

---

УДК 621.371

*Б. В. ДЗЮНДЗЮК, канд. техн. наук, Т. И. СТЕПАНОВА*

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО  
РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА  
МОЩНОСТИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ**

---

В силу различных причин облучение работающих с источниками излучения микроволн во многих случаях имеет прерывистый и неравномерный характер [1]. Поэтому особенно важно провести оценку условий труда на основе динамического наблюдения характера облучения людей.

В производственных условиях при наладке, настройке и ремонте радиоаппаратуры обслуживающий персонал находится под воздействием электромагнитной энергии. Для оценки облучения необходимо определить суммарную плотность потока мощности.

При переходе к диапазону СВЧ многие металлические предметы в цехе становятся эффективными отражателями электромагнитной энергии, что приводит к многолучевому распространению, являющемуся физической причиной интерференционных максимумов и минимумов на рабочих местах.

Отметим, что аналитический метод расчета поля в пределах цехов промышленных предприятий не может быть применен вследствие того, что поле является суперпозицией прямой волны, большого числа отраженных волн и паразитных излучений, имеющих случайные амплитуды и фазы.

Для оценки переизлучателей обычно вводят величину эффективности площади рассеяния. Аналитически задача о вычислении эффективных площадей может быть решена только для весьма ограниченного числа тел простейшей формы (шара, круглого цилиндра, конуса, плоского диска, металлического листа, полуволнового диполя и т. п.), совершенно не охватывающих всего многообразия форм переизлучателей, имеющих в цехе. Источниками излучения служат антенны и паразитные излучатели (зазоры из-за неплотного прилегания фланцев, конструктивные отверстия, выводы магнетрона и т. д.), причем число и расположение всех излучателей случайно. Поэтому невозможно детерминированное определение плотности потока мощности на рабочем месте.

Мгновенное значение напряженности поля прямой волны в точке приема с учетом потерь при распространении в результате поглощения и рассеяния на неоднородностях, имеющих на пути распространения

$$e_{\text{пр}} = \frac{B \sqrt{60P_1 D_1}}{r} e^{i(\omega t - kr)}, \frac{B}{M},$$

где  $P_1$  — мощность излучения, Вт;  $D_1$  — КПД передающей антенны;  $r$  — расстояние между передающей антенной и точкой приема, м;  $B$  — множитель ослабления;  $k$  — волновой множитель,  $k = 2\pi/\lambda$ .

Мгновенное значение напряженности поля переизлученной волны и паразитных излучений

$$e_{\text{ит вол}}(r') = \frac{\xi BR \sqrt{60P_1 D_1}}{\|r' - r''\|} e^{i(\omega t - k\|r' - r''\| - \theta)}.$$

Здесь  $R$  — модуль комплексного коэффициента отражения;  $\theta$  — изменение фазы при отражении;

$$\|r' - r''\| = \sqrt{(x' - x'')^2 + (y' - y'')^2 + (z' - z'')^2},$$

где  $r'$  — точка приема,  $r' = (x', y', z')$ ;  $r''$  — точка расположения переизлучателя,  $r'' = (x'', y'', z'')$ ;  $\xi$  — коэффициент, учитывающий поляризацию.

Паразитные излучения можно отнести к классу переизлучений и анализировать поле паразитных излучений следует по той же методике, что и для переизлучателей. При этом  $R$  — модуль комплексного коэффициента паразитного излучателя;  $\theta$  — фаза источника паразитного излучателя;  $\xi$  — коэффициент поляризации источника паразитного излучателя;  $\|r' - r''\|$  — расстояние между точкой приема и паразитным излучателем.

Не следует связывать паразитное излучение и основное с помощью какого-либо коэффициента, так как поле паразитного

излучателя может существовать в точках пространства, экранированных от поля основного излучателя.

Мгновенное значение напряженности поля в точке приема

$$e(r') = e_{\text{пр}} + \sum_{j=1}^n e_{j \text{ изл. изл}} = B \frac{\sqrt{60P_1 D_1}}{r} e^{i(\omega t - kr)} + \\ + \sum_{j=1}^n \frac{\xi_j B_j R_j \sqrt{60P_1 D_1}}{\|r' - r''\|} e^{i(\omega t - k\|r' - r''\| - \theta_j)}.$$

Здесь  $\xi_j$ ,  $B_j$ ,  $R_j$ ,  $\theta_j$  — значения для  $j$ -го переизлучателя;  $r_j$  — координаты  $j$ -го переизлучателя.

Введем обозначение  $A_j = \xi_j R_j B_j \sqrt{60P_1 D_1}$ . При условии экранирования точки приема от прямого излучения

$$e(r') = \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{\|r' - r''\|} e^{i(\omega t - k\|r' - r''\| - \theta_j)}.$$

Считаем случайные величины  $A_j$ ,  $r_j$ ,  $\theta_j$  независимыми и одинаково распределенными.

Определим мощность

$$e(r')^2 = \sum_{j, e=1}^n \frac{A_j A_e}{\|r' - r_j\| \|r' - r_e\|} \exp(i(\varphi_j - \varphi_e) - k(\|r' - r_j\| - \|r' - r_e\|)),$$

где  $\varphi_j = \omega t - \theta_j$ .

Математическое ожидание этой величины

$$M |e(r')|^2 = \sum_{j, e=1}^n M \left[ \frac{A_j A_e}{\|r' - r_j\| \|r' - r_e\|} \exp(i(k\|r' - r_j\| - \|r' - r_e\|)) M[\exp(i(\theta_e - \theta_j))]. \right.$$

Рассмотрим величину  $\exp(i(\theta_e - \theta_j))$ . При  $l \neq j$  разность  $\theta_e - \theta_j$  — равномерно распределенная случайная величина, причем  $0 \leq \theta_e - \theta_j \leq 2\pi$ ,  $M \exp(i(\theta_e - \theta_j)) = 0$ . Если  $e = j$ , то  $\exp(i(\theta_e - \theta_j)) = 1$ . Тогда

$$M |e(r')|^2 = \sum_{j=1}^n M \frac{A_j^2}{\|r' - r_j\|^2} = \sum_{j=1}^n M A_j^2 M \frac{1}{\|r' - r_j\|^2} = n B_1^2 f_1(r').$$

Здесь

$$B_1^2 = M A_j^2; f_1(r') = M \frac{1}{\|r' - r_j\|^2} = \int_V \frac{P(r)}{\|r' - r_j\|^2} dr,$$

где  $P_r$  — плотность распределения источников переизлучателей;  $V$  — область расположения источников переизлучателей.

В работе [2] предложена методика выбора точек для размещения контрольно-измерительных приборов. Для вычисления оптимальных координат точек размещения необходимо знать корреляционную функцию измеряемого случайного поля.

Определим корреляционную функцию мощности ЭМИ

$$K(r', r'') = M(|e(r')|^2 |e(r'')|^2);$$

$$|e(r')|^2 |e(r'')|^2 = \sum_{i, e, p, q=1}^n \frac{A_i A_e A_p A_q}{\|r' - r_i\| \|r' - r_e\| \|r'' - r_p\| \|r'' - r_q\|} \times \\ \times \exp(i(\theta_j - \theta_e + \theta_p + \theta_q - k(\|r' - r_i\| - \|r'' - r_e\| + \\ + \|r' - r_p\| - \|r'' - r_q\|))).$$

Учитывая изложенное ранее, запишем

$$M \exp(i(\theta_j - \theta_e + \theta_p + \theta_q)) = \\ = \begin{cases} 1, & \text{если } ((f = e) \wedge (p = q)) \vee ((j = q) \wedge (e = p)); \\ 0 & \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

$$K(r', r'') = \sum_{j=1}^n M \frac{A_j^4}{\|r' - r_j\|^2 \|r'' - r_j\|^2} + \sum_{\substack{j, p=1 \\ j \neq p}}^n M \frac{A_j^2 A_p^2}{\|r' - r_j\|^2 \|r'' - r_p\|^2} + \\ + \sum_{\substack{i, e=1 \\ i \neq e}}^n M \frac{A_i^2 A_e^2}{\|r' - r_i\| \|r' - r_e\| \|r'' - r_i\| \|r'' - r_e\|}.$$

Преобразуем каждое слагаемое суммы отдельно:

$$\sum_{j=1}^n M \frac{A_j^4}{\|r' - r_j\|^2 \|r'' - r_j\|^2} = \sum_{j=1}^n M A_j^4 M \frac{1}{\|r' - r_j\|^2 \|r'' - r_j\|^2} = \\ = n B_2^4 f_2(r' - r''), \quad B_2^4 = M A_j^4, \\ = f_2(r', r'') = M \frac{1}{\|r' - r_j\|^2 \|r'' - r_j\|^2} = \int \frac{P(r)}{\|r' - r_j\|^2 \|r'' - r_j\|^2};$$

$$\sum_{\substack{j, p=1 \\ j \neq p}}^n M \frac{A_j^2 A_p^2}{\|r' - r_j\|^2 \|r'' - r_p\|^2} = \sum_{\substack{j, p=1 \\ j \neq p}}^n M A_j^2 M A_p^2 M \frac{1}{\|r' - r_j\|^2} M \times \\ \times \frac{1}{\|r'' - r_p\|^2} = n(n-1) B_1^4 f_1(r') f_1(r''),$$

$$\sum_{\substack{i, e=1 \\ i \neq e}}^n M \frac{A_i^2 A_e^2}{\|r' - r_i\| \|r' - r_e\| \|r'' - r_i\| \|r'' - r_e\|} = \\ = \sum_{i, e=1}^n M A_i^2 M A_e^2 M \frac{1}{\|r' - r_i\| \|r'' - r_i\|} \times \\ \times M \frac{1}{\|r' - r_e\| \|r'' - r_e\|} = n(n-1) B_1^4 f_3^2(r', r''),$$



При  $n \gg 1$  можем принять  $B(r', r'') = n^2 B_1^4 f_3^2(r', r'')$ . Тогда

$$\delta(\rho_1, \dots, \rho_m, r') = n B_1^4 \frac{\begin{vmatrix} f_3^2(\rho_1, \rho_1) \dots f_3^2(\rho_1, \rho_m) f_3^2(\rho_1, r') \\ \dots \dots \dots \\ f_3^2(\rho_m, \rho_1) \dots f_3^2(\rho_m, \rho_m) f_3^2(\rho_m, r') \\ f_3^2(r', \rho_1) \dots f_3^2(r', \rho_m) f_3^2(r', r') \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} f_3^2(\rho_1, \rho_1) \dots f_3^2(\rho_1, \rho_m) \\ \dots \dots \dots \\ f_3^2(\rho_m, \rho_1) \dots f_3^2(\rho_m, \rho_m) \end{vmatrix}}$$

и выбор оптимального набора точек  $\rho_1, \dots, \rho_m$  сводится к задаче минимизации выражения

$$\max_{r' \in V} \frac{\begin{vmatrix} f_3^2(\rho_1, \rho_1) \dots f_3^2(\rho_1, \rho_m) f_3^2(\rho_1, r') \\ \dots \dots \dots \\ f_3^2(\rho_m, \rho_1) \dots f_3^2(\rho_m, \rho_m) f_3^2(\rho_m, r') \\ f_3^2(r', \rho_1) \dots f_3^2(r', \rho_m) f_3^2(r', r') \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} f_3^2(\rho_1, \rho_1) \dots f_3^2(\rho_1, \rho_m) \\ \dots \dots \dots \\ f_3^2(\rho_m, \rho_1) \dots f_3^2(\rho_m, \rho_m) \end{vmatrix}}$$

Решая указанную оптимизационную задачу выбираем точки замера ППМ. Сложность задачи кажущаяся, поскольку можно ограничиться небольшим числом  $m$  точек замера и относительно невысокой точностью решения. При решении задачи выбора точек замера нужно исходить из того, что погрешность интерполяции должна иметь один порядок с погрешностью измерения параметра.

Список литературы: 1. Марков В. В. Гигиеническая оценка условий труда работающих с источниками излучений микроволн на основе динамического наблюдения характера облучения в течение производственной смены // О биологическом действии электромагнитных полей радиочастот: Сб. науч. тр.—М., 1973.—С. 18—25. 2. Иоффе М. И. Об оптимальном размещении контрольно-измерительных элементов в случайном поле // Радиотехника и электроника.—М., 1973.—С. 35—40.

Поступила в редколлегию 27.01.86.