$$K_n[1] = \begin{cases} j2, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}. \quad (13)$$

Обозначим $\frac{1}{C(t)} = N$. Тогда:

$$K_n\left[\frac{1}{C(t)}\right] = K_n[N] = N_n^*. \quad (14)$$

Используя формулу для изображения произведения двух функций [3], можно записать:

$$K_n\left[\frac{1}{C(t)}Q(t)\right] = \frac{1}{j2}\sum_{v=-\infty}^{\infty} N_{n-v}^* Q_v^* = \frac{1}{j2}\sum_{v=-\infty}^{\infty} N_v^* Q_{n-v}^*. \quad (15)$$

Таким образом, с учетом (10), (11) и (15) комплексное изображение уравнения (5) можно представить в виде системы алгебраических уравнений:

$$jn\omega Q_n^* + \frac{1}{j2R_H}\sum_{v=-\infty}^{\infty} N_v^* Q_{n-v}^* = \frac{U_C}{R_H} K_n[1] \quad (16)$$

Подставляя (2) в (19) и применяя преобразование (10), получим:

$$N_v^* = \begin{cases} j2C_0, & v = 0 \\ -\frac{jm}{C_0}, & v = 0 \\ 0, & v \neq 0, \ 1 \end{cases} \quad (17)$$

Подставляя (13) и (17) в (16) и используя свойство $Q_{-n}^* = -Q_n^*$ [3], получим:

$$Q_0^* = \frac{j^2 U_C C_0}{1 - \frac{m}{2}\frac{Q_1^* - \hat{Q}_1}{Q_0^*}}, \qquad Q_n^* = \frac{m}{2}\frac{Q_{n-1}^* + Q_{n+1}^*}{1jn\omega R_H C_0 + 1}, \quad (18)$$

где $\hat{Q}_n$ – число, комплексно сопряженное Q_n.

Решение системы уравнений (22) с учетом (7) – (9) может быть найдено в виде суммы гармоник:

$$Q(t) = Q_0 + Q_1\sin(\omega t + \varphi_1) + Q_2\sin(\omega t + \varphi_2) + \ldots + Q_n\sin(\omega t + \varphi_n) + \ldots, \quad (19)$$

Выражение (19) содержит бесконечное количество слагаемых, поэтому для его практического использования необходимо оборвать ряд, задавшись максимальным номером n значащей гармоники.

Чтобы найти отклик измерительной системы, содержащей динамический конденсатор, необходимо продифференцировать уравнение (19) по времени, что даст силу тока в цепи, и умножить результат на R_H в соответствии с законом Ома для участка цепи. Тогда искомый коэффициент преобразования $A = \frac{U(t)}{u_C}$ разности потенциалов между обкладками U_C в выходное переменное напряжение $U(t)$ может быть выражен в виде:

$$A = \frac{U(t)}{U_C} = \frac{Q_1\omega R_H}{U_C}\sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{2Q_2\omega R_H}{U_C}\sin(2\omega t + \varphi_2) + \ldots + \frac{nQ_n\omega R_H}{U_C}\sin(n\omega t + \varphi_n). \quad (20)$$

Таким образом, применение комплексно-гармонического метода к анализу цепи, содержащей динамический конденсатор, позволило найти функцию преобразования емкостного первичного преобразователя зондового электрометра в виде суммы гармоник, причем система уравнений (18) разрешима для любых значений параметров анализируемой цепи.

1. Lonardo, P. M. Emerging Trends in Surface Metrology / P. M. Lonardo, D. A. Lucca, et al.// CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2002. – № 51(2). – P. 701-723.
2. Booth, J. E., Harvey, T. J., et al. Scuffing detection of TU3 cam–follower contacts by electrostatic charge condition monitoring // Tribology International. – 2010. – № 43. –P. 113-128.
3. Пухов, Г. Е. Комплексное исчисление и его применение. / Г. Е. Пухов– Киев: Из-во АН УССР, 1961. – 220 с.

МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ АНТЕНН С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭТАЛОННЫХ АНТЕНН

Галыго А.В., Волынец А.С.

Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь

С развитием науки все большее распространение получают антенны с круговой поляризационной характеристикой электрического поля. Примерами использования антенн с круговой поляризацией могут быть различные спутниковые системы связи, системы позиционирования объектов, радиочастотные метки [1], радиорелейные системы связи, при реализации неразрушающих методов контроля. В

связи с этим возникает необходимость определения их метрологических характеристик [2].

Всякая антенна создает в дальней зоне окружающего пространства электрическое поле, определенным образом поляризованное. Вид поляризации определяется по форме кривой, которую описывает конец вектора напряженности электрического поля в плоскости, перпендикулярной к точке наблюдения: если в течение всего периода колебаний он описывает окружность, имеет место круговая поляризация, если сохраняет плоскость своей ориентации, меняя только направление на 180° – линейная. Круговая и линейная поляризационная характеристика – это частные, предельные случаи эллиптической поляризации [3].

Одной из наиболее значимых характеристик антенны СВЧ-диапазона является её коэффициент усиления, характеризующий выигрыш в интенсивности излучаемой мощности в определенном направлении по сравнению с изотропным излучателем [4].

Коэффициент усиления G антенны связан с её эффективной площадью соотношением:

$$G = 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot S_{эф}}{\lambda^2}\right), \qquad (1)$$

где λ – длина волны, *м*; $S_{эф}$ – эффективная площадь антенны, $м^2$ [5].

Наиболее широко распространенным методом определения коэффициента усиления антенны в лабораторных условиях является метод сравнения с эталонной антенной с известным коэффициентом усиления.

Для реализации метода сравнения необходимо использовать в качестве эталонной аналогичную антенну с круговой поляризационной характеристикой. Зачастую в измерительных лабораториях все имеющиеся эталонные антенны имеют линейную поляризацию. Отсюда возникает необходимость поиска методов определения характеристик антенн с круговой поляризацией с использованием эталонов с линейной поляризацией.

Для решения поставленной задачи измерения проводят в несколько этапов. На первом этапе производят определение коэффициента усиления исследуемой антенны методом сравнения с эталонной линейно-поляризованной антенной. Исследования проводят в экранированной безэховой камере (рисунок 1), исключающей переотражения электромагнитных волн [5].

Электромагнитное поле, создаваемое излучающей линейно-поляризованной антенной 2, поочередно измеряют эталонной линейно-поляризованной 4 и исследуемой антенной 6, имеющей круговую поляризацию. При этом при проведении измерений исследуемую антенну ориентируют вокруг своей оси таким образом, чтобы получить максимальные показания подключенного к её выходу анализатора спектра 7, что будет соответствовать настройке на большую ось поляризационного эллипса. Из полученных результатов определяют эффективную площадь, а по формуле (1) предварительный коэффициент усиления исследуемой антенны, который в дальнейшем будет скорректирован [2].

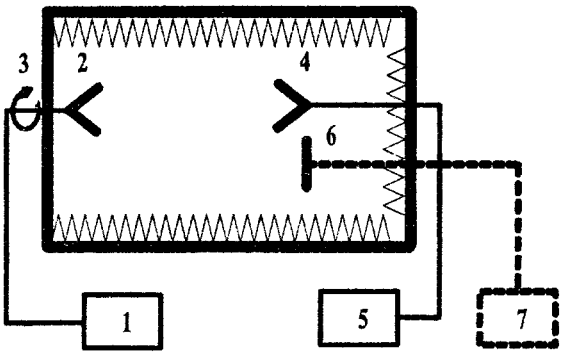

Рисунок 1 – Схема соединения приборов при проведении исследований: 1 – генератор сигналов, 2 – излучающая рупорная антенна, 3 – устройство позиционирования, 4 – эталонная рупорная антенна, 5 – измеритель мощности, 6 – исследуемая антенна, 7 – анализатор спектра

Расчет эффективной площади исследуемой антенны:

$$S_{эф} = \frac{P_{изм} \cdot S_{эт}}{P_{эт}}, \qquad (2)$$

где $P_{изм}$ – уровень мощности на выходе исследуемой антенны, измеренный анализатором спектра, *Вт*; $P_{эт}$ – уровень мощности на выходе эталонной антенны, *Вт*; $S_{эт}$ – эффективная площадь эталонной антенны, $м^2$.

На втором этапе измерений производят определение коэффициента эллиптичности исследуемой антенны методом поляризационной диаграммы. Метод заключается в измерении с помощью исследуемой антенны электромагнитного поля, создаваемого вращающейся линейно-поляризованной излучающей антенной. Результирующая кривая зависимости принятого сигнала от угла поворота плоскости поляризации излучающей линейно-поляризованной антенны образует поляризационную диаграмма (рисунок 2) [6].

Степень эллиптичности характеризуется коэффициентом, который определяется отношением большой и малой полуоси поляризационного эллипса. Форма поляризационного эллипса может меняться от окружности до восьмерки, соответственно коэффициент эллиптичности будет принимать промежуточные значения от единицы до бесконечности что соответствует линейной и круговой поляризации [7].

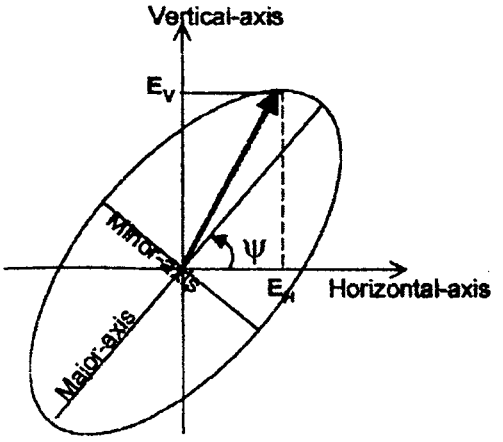

Рисунок 2 – Поляризационная диаграмма антенны с эллиптической поляризацией [4]

Искомый коэффициент усиления антенны с круговой (эллиптичной) поляризацией $G_{эл}$ находят расчетным путем по формуле:

$$G_{эл} = G + G_{кор} + 3, \quad (3)$$

где G – коэффициент усиления, определенный методом сравнения с эталонной линейно-поляризованной антенной, *дБ*; $G_{кор}$ – корректирующий коэффициент, *дБ* [7].

Корректирующий коэффициент в формуле (3) рассчитывается исходя из коэффициента эллиптичности антенны:

$$G_{кор} = 10\log\left(0.5\left(1+\frac{1}{Z_{дБ}}\right)\right), \quad (4)$$

где $Z_{дБ}$ – коэффициент эллиптичности, *дБ* [4].

Коэффициент эллиптичности определяют по формуле:

$$Z_{дБ} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{max}}{P_{min}}\right), \quad (5$$

где P_{max} и P_{min} – соответствуют мощности в большой и малой полуоси эллипса поляризационной диаграммы, *Вт*.

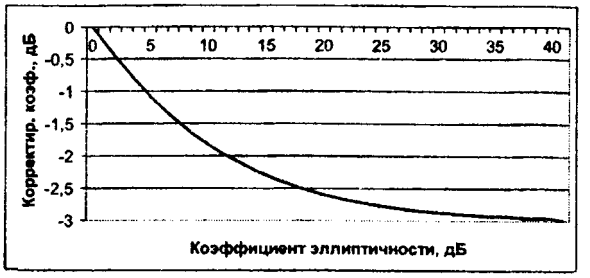

Рисунок 3 – Зависимость корректирующего коэффициента от коэффициента эллиптичности

Из диаграммы (рисунок 3) видно, для антенны, имеющей идеальную круговую поляризационную характеристику, у которой коэффициент эллиптичности равен нулю, корректирующий коэффициент равен нулю. В таком случае искомый коэффициент усиления будет на 3 дБ больше коэффициента усиления, измеренного методом сравнения.

При больших коэффициентах эллиптичности, когда исследуемая антенна имеет близкую к линейной поляризационную характеристику, корректирующий коэффициент стремиться к минус 3. Таким образом, искомый коэффициент усиления будет стремиться к коэффициенту усиления антенны с линейной поляризационной характеристикой.

1. Antennas and Propagation in UHF RFID Systems. 2008 IEEE International Conference on RFID. – The Venetian, Las Vegas, Nevada, USA. April 16-17, 2008.
2. Polarization Loss in a Link Budget When Using Measured Circular – Polarization Gains Antennas. IEEE Antennas and Propagation Magazine. – Vol. 38, No. 1. – February 1996.
3. Казарин, А.Н. Методы расчета и измерения характеристик и параметров антенн. / А.Н. Казарин и др. – Мн.: Изд. БГУ, 1971. – 116 с.
4. Страхов, А.Ф. Автоматизированные антенные измерения. / А.Ф. Страхов. – М.: Радио о связь, 1985. – 136 с., ил.
5. Мелехов, М.Е. Поверка средств измерений напряженности электромагнитного поля: Учебное пособие. / М.Е. Мелехов, П.А. Иващенко. – М.: Издательство стандартов, 1986 г. – 93 с, ил.
6. Захарьев, Л.Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский, В.И. Турчинин и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 386 с., ил.
7. Understanding and Measuring Circular Polarization. IEEE Transaction on education, Vol. 46, No. 3, August 2003.