p}_0$ , (5), а для гармонического излучения — по формуле  $\mathcal{E}_r = 20 \lg \Pi$  (6). Формула для расчета коэффициента прохождения ( $\Pi$ ) гармонического излучения для выбранной модели тела человека приведена

в работе [2], там же даны электрофизические параметры тела человека для различных частот.

Анализ полученных уравнений, проведенный численным методом, показал, что для вычисления  $\bar{P}$  и  $\bar{P}_0$  с точностью до двух десятичных знаков бесконечные в строгом смысле ряды (3), (4) могут ограничиваться значением  $k = 500$ .

При расчете полагалось, что период следования негармонического излучения  $T$  соответствовал периоду колебаний гармонического излучения, частота которого равна  $f_0$ , а электрические напряженности падающих полей имели единичную амплитуду.

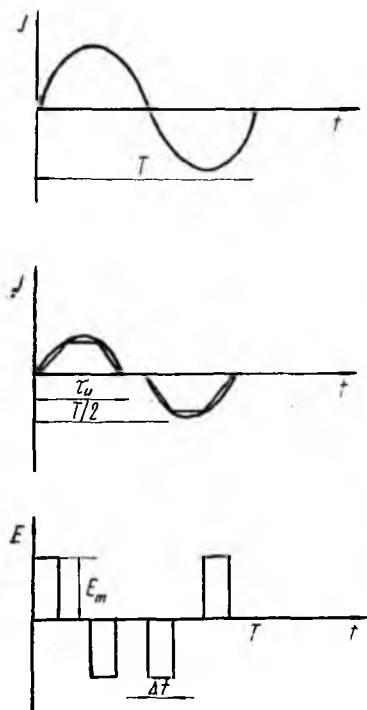


Рис. 1

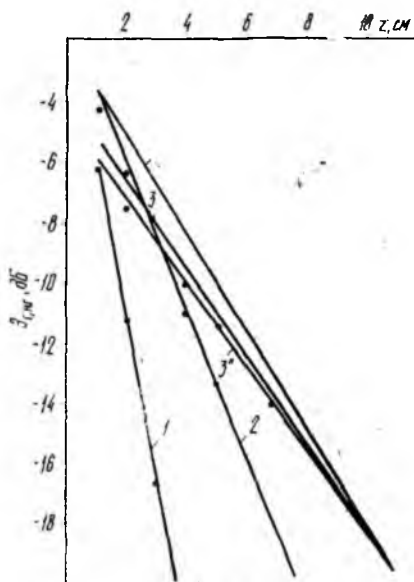


Рис. 2

Сравнительный анализ проникновения в тело человека негармонического и гармонического излучений проведен для частот  $f_0$ , равных 100, 400, 3000 МГц.

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента прохождения гармонического (положение кривых обозначено кружками) и негармонического излучения. Кривые 1, 2, 3 соответствуют частотам  $f_0$ , равным 3000, 400, 100 МГц при длительности импульса тока  $\tau_u = 0,25 T$  и длительности его переднего и заднего фронтов  $\Delta t = 0,1 T$ .

Кривые 3', 3'' характеризуют влияние на коэффициент прохождения изменения параметров негармонического сигнала при заданной частоте его повторения и приведены для случая, когда

$f_0 = 100$  МГц, а  $\tau_u$  и  $\Delta t$  соответственно равны  $\tau_u = 0,25 T$ ,  $\Delta t = 0,025 T$  и  $\tau_u = 0,5 T$ ,  $\Delta t = 0,25 T$ .

Согласно рис. 2 коэффициенты прохождения негармонического и гармонического излучений практически сравнимы, и изменение параметров сигнала  $\Delta t$  и  $\tau_u$  не вносит существенных изменений. Это объясняется тем, что основная энергия негармонического сигнала переносится на гармоники частотой  $f_0$  и вклад высших гармоник незначителен. Это относится и к случаю экранирования негармонического излучения неоднородными экранами. Однако при использовании замкнутых и незамкнутых неоднородных экранов, например, перфорированных, сетчатых и других, имеющих отверстия и щели, коэффициент экранирования изменяется.

В качестве примера рассмотрим эффективность экранирования гармонического и негармонического излучения замкнутым перфорированным и незамкнутым (плоским) ленточным экраном. Если замкнутый экран перфорирован круглыми отверстиями, то его коэффициент экранирования (тождественный коэффициенту прохождения) для гармонического излучения определяется по формуле [4]

$$\Pi = \left[ \sqrt{\frac{\delta W_{E(H)}}{\rho}} \sqrt{\lambda/R_s} e^{\frac{2\pi t}{D}} \left( \frac{d-D}{d} \right)^2 \left( 1 - \frac{\pi D}{\lambda} \right)^6 \right]^{-1}, \quad (7)$$

где  $\delta$  — глубина проникновения, м;  $W_{E(H)}$  — волновое сопротивление электрического (магнитного) поля, Ом;  $\rho$  — удельное сопротивление материала экрана, Ом · м;  $\lambda$  — длина волны, м;  $R_s$  — эквивалентный радиус экрана, м;  $d$  — расстояние между центрами отверстий, м;  $t$  — толщина материала, м;  $D$  — диаметр отверстий, м.

Величины  $W_{E(H)}$ ,  $R_s$ ,  $\delta$  находим следующим образом [4]:

$$W_E = \frac{W_0}{1 + (k_0 r)^2} \sqrt{\frac{(k_0 r)^6 + 1}{(k_0 r)^2}};$$

$$W_H = W_0 [1 + (k_0 r)^2] \sqrt{\frac{(k_0 r)^2}{1 + (k_0 r)^6}}.$$

где  $W_0 = 120\pi$  — волновое сопротивление свободного пространства, Ом;  $k_0 = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $r$  — расстояние между излучателем и экраном, которое при расчете выбирается равным  $R_s$ ,

$R_s = 0,62 \sqrt[3]{V_s}$  ( $V_s$  — внутренний объем экрана, м<sup>3</sup>);  $\delta = 0,03 \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\mu_r}}$  ( $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость экрана).

При экранировании ленточным экраном коэффициент экранирования гармонического излучения запишем в виде [5]

$$\Pi = \frac{j 2 \frac{d}{\lambda} \ln \sin \frac{\pi}{2} \theta}{1 + j 2 \frac{d}{\lambda} \ln \sin \frac{\pi}{2} \theta}. \quad (8)$$

Здесь  $d$  — период расположения лент, м;  $2a$  — ширина лент, м;  $\theta = 2a/d < 0,5$ . Формула (8) применима, если  $d < 0,5\lambda$ . На рис. 3 показаны зависимости коэффициента экранирования гармонического и негармонического излучений от длины волны гармонического излучения (периоды следования обоих видов излучения одинаковы). Коэффициент экранирования вычисляется по (3) — (6) с учетом формул (7), (8). Кривые 1, 1' приведены для гармонического и негармонического ( $\tau_u = 0,25 T$ ,  $\Delta t = 0,025 T$ ) излучений соответственно при экранировании перфорированным медным экраном, имеющим следующие параметры:  $V_0 = 1 \text{ м}^3$ ,  $d = 0,1 \text{ м}$ ,  $D = 0,015 \text{ м}$ ,  $t = 0,002 \text{ м}$ ,  $\rho = 1,75 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\mu_r = 1$ . Кривые 2, 2' получены аналогично для ленточного экрана с параметрами:  $d = 0,1 \text{ м}$ ,  $2a = 0,048 \text{ м}$ . Как видно из

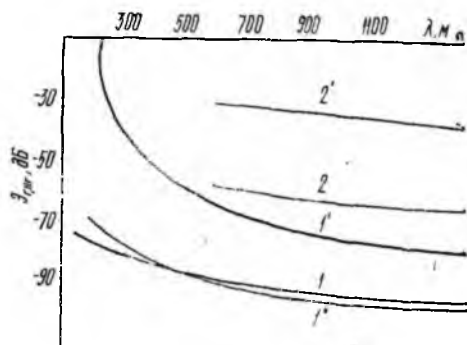


Рис. 3

рис. 3, эффективность экранирования негармонического излучения гораздо ниже, чем гармонического. Это объясняется тем, что при негармоническом излучении высшие гармоники ослабляются гораздо в меньшей степени, чем основная. Для того чтобы коэффициент экранирования негармонического излучения был того же порядка, что и для гармонического излучения, диаметр отверстий при этом же периоде перфораций  $d$  (кривая 1"), следует уменьшить от 0,015 до 0,004 м.

Расчеты показали, что для ленточного экрана эффективности экранирования негармонического и гармонического излучений сравнимы при ширине щели  $0,52d$  и  $0,995 d$ . Таким образом, при экранировании негармонического излучения необходимо предъявлять более жесткие требования по отношению к электрической однородности экрана.

**Список литературы:** 1. Полухин Г. А. Анализ характеристик излучения апертурной антенны, возбуждаемой периодическим импульсным сигналом // Радиотехника и электрон. 1983. Т. 28, № 2. С. 265—270. 2. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах: В 2 кн./ Пер. с англ. М., 1984. Кн. 1. 824 с. 3. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн. М., 1973. 607 с. 4. Полонский И. Б. Конструирование электромагнитных экранов для РЭА. М., 1979. 243 с. 5. Айзенберга Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ: В 2 ч./ Под ред. Г. З. Айзенберга. М., 1977. Ч. 2. 288 с.

Поступила в редколлегию 17.08.87