

**ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ  
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ  
В ЛОКАЛЬНОМ ОБЪЕКТЕ**

*Розвадовский<sup>1</sup> А.Ф., Шахрияр Шалилех<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Государственное предприятие*

*"Испытательный центр "Омега", г. Севастополь, Украина*

*<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины*

*"Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина*

**Введение**

В настоящее время все большее распространение получают индукционные системы для передачи высокочастотных сигналов между электротехническими устройствами, включенными в систему питания локального объекта [1]. Отличительная особенность данных систем состоит в использовании реактивной составляющей комплексного потока энергии электромагнитного поля.

Обычные подходы для оценки электромагнитной совместимости (ЭМС), в частности методы измерения помехоэмиссии, изложенные стандартах CISPR 16-2-3, ANSI C63.4, MIL-STD 461F и др., для них неприменимы, т.к. в данном случае необходимо определить значение реактивной составляющей потока энергии электромагнитного поля.

В статье приведен один из подходов для оценки электромагнитной обстановки в локальном объекте, на котором установлены индукционные системы для передачи высокочастотных сигналов.

**Соотношения для оценки электромагнитной совместимости**

Принцип работы рассматриваемых индукционных систем основан на явлении магнитной индукции [2]. В результате того, что передача сигналов осуществляется внутри локальных объектов (внутри зданий и отдельных помещений), как неоднородной среды, возникают многочисленные комбинационные составляющие в широком спектре частот, включая частоты электрической сети 50 (60) Гц. Чтобы оценить их в аспектах электромагнитной совместимости в локальном объекте, необходимо определить распределение реактивной мощности  $Q$  во всем спектре частот.

Значение реактивной мощности  $Q$  найдем из уравнения среднего баланса энергии для реактивных составляющих как [3]:

$$Q = \operatorname{Im} \oint_S \dot{H} \cdot dS = 2\omega(\bar{W}^E - \bar{W}^M) - \operatorname{Im} \dot{P}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

где  $\dot{P}_{\text{стор}}$  – комплексная мощность сторонних источников, заключенных в объеме  $V$ ;  $\bar{W}^E$ ,  $\bar{W}^M$  – средние значения электрической и магнитной энер-

гий, накоплюваних в об'ємі  $V$ ;  $\dot{I}$  – комплексний вектор Пойнтинга;  $\omega$  – кругова частота сигналу,  $S$  – поверхню, обмежуючу об'єм  $V$ .

Середні значення електричної і магнітної енергій всередині розглянутого об'єму  $V$  в відповідності з [3] рівні:

$$\bar{W}^e = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V \epsilon_r \dot{E} \cdot \dot{E}^* dv; \quad (2)$$

$$\bar{W}^m = \frac{\mu_0}{2} \int_V \mu_r \dot{H} \cdot \dot{H}^* dv, \quad (3)$$

где  $\dot{E}, \dot{E}^*$  – комплексний і комплексно спряжений вектори напруженности електричного поля в об'ємі  $V$ ;  $\dot{H}, \dot{H}^*$  – комплексний і комплексно спряжений вектори напруженности магнітного поля в об'ємі  $V$ ;  $\epsilon_0$  – електрична постійна,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф / м;  $\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , Гн/м;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність середовища.

Из-за малих розмірів антен індукційних систем по відношенню до робочої довжини хвилі, їх діаграми напрямленности для електричної і магнітної складових напруженностей поля звичайно близькі до круговим [1].

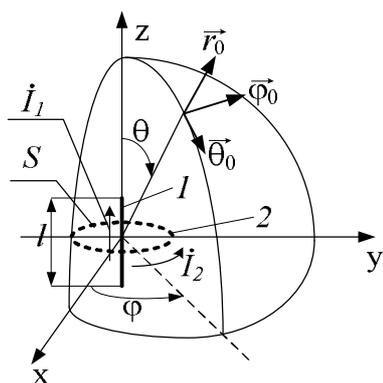


Рис. 1. Елементарні електричний 1 і магнітний 2 випромінювачі

Поэтому при расчете значения реактивной мощности  $Q$  воспользуемся представлением элементарного электрического 1 и магнитного 2 излучателей (см. рис. 1). Для каждого из излучателей найдем средние значения электрической  $\bar{W}^e$  и магнитной  $\bar{W}^m$  энергий.

Предположим, что функция  $I(t)$  описывает значение тока в элементарном излучателе. В общем случае сигналы  $I(t)$ , передаваемые в индукционных системах, являются непериодическими. Для расчета реактивной мощности таких сигналов воспользуемся представлением таких сигналов в виде комплексного ряда Фурье [4]:

$$I(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c_n \exp(jn\omega_1 t), \quad (4)$$

где  $c_n = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} I(t) \exp(-jn\omega_1 t) dt$  – коэффициенты ряда Фурье;  $T$  – отрезок времени, включающий промежуток  $(t_1, t_2)$ , в течение которого передается сигнал;  $\omega_1$  – частота 1-й гармоники;  $n$  – число гармоник, на которые раскладывается сигнал.

Предположим, что размеры локального объекта не превышают нескольких длин волн, т.е. передача данных в индукционных системах осуществляется в ближней зоне.

Тогда, с учетом представления токов вдоль электрического  $\dot{I}_1$  и магнитного  $\dot{I}_2$  излучателей в виде ряда (4), выражения для составляющих напряженностей электрического и магнитного полей имеют вид [3]:

- для элементарного электрического излучателя:

$$\dot{E}_1 \approx -j \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c1_n \exp(jn\omega_1 t) \frac{l}{4\pi\omega\epsilon_0\epsilon r^3} (\vec{r}_0 2 \cos \theta + \vec{\theta}_0 \sin \theta); \quad (5)$$

$$\dot{H}_1 \approx \vec{\phi}_0 \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c1_n \exp(jn\omega_1 t) \frac{l}{4\pi r^2} \sin \theta; \quad (6)$$

- для элементарного магнитного излучателя:

$$\dot{E}_2 \approx -j\vec{\phi}_0 \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c2_n \exp(jn\omega_1 t) \frac{n\omega_1 \mu \mu_0 S}{4\pi r^2} \sin \theta; \quad (7)$$

$$\dot{H}_2 \approx \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c2_n \exp(jn\omega_1 t) \frac{S}{4\pi r^3} (\vec{r}_0 2 \cos \theta + \vec{\theta}_0 \sin \theta), \quad (8)$$

где  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;  $c1_n, c2_n$  – коэффициенты ряда Фурье при разложении комплексных токов электрического  $\dot{I}_1$  и магнитного  $\dot{I}_2$  излучателей соответственно;  $l$  – длина элементарного электрического излучателя;  $S$  – площадь, ограниченная рамкой элементарного магнитного излучателя;  $r$  – расстояние от элементарного излучателя до точки наблюдения;  $\theta$  – угол в сферической системе координат, определяющий направление на точку наблюдения;  $\vec{r}_0, \vec{\theta}_0, \vec{\phi}_0$  – орты в сферической системе координат.

Усредненные значения электрической  $\bar{W}^E$  и магнитной  $\bar{W}^M$  энергий, накапливаемых в объеме  $V$ , могут быть получены в результате подстановки значений  $\dot{E}$  и  $\dot{H}$  из выражений (5) – (8) в выражения (2) и (3).

Для оценки ЭМС индукционных систем передачи сигналов в локальном объекте необходимо знать значение коэффициента реактивной мощности  $\text{tg} \phi$  для частоты электрической сети 50 (60) Гц [5]:

$$\text{tg} \phi = Q/P, \quad (9)$$

где  $P$  – активная мощность устройств, на которые воздействует магнитное поле.

Для различных технических средств установлены предельные значения коэффициента реактивной мощности  $\text{tg}_n \phi$  [6].

Сравнивая значения коэффициента  $\text{tg}_n \phi$ , с расчетными значениями  $\text{tg} \phi$ , полученными при использовании выражений (1) и (9), по их разности

$$\Delta = \text{tg}_n \phi - \text{tg} \phi, \quad (10)$$

осуществляют оценку электромагнитной совместимости индукционных систем передачи сигналов в локальном объекте.

В случае, когда выполняется неравенство

$$\Delta \geq 0, \quad (11)$$

считаем, что ЭМС индукционных систем передачи сигналов в локальном объекте с другими устройствами обеспечена.

### **Оценка электромагнитной совместимости индукционных систем**

Индукционные системы используют для передачи сигналов нелицензируемый диапазон частот, предназначенный для промышленного, медицинского и научного оборудования. Несущей является частота 13,56 МГц [1], при этом для передачи сигналов используются те же виды модуляции, что и в обычных радиочастотных системах связи (амплитудная, частотная, фазовая) [6].

Помехи на частотах, близких к частоте электрической сети 50 (60) Гц в таких системах возникают в результате образования вторичной интермодуляционной эмиссии (пассивной интермодуляции) вследствие нелинейного преобразования (детектирования) высокочастотных токов, наводимых внутри локального объекта [7].

Рассмотрим интермодуляционные помехи второго порядка, частота которых равна

$$\Omega = f_2 \pm f_1, \quad (12)$$

где  $f_2, f_1$  – частоты спектральных составляющих тока из ряда (4).

Предположим, что

$$\Omega = f_2 - f_1 = 50 \text{ (Гц)},$$

а амплитуда тока интермодуляционной помехи  $I_{ип}$  приблизительно равна амплитуде тока основного сигнала  $I$

$$I_{ип} \approx I. \quad (13)$$

Амплитуда тока в индукционных системах передачи сигналов в локальном объекте, в соответствии со спецификацией, равна 10 мА [6]. Так как рассматривается взаимодействие первой и второй гармоник тока (интермодуляционные помехи второго порядка), то в соответствии с (13)

$$I_{ип} \approx 10 \text{ мА}.$$

Предположим, что комплексная мощность сторонних источников  $\dot{P}_{стор}$ , заключенных в рассматриваемом объеме  $V$ , равна нулю, т.е. реактивная мощность  $Q$  определяется только значением реактивной составляющей электромагнитного поля индукционной системы.

Размеры антенны в таких системах значительно меньше длины волны  $\lambda$ . Поэтому примем в выражениях (5) – (8) длину элементарного диполя  $l$  и радиус рамки  $R$  равными 1 см, что соответствует размерам большинства используемых устройств [8].

Рассмотрим случай свободного пространства, когда  $\epsilon_r = 1$  и  $\mu_r = 1$ . Зная значение амплитуды тока интермодуляционной помехи  $I_{ип}$ , построим гра-

фик зависимости реактивной мощности  $Q$  от расстояния  $r$  для элементарного электрического 1 и магнитного 2 излучателей (см. рис. 2).

Значение угла  $\theta$  для элементарного электрического излучателя принято равным  $\pi/2$ , а для магнитного –  $\theta=0$ , что соответствует направлению максимального потока энергии (см. рис. 1).

Из графиков видно, что использование элементарного электрического излучателя для передачи сигналов в индукционных системах нецелесообразно, т.к. его радиус действия, в котором реактивная мощность превышает 1 мкВАр не превышает 10 см.

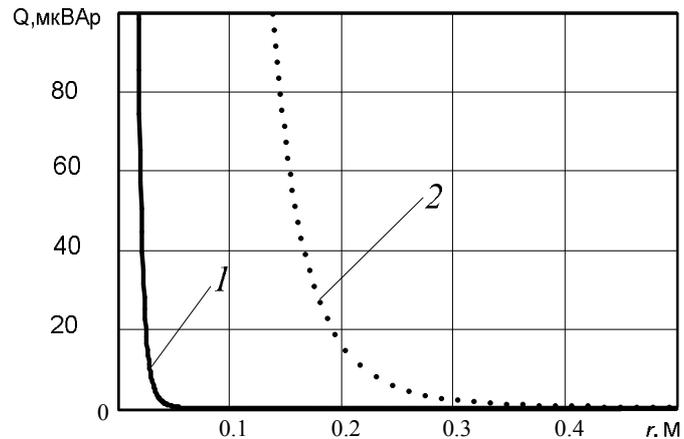


Рис. 2. Зависимость реактивной мощности от расстояния для элементарного электрического 1 и магнитного 2 излучателей

Использование элементарного магнитного излучателя позволяет обеспечить взаимодействие на расстоянии до 0,5 – 1 м, при этом, реактивная мощность в этом случае не более 10...100 мкВАр, что значительно меньше активной мощности потребителей электрической сети  $P$ , минимальное значение которой обычно составляет единицы ватт.

Следовательно, коэффициент реактивной мощности, согласно (9), равен  $\text{tg } \phi \approx 0$ .

Так как предельные значения коэффициента реактивной мощности  $\text{tg}_n \phi$  всегда больше 0, то из (10) следует (11), и таким образом, ЭМС высокочастотных индукционных систем для передачи сигналов в локальном объекте с другими устройствами обеспечена.

### Выводы

Выполнена оценка ЭМС индукционных систем передачи сигналов в локальном объекте. Показано, что из-за малого радиуса действия (не более 0,5...1 м) и малых мощностей в данных системах электромагнитная совместимость с другими устройствами внутри локального объекта обеспечена.

### Литература

1. R. Bansal, "Near-Field Magnetic Communication", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 46, № 2, pp. 114-115, Apr. 2004.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л.А. Бессонов. – М.: Высш.шк., 1986. – 263 с.
3. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – 3-е изд. – М.: Наука, Главная редакция

физико-математической литературы, 1989. – 544 с.

4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов / И.С. Гоноровский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с., ил.

5. Анохова Е.В. Влияние реактивной мощности на передачу электроэнергии / Е.В.Анохова, С.В. Клынин, Т.С. Романовская // Коммунальная энергетика. –2009. – № 5, Ч. I. – С. 64–69.

6. FreeLinc Near-Field Magnetic Induction Technology White paper / FreeLinc. – 2006. – Режим доступа к спец.: <http://www.freelinc.com/downloads/FreeLinc%20NFMI%20White%20Paper.pdf>

7. Мордачев В.И. Влияние декоративных металлических покрытий зданий на электромагнитную обстановку и электромагнитную совместимость радиосистем / В.И. Мордачев, О.А. Юрьев, П.А. Литвинко – Режим доступа к журн.: [http://library.bntu.by/vesnik\\_pdf/vesnik\\_2009\\_6/pdf/9.pdf](http://library.bntu.by/vesnik_pdf/vesnik_2009_6/pdf/9.pdf)

8. Pay-Buy-Mobile Business Opportunity Analysis – Public White Paper / GSMA. – 2007. – Режим доступа к статье: [http://www.gsmworld.com/documents/gsm\\_pbm\\_white\\_paper\\_11\\_2007.pdf](http://www.gsmworld.com/documents/gsm_pbm_white_paper_11_2007.pdf)

*А. Ф. Розвадовський, Ш. Шалілех. Оцінка електромагнітної сумісності високочастотних індукційних систем в локальному об'єкті. У статті наведено один із підходів для оцінки електромагнітної обстановки в локальному об'єкті, на якому встановлені індукційні системи для передавання високочастотних сигналів. Відмінна риса даних систем полягає у використанні реактивної складової комплексного потоку енергії електромагнітного поля. Щоб оцінити їх в аспектах електромагнітної сумісності (ЕМС) в локальному об'єкті, необхідно визначити розподіл реактивної потужності у формі спектрі частот. З урахуванням подання струмів вздовж електричного і магнітного випромінювачів у вигляді комплексного ряду Фур'є, отримано формули для складових напруженостей електричного і магнітного полів. Для оцінювання ЕМС індукційних систем передавання сигналів у локальному об'єкті запропоновано критерій різниці фактичного і граничного коефіцієнтів реактивної потужності. Показано, що внаслідок малого радіусу дії (не більше 0,5 ... 1 м) і малих потужностей в даних системах електромагнітна сумісність з іншими пристроями всередині локального об'єкта забезпечена.*

**Ключові слова:** ЕМС, індукційна система, передавання сигналів, коефіцієнт реактивної потужності.

*А.Ф. Розвадовский, Ш. Шалилех. Оценка электромагнитной совместимости высокочастотных индукционных систем в локальном объекте. В статье приведен один из подходов для оценки электромагнитной обстановки в локальном объекте, на котором установлены индукционные системы для передачи высокочастотных сигналов. Отличительная особенность данных систем состоит в использовании реактивной составляющей комплексного потока энергии электромагнитного поля. Для их оценки в аспектах электромагнитной совместимости (ЭМС) в локальном объекте определено распределение реактивной мощности во всем спектре частот. С учетом представления токов вдоль электрического и магнитного излучателей в виде комплексного ряда Фурье получены выражения для составляющих напряженностей электрического и магнитного полей. Для оценки ЭМС индукционных систем передачи сигналов в локальном объекте предложен критерий разности фактического и предельного коэффициентов реактивной мощности. Показано, что вследствие малого радиуса действия (не*

более 0,5...1 м) и малых мощностей в данных системах электромагнитная совместимость с другими устройствами внутри локального объекта обеспечена.

**Ключевые слова:** ЭМС, индукционная система, передача сигналов, коэффициент реактивной мощности.

*A. F. Rozvadovsky, S. Shalileh. **Evaluation of electromagnetic compatibility of high-frequency induction systems in a local facility.** The article shows one approach to assess the electromagnetic environment in a local facility that is running induction system for transferring high frequency signals. A distinctive feature of these systems is to use a reactive component of integrated energy flux of the electromagnetic field. To evaluate them in the aspects of electromagnetic compatibility (EMC) in the local object defined distribution of reactive power across the frequency spectrum. Current along the electric and magnetic radiators present as of complex Fourier series expressions are obtained for the components of electric and magnetic fields. For assessment the EMC induction systems transmit signals in a local facility proposed criterion of the difference actual and limiting factors of reactive power. It is shown that due to short radius of action (no more than 0,5 ... 1 m) and low power in data systems, electromagnetic compatibility with other devices inside a local object is provided.*

**Key words:** EMC, induction system, transmission signals, coefficient reactive power.