

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ВНУТРИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ ТЕМ-КАМЕРЫ

**В.И. Щербаков**  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Рассмотрены самые общие положения, обосновывающие возможность использования ТЕМ-камеры для измерения параметров непреднамеренного излучения компонентов электромеханического оборудования. Проведены измерения КСВН в зависимости от габаритов испытуемого оборудования и равномерности распределения коэффициента калибровки в рабочей отсеке, которые необходимы для определения размеров рабочей зоны и погрешности.*

**Ключевые слова:** ТЕМ-камера, помехоэмиссия, дипольный момент, диполь, электрическое поле, измерение непреднамеренного излучения, коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности, электромагнитная совместимость.

Использование стандартной ТЕМ-камеры для измерений на помехоустойчивость хорошо известно и довольно широко распространено. В данной статье рассматриваются самые общие положения, обосновывающие возможность использования ТЕМ-камеры для измерения параметров непреднамеренного излучения компонентов электромеханического оборудования. Первоначальные сведения об экспериментах с применением ТЕМ-камеры для измерений излучения были получены из зарубежных источников [1 – 3]. Когда испытуемое оборудование (ИО) помещается в ТЕМ-камеру, его излучение трансформируется в основную ТЕМ-волну и распространяется к двум выходным разъёмам камеры. После проведения измерений и их корректной интерпретации можно получить полную информацию о мощности, излучаемой в свободное пространство, и диаграмме направленности в случае, когда измеряемые величины не искажены за счёт отражений или по другим причинам. Результатом является составление математической модели ИО как источника излучения, состоящей из трёх ортогональных электрических и трёх ортогональных магнитных диполей со своими амплитудами и фазами. Поперечное сечение ТЕМ-камеры представлено на рис. 1 на с. 11. Напряжения на выходах камеры определяют выражения [2]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= -0,5\dot{M}_{ey}E_{oy} - 0,5jk\dot{M}_{hx}E_{oy}; \\ \dot{U}_b &= -0,5\dot{M}_{ey}E_{oy} + 0,5jk\dot{M}_{hx}E_{oy}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{M}_e$  – электрический момент;  $\dot{M}_h$  – магнитный момент;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $E_{oy}$  – амплитуда вертикальной составляющей электрического поля в центре нижнего отсека камеры, при распростране-

нии основной ТЕМ-волны, если подводимая мощность к одному из выходов равна 1 Вт, а другой выход нагружен согласованной нагрузкой 50 Ом, в дальнейшем – коэффициент калибровки ТЕМ-камеры,  $\sqrt{\text{Ом}}/\text{м}$ .

Складывая и вычитая выражение (1), получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_a + \dot{U}_b &= -\dot{M}_{ey}E_{oy}; \\ \dot{U}_a - \dot{U}_b &= -jk\dot{M}_{hx}E_{oy}. \end{aligned} \quad (2)$$

**П Р И М Е Ч А Н И Е 1:** здесь и далее под  $\dot{U}_a$  и  $\dot{U}_b$  имеются в виду напряжения, измеренные на соответствующих выходах камеры, разделённые на  $\sqrt{50}$ .

Введём две системы координат (см. рис. 1 на с. 11) с общей начальной точкой:  $OXYZ$  (неподвижная, связанная с камерой) и  $OX_1Y_1Z_1$  (подвижная, связанная с ИО). Методика измерений [2] предполагает измерение суммарных  $P_{sk}$  и разностных  $P_{dk}$  мощностей с выходов камеры в шести ориентациях, где  $k$  – номер ориентации.

*Ориентации 1 и 2:*

– заранее определённый центр ИО, например, геометрический центр, размещаем в центре нижнего отсека;

– совмещаем оси подвижной и неподвижной систем координат:  $O_1Y_1 \parallel OY$ ;  $O_1X_1 \parallel OX$ ;  $O_1Z_1 \parallel OZ$ ;

– поворачиваем ИО на угол  $45^\circ$  относительно оси  $OZ_1$  против часовой стрелки, если смотреть с конца оси  $O_1Z_1$ ;

– измеряем  $P_{s1}$  и  $P_{d1}$ ;

– ещё раз поворачиваем ИО на угол  $90^\circ$  в том же направлении;

– измеряем  $P_{s2}$  и  $P_{d2}$ .

**Ориентации 3 и 4:**

– совмещаем оси подвижной и неподвижной систем координат:  $O_1Z_1 \parallel OY$ ;  $O_1Y_1 \parallel OX$ ;

– поворачиваем ИО на угол  $45^\circ$  относительно оси  $OX_1$  против часовой стрелки, если смотреть с конца оси  $O_1X_1$ ;

– измеряем  $P_{s3}$  и  $P_{d3}$ ;

– ещё раз поворачиваем ИО на угол  $90^\circ$  в том же направлении;

– измеряем  $P_{s4}$  и  $P_{d4}$ .

**Ориентации 5 и 6:**

– совмещаем оси подвижной и неподвижной систем координат:  $O_1X_1 \parallel OY$ ;  $O_1Z_1 \parallel OX$ ;

– поворачиваем ИО на угол  $45^\circ$  относительно оси  $OY_1$  против часовой стрелки, если смотреть с конца оси  $O_1Y_1$ ;

– измеряем  $P_{s5}$  и  $P_{d5}$ ;

– ещё раз поворачиваем ИО на угол  $90^\circ$  в том же направлении;

– измеряем  $P_{s6}$  и  $P_{d6}$ .

Результатом двенадцати измерений с учётом (2), являясь шесть уравнений [2], из которых определяем величины трёх магнитных и трёх электрических дипольных моментов:

$$\begin{aligned} M_{ex}^2 &= (P_{s1} + P_{s2} - P_{s3} - P_{s4} + P_{s5} + P_{s6}) / (2E_{oy}^2); \\ M_{ey}^2 &= (P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} - P_{s5} - P_{s6}) / (2E_{oy}^2); \\ M_{ez}^2 &= (-P_{s1} - P_{s2} + P_{s3} + P_{s4} + P_{s5} + P_{s6}) / (2E_{oy}^2); \\ k^2 M_{hx}^2 &= (P_{d1} + P_{d2} - P_{d3} - P_{d4} + P_{d5} + P_{d6}) / (2E_{oy}^2); \\ k^2 M_{hy}^2 &= (P_{d1} + P_{d2} + P_{d3} + P_{d4} - P_{d5} - P_{d6}) / (2E_{oy}^2); \\ k^2 M_{hz}^2 &= (-P_{d1} - P_{d2} + P_{d3} + P_{d4} + P_{d5} + P_{d6}) / (2E_{oy}^2). \end{aligned} \quad (3)$$

Из уравнений (3) можно определить полную излучаемую мощность [1]:

$$P_t = (40\pi^2/\lambda^2)(M_{ex}^2 + M_{ey}^2 + M_{ez}^2 + k^2(M_{hx}^2 + M_{hy}^2 + M_{hz}^2)).$$

Для определения диаграммы направленности необходимо вычислить или измерить ещё ряд величин.

Три косинуса углов разности фаз между ортогональными электрическими (однотипными) моментами и три косинуса углов разности фаз между ортогональными магнитными (однотипными) моментами можно определить из уравнений:

$$\begin{aligned} M_{ex}M_{ey}\cos(\Phi_{ex} - \Phi_{ey}) &= [P_{s1} - P_{s2}] / (2E_{oy}^2); \\ M_{ey}M_{ez}\cos(\Phi_{ey} - \Phi_{ez}) &= (P_{s3} - P_{s4}) / (2E_{oy}^2); \\ M_{ez}M_{ex}\cos(\Phi_{ez} - \Phi_{ex}) &= (P_{s5} - P_{s6}) / (2E_{oy}^2); \\ k^2M_{hx}M_{hy}\cos(\Phi_{hx} - \Phi_{hy}) &= (P_{d2} - P_{d1}) / (2E_{oy}^2); \\ k^2M_{hy}M_{hz}\cos(\Phi_{hy} - \Phi_{hz}) &= (P_{d4} - P_{d3}) / (2E_{oy}^2); \\ k^2M_{hz}M_{hx}\cos(\Phi_{hz} - \Phi_{hx}) &= (P_{d6} - P_{d5}) / (2E_{oy}^2). \end{aligned}$$

Так же в каждой ориентации измеряется угол сдвига фазы между ортогональными магнитными и ортогональными электрическими (разнотипными) дипольными моментами ( $\Phi_{ei} - \Phi_{hj}$ ,  $i = j = x, y, z$ ). В результате мощность излучения в определённой точке свободного пространства в дальней зоне в сферической системе координат можно определить по формуле [1]:

$$\begin{aligned} P(R, \theta, \varphi) &= Z_0 / (8R^2\lambda^2) \{ (M_{ex}^2 + k^2M_{hx}^2)(\cos^2(\theta)\cos^2(\varphi) + \\ &+ \sin^2(\varphi)) + (M_{ey}^2 + k^2M_{hy}^2)(\cos^2(\theta)\sin^2(\varphi) + \\ &+ \cos^2(\varphi)) + (M_{ez}^2 + k^2M_{hz}^2)\sin^2(\theta) - \\ &- 2[M_{ex}M_{ey}\cos(\Phi_{ex} - \Phi_{ey}) - k^2M_{hx}kM_{hy}\cos(\Phi_{hx} - \Phi_{hy})] \times \\ &\times \sin^2(\theta)\sin(\theta)\cos(\varphi) - 2[M_{ey}M_{ez}\cos(\Phi_{ey} - \Phi_{ez}) - \\ &- k^2M_{hy}kM_{hz}\cos(\Phi_{hy} - \Phi_{hz})\sin(\theta)\cos(\theta)\sin(\varphi)] - \\ &- 2[M_{ez}M_{ex}\cos(\Phi_{ez} - \Phi_{ex}) - k^2M_{hz}kM_{hx}\cos(\Phi_{hz} - \Phi_{hx})] \times \\ &\times \sin(\theta)\cos(\theta)\cos(\varphi) + 2k[M_{ex}M_{hy}\sin(\Phi_{ex} - \Phi_{hy}) - \\ &- M_{ey}M_{hx}\sin(\Phi_{ey} - \Phi_{hx})]\cos(\theta) + 2k[M_{ey}M_{hz}\sin(\Phi_{ey} - \Phi_{hz}) - \\ &- M_{ez}M_{hy}\sin(\Phi_{ez} - \Phi_{hy})]\sin(\theta)\cos(\varphi) + 2k[M_{ez}M_{hx}\sin \times \\ &\times (\Phi_{ez} - \Phi_{hx}) - M_{ex}M_{hz}\sin(\Phi_{ex} - \Phi_{hz})\sin(\theta)\sin(\varphi) \}, \end{aligned}$$

где  $R, \theta, \varphi$  – координаты точки измерения мощности;  $Z_0 = 120\pi$  – характеристическое сопротивление свободного пространства;  $\lambda$  – длина волны.

Очевидные недостатки приведённой методики: повороты ИО на произвольные (большие) углы в вертикальных плоскостях и прямое измерение разности фаз в настоящей статье не рассматриваются. Методики, устраняющие указанные недостатки, приведены в [4 – 6].

Целью настоящей работы является определение двух основных параметров ТЕМ-камеры, существенно влияющих на погрешность измерения характеристик непреднамеренного электромагнитного излучения компонентов электромеханического оборудования.

**Равномерность распределения поля внутри рабочей зоны**

Погрешность измерения зависит, в том числе, и от равномерности распределения силовых линий в рабочей зоне камеры, внутри которой необходимо производить все перечисленные выше повороты ИО. Рабочая зона камеры – ограниченное пространство между центральным проводником и стенками в нижнем отсеке.

Для экспериментального определения размеров рабочей зоны ТЕМ-камеры был изготовлен комплект автономных сферических излучателей (электрических диполей). Диполь представляет собой генератор синусоидального сигнала, питающийся от батарейки. Батарейка и генератор помещены внутрь двух изолированных друг от друга медных

полусфер. Батарейка, генератор и сами полусферы крепятся на диэлектрической подложке. Основные параметры: радиус полусферы  $R = 0,036$  м; зазор между полусферами  $a = 0,001$  м.

В публикациях Национального Института Стандартов и Технологий (NIST, США) [3] под электрическим диполем имеется в виду короткий отрезок линии длиной  $L$ , по которому протекает ток  $I$ :

$$M_e = IL = (dQ/dt)L.$$

По приведённым выше параметрам для набора диполей был рассчитан дипольный момент:

$$M_e = KfU_m, \text{ А}\cdot\text{м};$$

$$K = 2\pi C(R^2/(2R - a))(\pi - a/R - (a(4R^2 - a^2)^{1/2})/(2R^2)) = 5,99 \times 10^{-12}, \quad (4)$$

где  $f$  – частота;  $C$  – ёмкость между полусферами;  $U_m / \sqrt{2}$  – действующее значение напряжения на обкладках сферического конденсатора.

Измерения проводились селективным микровольтметром SMV 11, присоединённым к одному концу камеры. При этом другой конец был нагружен на 50 Ом. Габариты камеры, спроектированной и изготовленной в соответствии с [7]:  $2a = 0,73$  м;  $b_1 = 0,73$  м;  $b_2 = 0,365$  м; длина прямоугольной части  $L = 1$  м.

Определялось относительное распределение коэффициента калибровки по оси  $OY$  ( $E_r$ ) в объёме размером:  $\Delta x = 0,5$  м;  $\Delta y = 0,475$  м;  $\Delta z = 0,8$  м (рис. 1) на дискретных частотах в диапазоне от 0,08 до 30 МГц:

$$E_r = E_{xyz}/E_{oym},$$

где  $E_{xyz}$  – измеренный коэффициент калибровки в конкретной точке рабочей зоны;  $E_{oym}$  – измеренный коэффициент калибровки камеры по оси  $OY$  в геометрическом центре нижнего отсека камеры.

Теоретический коэффициент калибровки в центре нижнего отсека рассчитывается по формуле

$$E_{oym} = \sqrt{50} / b_1 = 9,69.$$

Диполь помещался в геометрический центр камеры и по измеренному значению  $U_a$  (3) вычислялась величина  $E_{oym}$ :

$$E_{oym}^2 = P_s / M_{ey}^2,$$

где значение  $M_{ey}$  определялось по формуле (4) для  $U_m = 0,42$  В (измеренное значение разности потенциалов между полусферами диполя).

Погрешность составила менее одного процента. Далее теоретическое значение напряжения на выходе ТЕМ-камеры при помещении в геометрический центр нижнего отсека сферического диполя рассчитывалось по формуле:

$$U_{at} = 20\lg((E_{oym}M_{ey})/2) = 41,3, \text{ дБ, мкВ}, \quad (5)$$

а затем проводились измерения напряжения на выходе камеры  $U_{am}$  в различных сечениях по оси  $OZ$  неподвижной системы координат. При этом координата  $x$  изменялась от 0 до 0,25 м; координата  $y$  изменялась от  $-0,245$  до 0,230 м или, если брать расстояние от нижней части внешнего проводника, от 0,120 до 0,595 м.

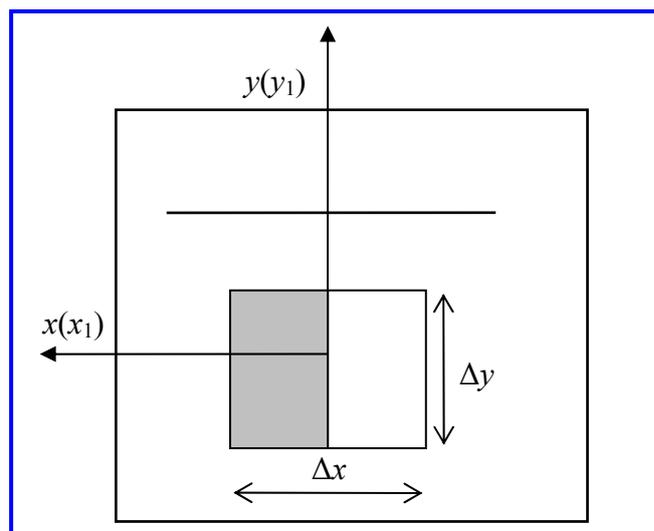
Распределение коэффициента калибровки в каждом из сечений рассчитывалось по формуле:

$$E_r = U_{am}(\text{мкВ}) / U_{at}(\text{мкВ}). \quad (6)$$

**П Р И М Е Ч А Н И Е 2:** так как вычисления проводились в относительных единицах, то примечание 1 не учитывалось как в таблице, так и в формулах (5), (6).

Результаты измерения  $U_{am}$ (дБ, мкВ) в сечении  $z = 0$  приведены в таблице.

| x    | y     |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 0,120 | 0,195 | 0,275 | 0,355 | 0,435 | 0,518 | 0,595 |
| 0,0  | 35,0  | 35,9  | 38,5  | 41,1  | 43,5  | 44,6  | 46,7  |
| 0,05 | 34,5  | 35,5  | 38,2  | 40,8  | 43,3  | 44,5  | 46,7  |
| 0,10 | 33,7  | 34,8  | 37,4  | 40,1  | 42,8  | 44,2  | 46,7  |
| 0,15 | 32,2  | 33,6  | 36,2  | 38,9  | 41,9  | 43,6  | 46,6  |
| 0,20 | 30,2  | 31,8  | 34,2  | 37,1  | 40,3  | 42,5  | 45,2  |
| 0,25 | 26,5  | 28,0  | 31,0  | 33,9  | 37,6  | 41,5  | 44,9  |



**Рис. 1.** Подвижная и неподвижная системы координат и объём, в котором проводились измерения однородности поля. Ось  $z$  направлена перпендикулярно рисунку. Координата  $z$  изменялась от  $-0,4$  до  $0,4$  м

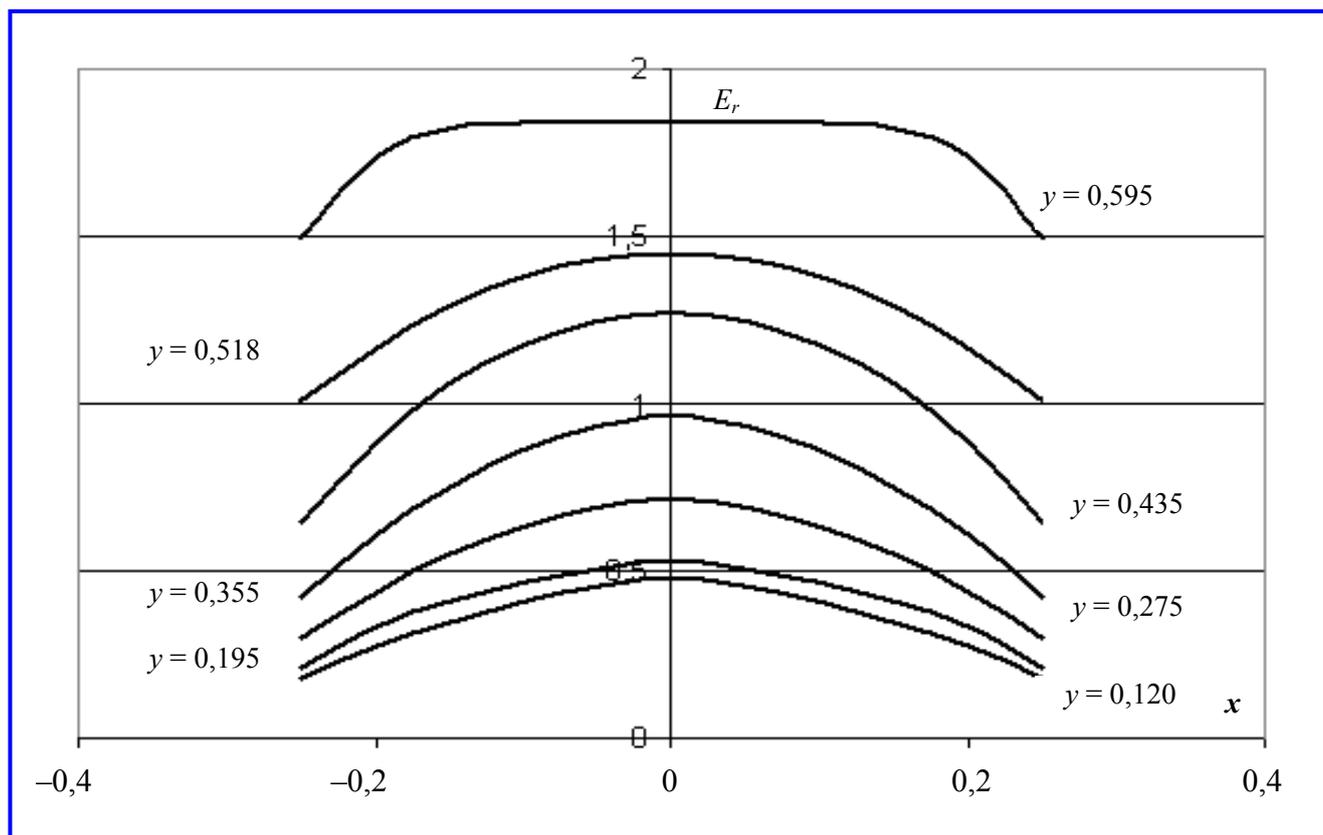


Рис. 2. Коэффициент калибровки в поперечном сечении  $z = 0$

В силу симметричности конструкции ТЕМ-камеры измерения проводились только в правой половине сечений (см. рис. 1) На левую часть сечений результаты отображались симметрично относительно оси  $OY$  неподвижной системы координат.

Результаты расчёта по формуле (6) показаны на рис. 2.

При сравнении полученных результатов с расчётными был сделан вывод о том, что для определения равномерности распределения поля внутри рабочей зоны ТЕМ-камеры в качестве излучателя целесообразным и достаточным является применение автономного электрически малого излучателя, выполненного в виде двух полусфер.

Погрешность коэффициента калибровки, включаемая в общую погрешность измерения, зависит от размеров испытуемого оборудования и возрастает с увеличением его габаритов.

#### Габаритные размеры рабочей зоны

С одной стороны под рабочей зоной понимается некий объём рабочего отсека, внутри которого погрешность измерения не превышает заданной величины. С другой – повороты ИО в вертикальных

плоскостях при испытаниях на помехозащищённость на значительные углы могут уменьшить верхнюю граничную рабочую частоту в несколько раз. При этом оператор, проводящий эксперимент, будет считать, что измерения проводятся в штатном режиме.

С целью определения размеров рабочей зоны были проведены измерения КСВН камеры, спроектированной в соответствии с методикой, изложенной в [7] ( $b_1 = 730$  мм), размером  $2200$  (длина)  $\times$   $730$  (ширина)  $\times$   $1095$  (высота), мм:

- для пустой камеры (рис. 3);
- для камеры с помещённым в рабочую зону ИО размером  $480 \times 420 \times 200$ , мм (рис. 4);
- для камеры с помещённым в рабочую зону ИО размером  $550 \times 380 \times 300$ , мм (рис. 5).

Для определения КСВН использовался измеритель КСВН панорамный Р2-73, присоединённый к одному выходу камеры. Другой выход был нагружен на  $50$  Ом. Измерения проводились в частотном диапазоне от  $0$  до  $480$  МГц.

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что при высоте ИО, не превосходящей одну треть от расстояния между центральным и внешним проводниками  $b_1$ , в диапазоне частот от нулевой частоты до частоты первого

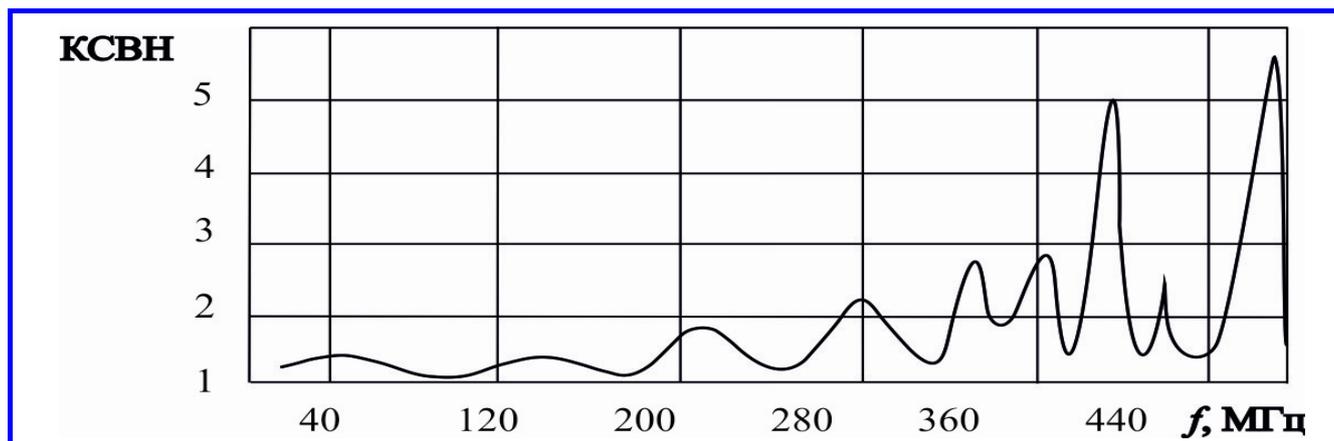


Рис. 3. КСВН пустой камеры

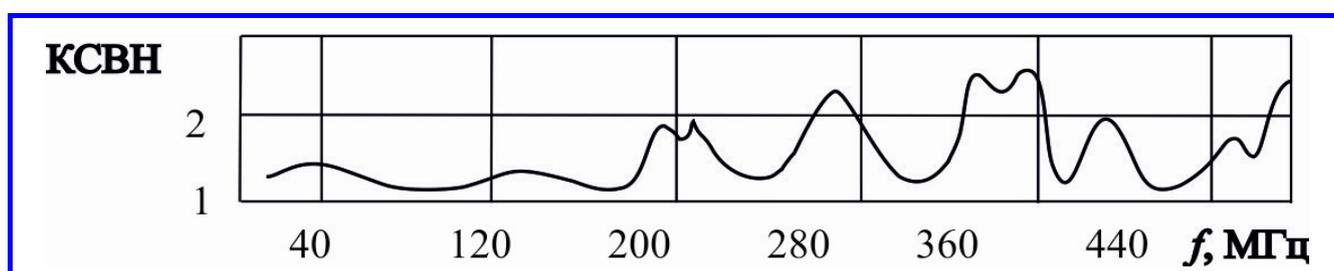


Рис. 4. КСВН камеры, содержащей в рабочей зоне испытуемое оборудование с вертикальным габаритным размером чуть меньшим одной трети высоты рабочего отсека

резонанса (в данном случае 280 МГц) измеренный КСВН (см. рис. 4) практически не отличается от КСВН пустой камеры (см. рис. 3), причём частота первого резонанса лишь незначительно сдвигается влево по оси частот. Для частот, соответствующих высшим модам, имеет место сильное расхождение измеренного КСВН в сравнении с КСВН пустой камеры.

Если высота ИО составляет более одной трети от  $b_1$ , имеет место существенное расхождение между измеренным КСВН (см. рис. 5) и КСВН пустой камеры, а частота первого резонанса существенно сдвигается влево по оси частот до 65 МГц. Таким образом, рабочий частотный диапазон уменьшается приблизительно в 4,3 раза.

По результатам измерений с учётом принятого критерия ( $КСВН < 2$ ) [7] был сделан вывод о том, что высота ИО, помещённого в ТЕМ-камеру, не должна превышать одну треть от расстояния между центральным и внешним проводниками.

### Литература

1. Mark T. Ma, Galen H. A method to quantify the radiation characteristics of an unknown interference source. Nat. Bur. Stand. (U.S.) Tech. Note 1059; 1982, October.
2. I. Sreenivasia, David C. Chang, Mark T. Ma. Characterization of electrically small radiating sources by tests Inside a transmission line cell. Nat. Bur. Stand. (U.S.) Tech. Note 1017; 1980, February.

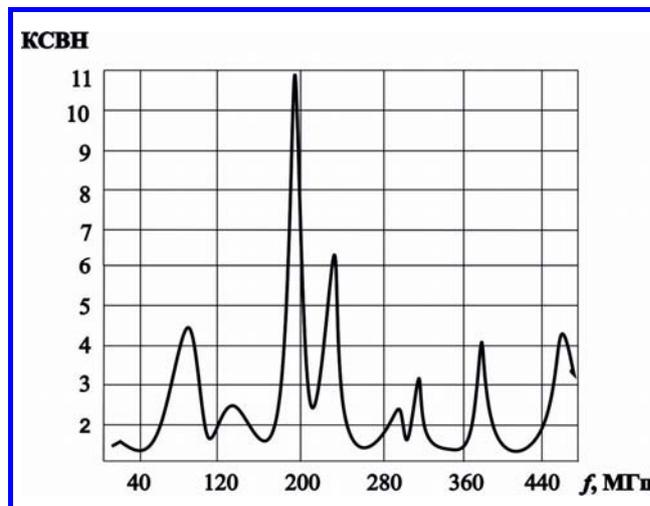


Рис. 5. КСВН камеры, содержащей в рабочей зоне испытуемое оборудование с вертикальным габаритным размером чуть большим одной трети высоты рабочего отсека

3. G.H. Koepeke, M.T. Ma, W.D. Bensema. Theory and measurements of radiated emissions using a TEM cell. NIST (U.S.), Tech. Note 1326; 1989 January.
4. Щербаков В. И., Шаронов Н. К. Методика измерения излучений от объекта, помещенного в ТЕМ-камеру, с поворотом на фиксированный угол / В. И. Щербаков, Н. К. Шаронов // Тем. сб. научн. тр. «Диагностика параметров электромагнитного поля». – М. : МАИ, 1994.

5. Щербаков В. И. Методика измерения излучения от объекта, помещенного в ТЕМ-камеру, с косвенным измерением разности фаз между разнотипными дипольными моментами / В. И. Щербаков // Тем. сб. научн. тр. «Диагностика параметров электромагнитного поля». – М. : МАИ, 1994.
6. Щербаков В. И. Методика косвенного измерения разности фаз между разнотипными дипольными моментами с поворотом на фиксированный угол / В. И. Щербаков // Тем. сб. научн. тр. «Диагностика параметров электромагнитного поля». – М. : МАИ, 1994.
7. Щербаков В. И. Определение относительных размеров устройства контроля и определения параметров электромагнитного излучения компонентов электромеханического оборудования на базе ТЕМ камеры / В. И. Щербаков // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – Т. 138. – № 1. – С. 11 – 14.

*Поступила в редакцию 16.12.2013*

***Вадим Иванович Щербаков, инженер, т. (495) 366-26-11, e-mail: vscherv@mail.ru.***