

## УЛУЧШЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН

*Овсяников Виктор В., д.т.н., профессор*  
*Загородняя Л. С., ассистентка*  
Днепропетровский национальный университет  
им. О. Гончара, Украина

### Введение и постановка задачи

В настоящее время уменьшение размеров и массы антенных систем является актуальной проблемой антенной науки и техники. Относительно вибраторных и рамочных проволочных антенн с размерами, значительно меньшими резонансных, или так называемых электрически малых антенн (ЭМА) условилось, что  $ka \leq 1$ , где  $k$  – волновое число;  $a$  – радиус сферы, охватывающей максимальный размер антенны, например, обычной П-образной симметричной антенны (рис.1).

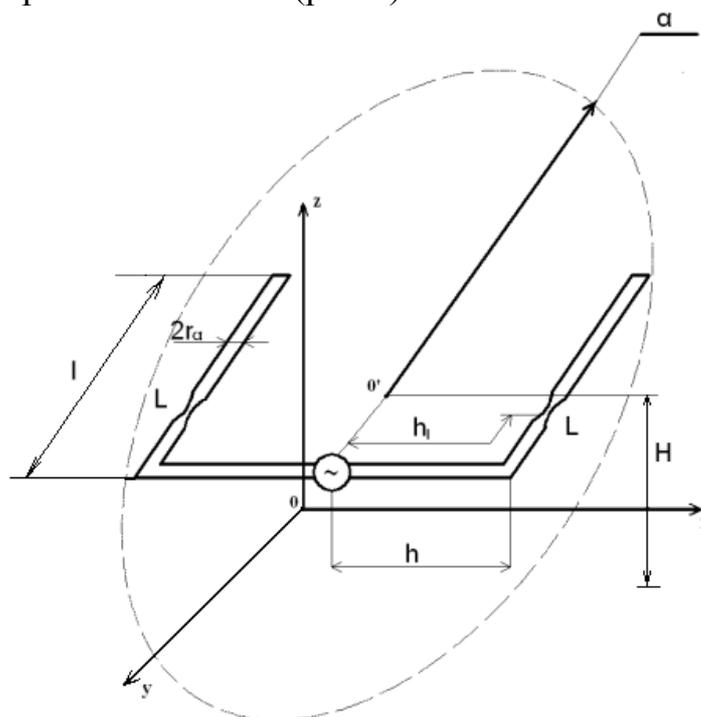


Рис.1 Общий вид электрически малой П-образной антенны с согласующими индуктивными нагрузками

Простые расчеты показывают, что для умеренно электрически малых антенн ( $ka = 1$ ) в виде, например, обычного симметричного прямолинейного вибратора с длиной плеча  $d = h + l \approx 0,17\lambda$ , где  $\lambda$  – коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) уже достигает очень высоких значений (400 и более) при обычном волновом сопротивлении питающего фидера 50 Ом.

Дальнейшее уменьшение электрического размера антенн, например, до значения  $ka = 0,1$  приводит к еще большему росту КСВН до  $10^6$ , что значительно затрудняет согласование входа ЭМА с передатчиком (приемником). Известны методы согласования ЭМА с подводющим фидером, то есть, понижения КСВН ( $K_c$ ) на входных разъемах [1- 4] и другие.

Целью работы является исследование возможностей улучшения входных электрических характеристик ЭМА путем непосредственного включения в разрывы излучающих ветвей антенны согласующих сосредоточенных реактивных нагрузок с учетом методов, изложенных в работах [5-8] и других. В данной работе приведены результаты оценки КПД ЭМА в зависимости от их электрической длины, а также результаты статистической оценки чувствительности КСВН ЭМА к флуктуациям параметров элементов ее конструкции. Результаты исследований иллюстрируются на примерах симметричных прямолинейного ( $l = 0$ ) и П-образного вибраторов (рис. 1).

### Улучшение КСВН и КПД электрически малых антенн

Рассмотрим результаты расчетов методом интегрального уравнения КСВН (рис. 2) укороченных в разной степени П-образных симметричных ЭМА (рис.1) с включенными в излучающие ветви индуктивными нагрузками (ИН) при напряжении возбуждения на входе антенны равном  $1 В$ , и волновом сопротивлении питающего фидера  $50 \text{ Ом}$ .

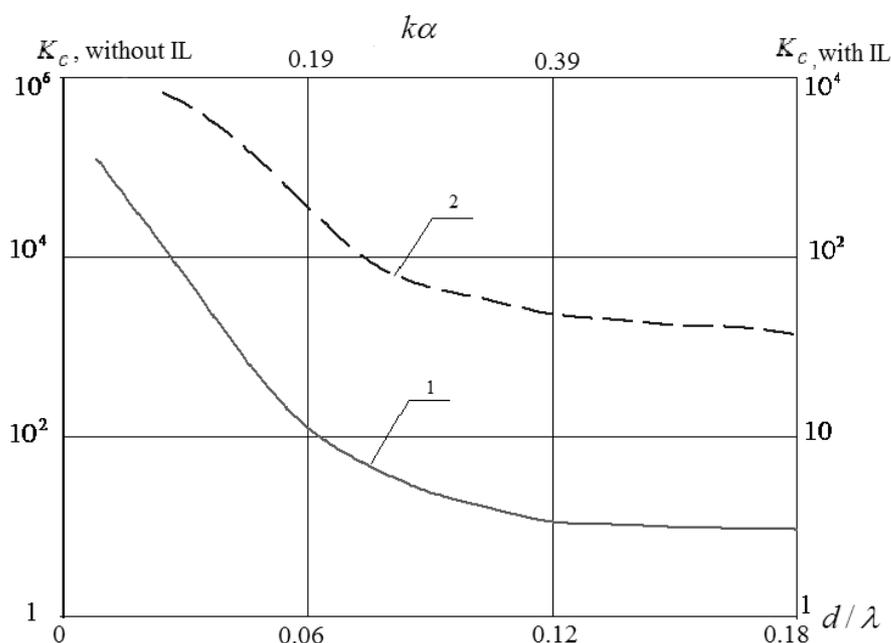


Рис. 2 Графики  $K_c$  на входе ЭМА в зависимости от электрической длины П-образных антенн: 1 – ЭМА с оптимальными (ИН) в плечах антенны [5, 6] (шкала  $K_c$  справа); 2 – ЭМА без индуктивных нагрузок в плечах (шкала  $K_c$  слева)

Как следует из графиков, включение ИН в оптимальных точках излучателя [5, 6] позволяет получить в ЭМА последовательный резонанс тока. Это явление сопровождается резким увеличением действующего значения тока на ЭМА и существенным снижением  $K_c$ . Например, при электрической длине плеча П-образной ЭМА  $d/\lambda = 0,12$ , укороченной вдвое относительно резонансной длины,  $K_c$  ЭМА с ИН составляет 6,7, а без ИН 6580, то есть, приблизительно на 3 порядка ниже. Это является положительным результатом согласования ЭМА с питающим фидером. При тех же условиях наблюдается значительный необыкновенный рост мощности на входных разъемах ЭМА (приблизительно на 2 порядка) по сравнению с мощностью в таком же излучателе без ИН, при неизменном напряжении на входных клеммах ЭМА.

Очевидно, рост амплитуды тока в ЭМА с ИН приводит к значительному увеличению эффективности излучения (приема) ЭМА. Этот эффект является новым и мало изученным.

Дальнейшего понижения КСВН ЭМА с ИН до полного согласования с питающим фидером можно добиться подбором места включения ИН в провод ЭМА и изменением положения точек возбуждения на нем [5, 6].

По результатам исследования  $K_c$  в частотном диапазоне можно оценить коэффициент полезного действия ЭМА по формуле

$$\eta = Q_{loss} / (Q_{\Sigma} + Q_{loss}), \quad (1)$$

где  $Q_{\Sigma}$  - добротность излучения и  $Q_{loss}$  - добротность потерь ЭМА.

В этом случае добротность потерь можно найти методом Уиллера, описанным в [9], а добротность излучения  $Q_{\Sigma}$  – путем представления ЭМА в виде последовательного колебательного LC-контура с определенными волновым и резонансным сопротивлениями. В результате получаем выражение

$$Q_{\Sigma} = \frac{f_0}{2\Delta f} \cdot \frac{(K_c - 1) \sqrt{K_c}}{K_c}, \quad (2)$$

где  $2\Delta f / f_0$  – относительная полоса пропускания частот ЭМА при определенном значении  $K_c$ .

На представленном ниже графике (рис.3) приведены результаты расчетов по формулам (1) и (2) КПД симметричных прямолинейных ЭМА в диапазоне электрических размеров при значениях  $ka$  от 1,57 – (обычный прямолинейный полуволновый вибратор) до  $ka = 0,1$  – очень короткая ЭМА. При этом рассматривались три значения добротности потерь в ЭМА

в том числе и в реактивных нагрузках  $Q_{loss} = 130, 300$  и  $1000$ .

Как следует из графиков при различных значениях ЭМА ее КПД растет с увеличением  $Q_{loss}$ . При значительном уменьшении электрического размера ЭМА до  $ka = 0,1$  КПД ЭМА снижается, приблизительно, от 50 до 12,6% в зависимости от степени активных потерь ( $Q_{loss}$ ). При этом КПД обычного полуволнового вибратора, даже при малых значениях  $Q_{loss}$  не снижается менее, чем до 90%. Очевидно, что КПД П-образных ЭМА при тех же значениях  $d/\lambda$  и  $Q_{loss}$  будут ниже соответствующих значений, приведенных на графиках (рис.3) в зависимости от электрической длины ЭМА и соотношения размеров  $h/l$  (рис.1).

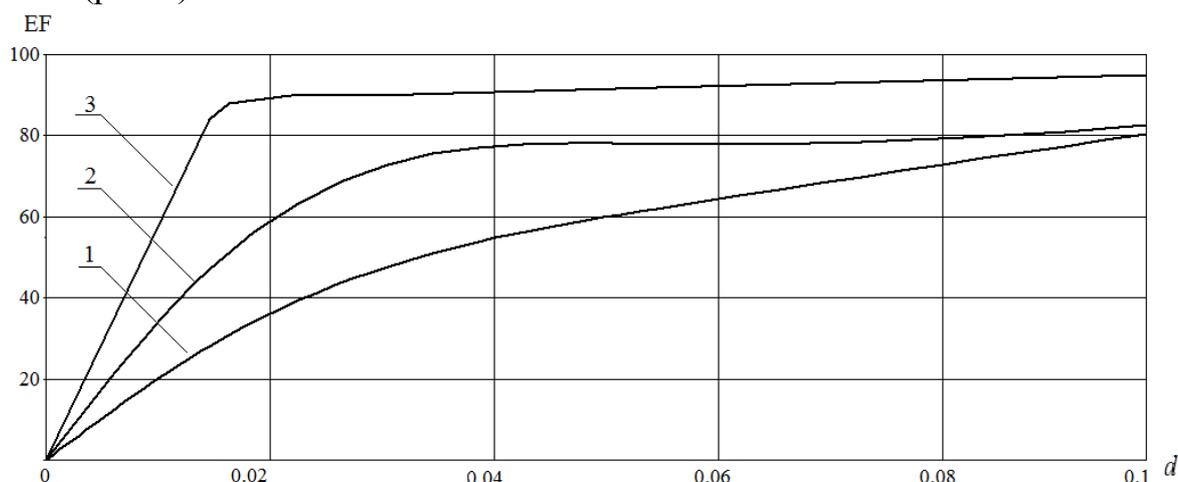


Рис.3 Расчетные графики зависимости КПД симметричных прямолинейных ЭМА от их электрических размеров: 1 – добротность потерь  $Q_{loss} = 130$ ; 2 – 300; 3 – 1000

Рассмотренные методы улучшения КСВН и КПД ЭМА различной конфигурации, в том числе и в микрополосковом исполнении могут найти применение при проектировании и разработке подобных антенн.

#### Статистический анализ КСВН ЭМА с индуктивными согласующими нагрузками в излучающих ветвях

Отметим, что уменьшение размеров антенны сопровождается резким повышением чувствительности ее параметров (входных сопротивлений,  $K_c$ , КПД и др.) к случайным погрешностям выполнения реактивных нагрузок и точности координат их включения в излучающий провод ЭМА. Сказанное относится к различным типам проволочных антенн как к разомкнутым (штыревым прямолинейным, П-образным, V-образным), так и к замкнутым, например, шлейф-вибраторным, ромбическим, рамочным и др., включая подобные антенны в микрополосковом исполнении.

На рис. 4 приведены расчетные графики зависимости относительного среднеквадратичного отклонения (СКО) КСВН в питающем фидере укороченных вдвое П - образных симметричных ЭМА от относительного СКО координаты включения ИН.

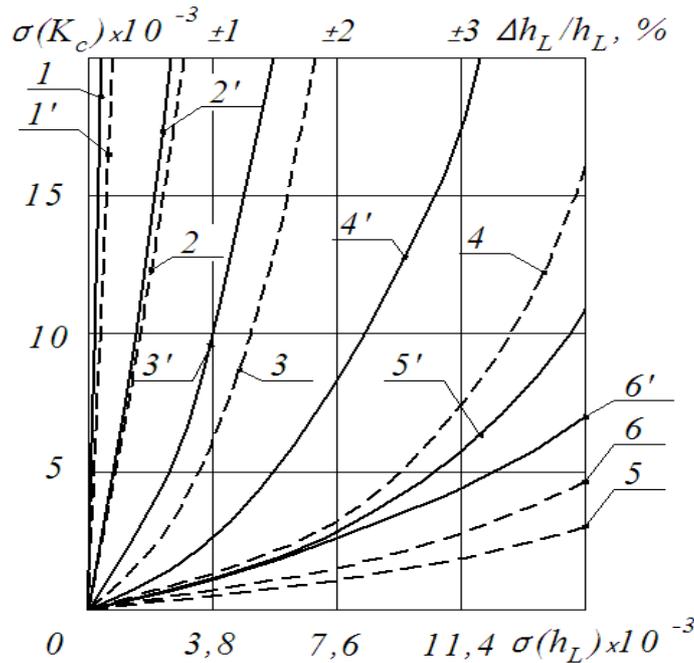


Рис. 4 Графики зависимости СКО  $K_c$  на входе укороченных вдвое П-образных ЭМА от СКО координаты включения ИН при различных электрических длинах антенны ( $d$ ): 1,1' -  $d=0,016\lambda$ ; 2,2' -  $0,025\lambda$ ; 3,3' -  $0,06\lambda$ ; 4,4' -  $0,12\lambda$ ; 5,5' -  $0,16\lambda$ ; 6,6' -  $0,18\lambda$ ; сплошные линии – отклонения в направлении концов антенны; пунктирные линии – отклонения в направлении точек возбуждения антенны

Как видно из рис. 4, малым значениям СКО  $h_L$  соответствуют значительные значения СКО  $K_c$  на входе ЭМА, что рекомендуется учитывать при проектировании и разработке подобных антенн, в том числе в микрополосковом исполнении.

Процедуру статистической оценки можно применять и при определении чувствительности  $K_c$  по другому параметру ЭМА, например, по флуктуации значений включаемых ИН.

### Заключение

Изложены результаты исследования методов улучшения КСВН и КПД ЭМА, величина которых значительно меньше резонансных. В микроволновом диапазоне включение ИН в излучающий провод ЭМА в оптимальных точках позволяет обеспечить резкое увеличением действующего значения переменного тока на ЭМА и существенное снижение  $K_c$ . Например, при электрической длине плеча П-образной ЭМА  $d/\lambda = 0,12$ , укороченной вдвое относительно резонансной длины,  $K_c$  на входе ЭМА снижается приблизительно на 3 порядка. При тех же условиях наблюдается значительный необыкновенный рост мощности на входных разъемах ЭМА (приблизительно на 2 порядка) по сравнению с мощностью в таком же излучателе без ИН, при неизменном напряжении на входных клеммах ЭМА.

Выполнена статистическая оценка чувствительности характеристик ЭМА к флуктуациям параметров конструкции ЭМА, что позволяет определять требования к допускам на изготовление ЭМА и ее элементов.

Приведенный в статье подход может найти применение при решении задач обеспечения надежной радиосвязи, как с космическими аппаратами, так и с другими подвижными объектами, например, в авиационной промышленности, спутниковой и наземной мобильной радиосвязи.

Отметим, что исследование влияния случайностей в ЭМА на их характеристики представляет собой один из аспектов статистической теории антенн (СТА), созданной и развитой Я.С. Шифриным [10, 11]. Специфика этого аспекта СТА состоит в том, что здесь рассматривается влияние случайных изменений в конструкции антенны на внутренние входные характеристики ЭМА, в отличие от большинства работ Я.С. Шифрина по СТА, в которых анализируется влияние случайностей на характеристики излучения крупных и сложных антенн, например зеркальных и фазированных антенных решеток.

#### Литература

1. King R.W.P. Theory of Linear Antennas. / R.W.P. King. – Cambridge: Mass. Harvard University Press, 1956. – 927 p.
2. Hansen R.C. Efficiency and Matching Tradeoffs for Inductively Loaded Short Antennas / R.C. Hansen. – IEEE Trans., 1975, V. Com-23, N 4, P. 430-435.
3. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
4. Сазонов Д.М., Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. Учебн. пособие для радиотехн. специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1988 – 432 с.
5. Овсяников В. В. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками./ В.В. Овсяников. М.: Радио и связь, 1985 – 120 с.
6. Овсяников В. В. Анализ и оптимизация антенных устройств из электрически коротких штыревых вибраторов с индуктивными нагрузками // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 2002. Т. 45. № 1. С. 56–63.
7. Овсяников В. В. О новой малогабаритной петлевой антенне // Вісник Дніпропетровського університету. Сер. Фізика. Радиоелектроніка. Вип.5, 1999. С. 149–154.
8. Овсяников В. В. Анализ и оптимизация антенных устройств из электрически коротких штыревых вибраторов с индуктивными нагрузками // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 2010. Т. 53. № 3. С. 13–25.
9. Newman E.H., Bohley P., Walter C. H. Two Methods for the Measurement of Antenna Efficiency / E.H Newman., P.Bohley, C. H. Walter. – IEEE Trans., 1975, V. AP-23, N 4, P. 457-461.
10. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Сов. радио. 1970. (Пер. на англ.: Shifrin Y. S. Statistical Antenna Theory. Golem Press, USA. 1971.), 383 p.
11. Шифрин Я. С. Статистическая теория антенн: Справочник по антенной технике. Т.1. М.: Радиотехника. 1997. С. 148–205.

*Овсяников В. В., Загородня Л. С. Поліпшення внутрішніх параметрів електрично малих дровових антен. Представлені результати дослідження шляхів у мікрохвильовому діапазоні поліпшення КСХН і ККД електрично малих антен з розмірами значно меншими резонансних з узгоджувальними індуктивними навантаженнями, включеними*

безпосередньо в випромінюючий провід антени. Відзначено, наприклад, що при розмірах  $\Pi$ -подібної антени, укороченої вдвічі щодо резонансної довжини, включення індуктивних навантажень в середині випромінювальних гілок дає можливість знизити КСХН приблизно на 3 порядки. За цих же умов спостерігається незвичайно значне зростання потужності на входних роз'ємах електрично малої антени (приблизно на 2 порядки) в порівнянні з потужністю в такому ж випромінювачі без індуктивних навантажень, при незмінній напрузі на входних клеммах антени. Це явище призводить до значного збільшення ефективності випромінювання (прийому) антени. Виконано оцінку ККД електрично малих антен в залежності від їх електричної довжини і джоулевих втрат в елементах антени. Представлена оцінка залежності середньоквадратичного відхилення КСХН в живильному фідері укорочених  $\Pi$ -образних симетричних антен від СКО координат включення індуктивних узгоджувальних навантажень. Наголошується, що подібні методи аналізу та покращення внутрішніх електричних параметрів електрично малих антен можна застосовувати до дрютяних антен різної конфігурації, включаючи антени в мікросмуговому виконанні.

**Ключові слова:** електрично мала антена, індуктивні узгоджувачі навантаження, коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі (КСХН), ефективність антени (ККД), середньоквадратичне відхилення (СКО).

Овсяников В. В., Загородняя Л. С. **Улучшение внутренних параметров электрически малых проволочных антенн.** Представлены результаты исследования в микроволновом диапазоне путей улучшения КСВН и КПД электрически малых антенн с размерами значительно меньшими резонансных с согласующими индуктивными нагрузками, включенными непосредственно в излучающий провод антенны. Отмечено, например, что при размерах  $\Pi$ -образной антенны, укороченной вдвое относительно резонансной длины, включение индуктивных нагрузок в серединах излучающих ветвей дает возможность понизить КСВН приблизительно на 3 порядка. При этих же условиях наблюдается значительный необыкновенный рост мощности на входных разъемах электрически малой антенны (приблизительно на 2 порядка) по сравнению с мощностью в таком же излучателе без индуктивных нагрузок, при неизменном напряжении на входных клеммах антенны. Это явление приводит к значительному увеличению эффективности излучения (приема) антенны. Выполнена оценка КПД электрически малых антенн в зависимости от их электрической длины и джоулевых потерь в элементах антенны. Представлена оценка зависимости среднеквадратичного отклонения КСВН в питающем фидере укороченных  $\Pi$ -образных симметричных антенн от СКО координат включения индуктивных согласующих нагрузок. Отмечается, что подобные методы анализа и улучшения внутренних электрических параметров электрически малых антенн можно применять к проволочным антеннам различной конфигурации, включая антенны в микрополосковом исполнении.

**Ключевые слова:** электрически малая антенна, индуктивные согласующие нагрузки, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), эффективность антенны (КПД), среднеквадратичное отклонение (СКО).

Ovsianikov V.V, Zagorodnya L.S. **Improvement of epy incide parameters of electrically small wire antennas.** The results of studying ways to improve the VSWR and efficiency of electrically small antennas with dimensions much less resonance with matching inductive loads that are included directly in the radiating antenna wire schy. Noted, for example, that the size of the  $\Pi$ -shaped antenna, shortened by half relative to the resonant length, the inclusion of inductive loads at the centers of radiating branches makes it possible to lower the

*VSWR of approximately 3 orders of magnitude. Under these conditions there is a significant unusual increase in power input connectors for electrically small antenna (about 2 orders of magnitude) compared to the power in the same oscillator with no inductive loads, un an alternating voltage across the input terminals of the antenna. This phenomenon leads to greatly increase the effectiveness of radiation (reception) antenna. The estimation of efficiency of electrically small antennas, depending on their electrical length and Joule losses of new elements in the antenna. Depending on the estimation of the standard deviation VSWR in the supply feeder truncated  $\Pi$  - shaped antennas on the SD coordinates include matching inductive load. It is noted that similar methods of analysis and improvement of the incide electrical properties of electrically small antennas can be applied to wire antennas of various configurations, including a microstrip antenna design.*

**Key words:** *electrically small antenna, matching inductive load, voltage standing wave ratio (VSWR), the antenna performance (efficiency), the standard deviation (SD).*