

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

#### Общие положения

Как известно, наличие электрического тока в проводнике на макро- и микроскопическом уровне сопровождается появлением в окружающей его среде магнитного поля определенной напряженности. Наличие в окружающей среде разности потенциалов, например, по длине токопроводящего проводника или между обкладками конденсатора, обуславливает появление в ней электрического поля.

Распространение электрического и магнитного полей, а в совокупности электромагнитного поля (ЭМП) сопровождается переносом энергии, т.е. данное явление по физической сути является излучением.

Основные величины, характеризующие интенсивность. ЭМП - напряженность электрического поля  $E$ , (В/м), и напряженность магнитного поля  $H$ , (А/м). Мощность электромагнитного излучения (ЭМИ)  $W$  определяется соотношением:

$$W=0,5t^{-1}(E^2 \cdot \epsilon_0 + H^2 \cdot \mu), \text{ Вт/м}^3, \quad (1)$$

где  $t$  - время излучения, с;

$E$ ,  $H$  - напряженности электрической и магнитной составляющих ЭМИ, В/м, А/м соответственно;

$\epsilon_0$ ,  $\mu$  - абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости воздуха, Ф/м; Гн/м

В зависимости от соотношения длины волны  $\lambda=C/f$  ( $f$  - частота,  $C$  - скорость света) и расстояния  $R$  от источника ЭМИ различают три зоны:

- зону индукции  $R \leq \lambda/2\pi$  (в зоне производят нагревание, закалку металлов);
- волновую зону  $R > \lambda/2\pi$  (в зоне происходит тепловое и психическое воздействие на человека)
- зону дифракции  $R \gg \lambda/2\pi$  (в зоне происходит психологическое воздействие на человека).

Плотность потока энергии ЭМИ  $N$ , Вт/м<sup>2</sup>, определяется соотношениями:

$$N = E^2/377 = 377H^2 = P_n \cdot G_{\text{пер}} / 2\pi R^2, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где  $P_n$  - мощность передающего устройства, Вт;

$G_{\text{пер}}$  - коэффициент передачи;

$R$  - расстояние до излучателя.

Из формулы (2) имеем:

$$H = (N/377)^{1/2}, \text{ А/м.}$$

Предельно допустимый уровень (ПДУ) напряженности магнитного поля не должен превышать 8 кА/м, т.е.

$$H_{\text{доп}} \leq 8 \text{ кА/м} \quad (4)$$

Нормирование ЭМИ, очевидно, осуществляется по 3-м факторам:

- по напряженности магнитного поля  $H$ , А/м, формула (4);
- по напряженности электрического поля  $E$ , В/м, табл. 1,2;
- по мощности потока электромагнитной энергии  $N$ , Вт/м<sup>2</sup>, табл. 3.

По каждому фактору из справочников норм находят наименьшее время в минутах за сутки, в течение которого человек может пребывать под воздействием ЭМИ заданных параметров.

При необходимости увеличения времени пребывания человека в зоне ЭМИ, например, до продолжительности рабочей смены, применяют защитные устройства.

Для обеспечения требований норм на рабочих местах средства защиты могут быть следующих типов: стационарные экранирующие устройства (навесы, козырьки, перегородки и т.п.), переносные, передвижные экранирующие устройства (щиты, зонты, экраны, перегородки и т.п.), специальная экранирующая одежда.

В условиях производства чаще всего применяются защитные экраны, которые представляют собой конструкции и материалы, используемые в технологическом процессе. Поэтому проектирование экранирующего устройства от воздействия электромагнитного излучения сводится к расчетной или экспериментальной проверке эффективности имеющихся материалов и конструкций.

Нормы ЭМИ представлены в табл. 1÷ 3.

Таблица 1

Предельно допустимая напряженность электрического поля на рабочем месте в течение смены

Длительность воздействия поля на	До1	2	3	4	5	6	7	8
Предельно допустимая напряженность поля	60	42,5	34,6	30	26,8	24	22,7	21,2

Примечание:

Промежуточные значения  $E_{\text{доп}}$  в пределах времени воздействия от 1 до 9 ч. могут определяться по формуле  $E_{\text{доп}} = 60/t$ .

Указанные в таблице нормативы при напряженности выше 20 кВ/м применяются при условии, что остальное время рабочего дня напряженность не превышает 20 кВ/м.

Таблица 2

Предельно допустимое время пребывания человека в электрическом поле в течение суток

Напряженность электрического поля	Время пребывания человека в электрическом поле в течение суток,
менее 5	без ограничения
от 5 до 10	не более 180
свыше 10 до 15	не более 90
свыше 15 до 20	не более 10
свыше 20 до 25	не более 5

Таблица 3

Мощность ЭМИ, $N$ , мкВт/см <sup>2</sup>	Время пребывания человека в ЭМП в течение суток, мин.
менее 2	без ограничения
не более 10	480

10-4-100	120
100^1000	20

## 1. Порядок расчета

### 1.1. Расчет толщины защитного экрана по мощности ЭМИ

Защита от прямого луча передающего устройства осуществляется следующим образом:

а) Определяем мощность электромагнитного излучения  $N$  по формуле:

$$N = \frac{P_n \cdot G_{\text{пер}}}{(4\pi R)^2}, \text{ мкВт/см}^2 \quad (5)$$

где  $P_n$  - мощность излучения передающего устройства, Вт;

$G_{\text{пер}}$  - коэффициент направленности антенной системы передатчика;

$R$  - расстояние от излучающей антенны передатчика, м. б) Определяем необходимую величину коэффициента ослабления электромагнитного поля ( $M$ ) по формуле:

$$1/M = N/D \quad (6)$$

где  $D$  - допустимая доза ЭМИ, мкВт/см<sup>2</sup>, в) Определяем толщину стенок защитного экрана из выбранного материала по формуле:

$$z = \frac{\ln M}{\sqrt{2\omega\rho\mu}}, \text{ м} \quad (7)$$

где  $\omega$  - круговая частота, об/с  $\omega=2\pi f$ ;

$f$  - частота ЭМП, Гц;

$\rho$  - удельное сопротивление, Ом·м;

$\mu$  - магнитная проницаемость, Гн/м.

Для электропроводящих материалов:  $\rho \ll 1$ ;  $\mu \gg 1$ .

Удельное сопротивление имеет размерность:  $\rho$  [Омм<sup>2</sup>/м] - сопротивление 1 м проводника сечением 1 м Для меди  $\rho \sim 10^{-8}$  Ом·м.

#### Пример 1.1.

Определить толщину защитного экрана от ЭМИ, имеющего следующие данные:  $P_n = 500$  Вт, длина волны  $\lambda = 1$  мм ( $f = 3 \cdot 10^{11}$  Гц - УКВ);  $G_{\text{пер}} = 500$ ;  $R = 15$  м. Материал экрана: сталь,  $\rho = 10^{-7}$  Ом·м;  $\mu = 180$  Гн/м.

**Решение:**

$$\text{а) } N = \frac{500 \cdot 500 \cdot 10^6}{4 \cdot 3,14 \cdot (15 \cdot 10^2)^2} = \text{мкВт}$$

$$\text{б) } D = 10 \text{ мкВт/см}^2; \quad \frac{1}{M} = \frac{N}{D} = \frac{1}{10} \approx 1000 \text{ м}^2 \approx 0,001$$

Величину требуемого ослабления  $1/M$  можно представить в децибелах:

$$\Delta_{\text{тр}} = 20 \lg(1/M) = 20 \lg 10^3 = 60 \text{ дБ}$$

$$\text{в) } z = - \frac{\ln 0,001}{\sqrt{2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-7} \cdot 180}} = 7,5 \cdot 10^{-4} = 0,75 \text{ мм.}$$

## Проверка правильности расчета толщины экрана

Проверка правильности расчета толщины экрана по обеспечению требуемой эффективности защиты от электрической составляющей ЭМП.

а) Требуемая эффективность экрана  $\mathcal{E}_{\text{тр}}$  определяется следующим соотношением:

$$\mathcal{E}_{\text{тр}} = 20 \lg \frac{E_0}{E_s}, \text{ дБ} \quad (8)$$

где  $E_0$  - напряженность поля в рабочей зоне в отсутствие экрана, В/м;  $E_s$  - напряженность электрического поля при наличии экрана, выполненного в виде кожуха из металлического листа; может быть рассчитана по известным характеристикам материала, из которого он изготовлен, с учетом волнового сопротивления среды, В/м.

б) Фактическое ослабление  $\mathcal{E}_{\text{ф}}$  (эффективность экранирования) определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ф}} = 20 \lg \left[ \sqrt{\frac{\delta L_e}{\rho}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_3}} \cdot \frac{2\pi\pi}{t} \cdot \left(1 - \frac{\pi t}{2}\right)^6 \right], \text{ дБ} \quad (9)$$

где  $X$  - длина волны электромагнитного поля, м;  $z$  - толщина экрана, м;  $t$  - наибольший размер технологических отверстий, м;  $R_3$  - эквивалентный радиус экрана, м;  $\rho$  - удельное сопротивление материала экрана, Ом·м;  $\delta$  - глубина проникновения, м, т.е. расстояние, на котором напряженность поля уменьшается в 2,7 раза.

Волновое сопротивление при  $\frac{2\pi R_3}{\lambda} \ll 1$  определяется выражением:

$$L_e = \frac{L_0 \cdot \lambda}{2\pi R_3}, \text{ Ом}$$

где  $L_0$  - волновое сопротивление воздуха,  $U = 377$  Ом, при:

$$\frac{2\pi R_3}{\lambda} \gg L_e \sim 377 \text{ Ом} \quad (11)$$

В свою очередь, глубина проникновения:

$$\delta = 0,03 \sqrt{\frac{2\rho}{\mu}}, \text{ м} \quad (12)$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость, Гн/м.

Эквивалентный радиус экрана рассчитывается по формуле:

$$R_3 = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} b l h}, \text{ м} \quad (13)$$

где  $b, l, h$  - размеры экрана (короба), м.

Эффективность экранирования  $\mathcal{E}_{\text{ф}}$  показывает, во сколько раз ослабляется ЭМИ. Рассчитанная эффективность  $\mathcal{E}_{\text{ф}}$  выражена в децибелах.

Должно соблюдаться условие:  $\mathcal{E}_{\text{тр}} < \mathcal{E}_{\text{ф}}$ , где  $\mathcal{E}_{\text{тр}}$  получено ранее в п. 1.1. В противном случае необходимо либо уменьшить размеры технологических отверстий  $t$ , либо увеличить эквивалентный радиус экрана  $R_3$ .

При оценке эффективности экранирующих устройств исходными данными являются геометрические размеры экрана и технологических проемов, электрические и магнитные характеристики материала экрана, волновое сопротивление воздуха, длина волны излучения, напряженность электрического поля в рабочей зоне и длительность пребывания в ней.

### Пример 1.2.

Произвести оценку эффективности защитного экрана из стали в виде короба размерами  $2 \times 1,5 \times 1$ , толщиной стенки  $d = 0,75 \cdot 10^{-3}$  м, с проемами  $m = 10^{-2}$  м. Длина волны  $X-1$  мм ( $f = 3 \cdot 10^{11}$  Гц). Удельное сопротивление стали  $\rho = 10^{-7}$  Ом·м; магнитная проницаемость -  $\mu = 480$  Гн/м.

### Решение:

а) По условиям задания 1.1 продолжительность пребывания в ЭМП составляет 480 мин. Из табл. 2 находим, что такой продолжительности соответствует напряженность электрического поля в 5 кВ/м при требуемой эффективности экрана  $\mathcal{E}_{\text{тр1}}$  не менее 41 дБ.

б) По мощности  $P_{\text{п}} = 500$  Вт передатчика и для заданного расстояния  $R = 15$  м по условиям 1.1 находим, что в электромагнитном поле (ЭМП) мощностью  $8850$  мкВт/см<sup>2</sup> можно находиться не более 5 мин. Такому времени пребывания соответствует напряженность электрического поля порядка 25 кВ/м.

$$R_3 = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} b l h}, \text{ м} \quad (13)$$

$$R_3 = \sqrt[3]{\frac{3}{4 \cdot 3,14}} 2 \cdot 1,5 \cdot 1 = 0,9 \text{ м}$$

$$L_3 = \frac{377 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,9} = 0,07 \text{ Ом}$$

$$\delta = 0,03 \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot 10^{-7}}{480}} = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{мп}} &= 201 \text{г} \left[ \sqrt{\frac{0,07 \cdot 1,4 \cdot 10^{-8}}{10^{-7}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{10^{-3}}{0,9}} \cdot 2,7 \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}}{10^{-2}}} \cdot \left( 1 - \frac{3,14 \cdot 10^{-2}}{10^{-3}} \right)^6 \right] = \\ &= 201 \text{г} 1,5 \cdot 10^7 = 140 + \text{г} 1,5 \approx 140 \end{aligned}$$

Следовательно, экран по условиям п. 1.1 удовлетворяет также и требованиям п. 1.2. При  $\mathcal{E}_{\text{тр1}} > \mathcal{E}_{\text{тр2}}$  необходимо увеличить толщину экрана  $z$ , либо уменьшить размер технологических отверстий  $m$ .

### 1.3 Проверка правильности расчета толщины экрана по обеспечению требуемой эффективности защиты от магнитной составляющей ЭМП

1) По формуле (5) п. 1.1 определяем плотность потока энергии (мощность ЭМИ)  $N$ :

$$N = 8850 \text{ мкВт/см}^2 = 88,5 \text{ Вт/м}^2$$

б) По формуле (3) определяем напряженность магнитной составляющей ЭМП:

$$H_3 = \sqrt{\frac{N}{377}} \approx 0,5 \text{ A/m}$$

в) Сравнивая  $H_3$  с значением  $H < 8 \text{ кА/м}$  ( $H_3 \ll 8 \text{ кА/м}$ ), констатируем, что напряженность магнитной составляющей ЭМП не является ограничивающим фактором даже без применения экрана.