

**В. С. Жилков, канд. техн. наук****СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ  
ПОНДЕРОМОТОРНЫХ СВЧ-ВАТТМЕТРОВ**

Синтезу и анализу пондеромоторных СВЧ-ваттметров посвящено значительное количество работ [1—5, 7—14]. Не вдаваясь в их детальный разбор, отметим лишь то общее, что имеется в подходе к этому вопросу. В частности, при анализе характеристик пондеромоторного ваттметра (исследовании зависимости входного коэффициента отражения и чувствительности прибора от частоты, погрешности рассогласования от модуля и фазы коэффициента отражения нагрузки в диапазоне частот и т. д.) ваттметр представляется в виде симметричного четырехполюсника без потерь [2—5], параметры которого и электрическая длина соединительных линий определяют характер указанных зависимостей.

Таким образом, полученные результаты базируются на общих представлениях теории линейных электрических цепей со всеми вытекающими, в особенности при анализе, ограничениями.

Последние исследования по синтезу и анализу многоэлементных пондеромоторных датчиков [7—14] существенно расширили наши представления о них: показана возможность не только исследовать тонкие эффекты, имеющие место в процессе взаимодействия электромагнитного поля с пробным телом, но и синтезировать устройства с требуемыми или заранее заданными характеристиками.

**Синтез.** Пондеромоторные датчики, используемые в одноименных ваттметрах, характеризуются квадратичной зависимостью измеряемой величины (сила, момент и т. д.) от напряженности электрического или магнитного поля, поэтому одно-, двух- и более элементарные схемы с эквидистантным включением датчиков не являются оптимальными: погрешность рассогласования и входной КСВН существенно зависят от частоты. Кроме того, чувствительность прибора имеет также частотную зависимость [1, 2, 5].

В работах [14 ÷ 16] с целью расширения полосы частот многоэлементных СВЧ измерительных устройств предлагается использовать принцип неэквидистантной решетки, нашедшей применение в антенной технике. При этом следует отметить, что рассмотренная в статье [15] методика синтеза многоэлементного датчика СВЧ-мощности является в настоящее время наиболее общей и эффективной: практически все задачи, имеющие отношение к синтезу пондеромоторных СВЧ-ваттметров, являются частным случаем решения, приведенного в [15].

Рассмотрим многоэлементный пондеромоторный датчик измерителя мощности,  $k$ -й элемент которого испытывает действие вращающего момента  $M_{T_k}$

$$M_{T_k} = M_T(x_k, y_k) [1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(\psi + 2\beta l_k)], \quad (1)$$

где  $x_k, y_k, z_k$  — координаты  $k$ -го элемента;

$\Gamma = |\Gamma|e^{i\varphi}$  — коэффициент отражения нагрузки, расположенной в точке  $z = 0$ ;

$\psi = \varphi - 2\beta z$  — фаза коэффициента отражения в точке  $z$ ;

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$  — постоянная распространения в тракте;

$l_k = z_1 - z_k$  — расстояние от первого элемента до  $k$ -го.

При идентичных чувствительных элементах и идентичном их расположении в поперечном сечении волновода (предполагается отсутствие взаимного влияния) для системы из  $N$  элементов можно записать

$$M_T^{\Sigma} = M_T(x, y) [N + N|\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \sum_{k=1}^N \cos(\psi + 2\beta l_k)]. \quad (2)$$

Здесь  $M_T^{\Sigma}$  — суммарный вращающий момент, действующий на подвесную систему ваттметра.

Таким образом, полный момент зависит от модуля и фазы коэффициента отражения и величины  $M_T(x, y)$ .

Существенного ослабления зависимости  $M_T^{\Sigma}$  от  $\beta l_k$ , как следует из (2), можно добиться, минимизировав коэффициент

$$D = \sum_{k=1}^N \cos(\psi + 2\beta l_k). \quad (3)$$

С этой целью выбираем расположение чувствительных элементов аналогично [14]. Тогда при  $2^{n-1} < k \leq 2^n$  ( $n = 1, 2, \dots, m$ ) имеем рекуррентное соотношение  $l_1 = 0$ ;  $l_k = L_n + l_{k-2^{n-1}}$ .

Учитывая, что общее число элементов в системе  $N = 2^m$ , и произведя ряд преобразований, получаем

$$D = 2^m \cos(\psi + \beta L_{\text{общ}}) \prod_{n=1}^m \cos(\beta L_n) \quad (4)$$

или  $D = NS$ ;  $\sum_{n=1}^m L_n = L_{\text{общ}}$  — общая длина системы.

Таким образом,

$$M_T^{\Sigma} = NM_T C, \quad \text{где } C = 1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma S|. \quad (5)$$

Очевидно, что минимизация величины  $S$ , представляющей собой произведение двух сомножителей, может быть достигнута при минимизации сомножителя  $\prod_{n=1}^m \cos(\beta L_n)$ . Для этого достаточно последний аппроксимировать разложением на сомножители полиномом Чебышева и выбрать соответствующим образом  $L_n$ . Собственный КСВН системы элементов минимизируется одновременно с  $S$ .

Эффективность предлагаемой методики синтеза многоэлементного пондеромоторного датчика достаточно убедительно продемонстрирована в работах [15, 16]. В частности, синтезированный и исследованный пондеромоторный датчик, выполненный в виде неэквидистантной одномерной решетки из восьми элементов, характеризовался следующими параметрами в диапазоне частот 8,2—12,5 Гц, волновод с размерами сечения  $23 \times 10$  мм, входной КСВН  $\sim 1,08$ . Максимальное значение погрешности рассогласования  $[\cos(\chi + \beta L_{\text{общ}}) = 1]$  не более, чем у двухэлементного пондеромоторного ваттметра с расстоянием между пластинами  $l = \lambda_{\text{в}}/4$ . Чувствительность датчика в крайних точках диапазона изменяется не более чем на 10—15% относительно средней частоты.

Удовлетворительные результаты были также получены при разработке широкополосного пондеромоторного измерителя мощности и широкополосного рабочего ваттметра с чувствительными элементами-термопарами, распределение которых вдоль волновода также соответствует неэквидистантному [16]. Расчеты показывают, что можно синтезировать многоэлементный датчик мощности с любого типа квадратичными преобразователями, способный удовлетворительно работать в диапазоне частот, охватывающем частотные диапазоны трех-пяти волноводных каналов. Безусловно, указанное свойство неэквидистантных датчиков является уникальным.

Нетрудно показать, что большинство датчиков СВЧ-измерителей мощности, использующих принцип суммирования сигналов после преобразования, могут быть легко синтезированы на основе описанного нами подхода.

**Анализ.** Анализ характеристик пондеромоторных ваттметров в общем случае сводится к исследованиям (теоретическим или экспериментальным) поведения чувствительной системы прибора при действии на нее возмущений (изменение частоты сигнала, наличие отраженных волн, деформация чувствительной системы и т. д.).

В первую очередь интерес представляют теоретические исследования, позволяющие более полно и быстро изучать характеристики системы. Ранее для этих целей в основном использовались методы линейной теории СВЧ-цепей [2—5], характеризующиеся весьма малой информативностью. Поэтому теоретические исследования целого ряда важных зависимостей отсутствовали.

На наш взгляд, наиболее эффективным является электродинамический метод анализа, исходной предпосылкой которого служит работа Н. А. Хижняка [6], где предложен интегральный метод расчета внутреннего поля тел размерами меньше рассеиваемой длины волны ( $a < \lambda$ ). В этой работе падающее и внутреннее поля разложены в ряд по степеням малого параметра  $a/\lambda$  и показано, что для такого разложения определение

внутреннего поля с точностью до  $(a/\lambda)^n$  сводится к последовательному решению  $(n + 1)$  электростатических задач. Фактически нулевое приближение этого решения было использовано в работах [3, 17].

Весьма подробно характеристики чувствительных систем пондеромоторных ваттметров исследованы в работах [7—13]. В частности, получены выражения для расчета момента сил, действующего на эллипсоид вращения в прямоугольном волноводе. Представляющая наибольший интерес  $x$ -компонента момента для диэлектрического эллипсоида в нулевом приближении может быть определена из формулы [7, 11]

$$M_x = \frac{vP \sin 2\theta}{chd \sqrt{1 - (\lambda_0/2d)^2}} [(1/\epsilon_1 - J_0^{200})^{-1} - (1/\epsilon_1 - J_0^{002})^{-1}], \quad (6)$$

где  $M_x$  — момент сил, обусловленный электрическим полем;

$P$  — передаваемая по волноводу мощность;

$v$  — объем эллипсоида;

$h, d$  — высота и ширина волновода;

$c$  — скорость света;

$\epsilon_1$  — диэлектрическая проницаемость материала эллипсоида;

$\lambda_0$  — длина волны в свободном пространстве;

$J_0^{200}, J_0^{002}$  — Ньютоновские потенциалы [7], являющиеся функциями полуосей эллипсоида;

$\theta$  — угол между осью  $z$  волновода и осью эллипсоида.

Если эллипсоид изготовлен из идеально проводящего металла, то, положив  $\epsilon_1 = \infty$ , получим

$$M_x = \frac{vP \sin 2\theta}{chd \sqrt{1 - (\lambda_0/2d)^2}} [(J_0^{002})^{-1} - (J_0^{200})^{-1}]. \quad (7)$$

Для бесконечно тонкой круглой металлической пластинки

$$M_x = \frac{16 a^3 P}{3 chd} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2d)^2}} \quad (8)$$

( $a$  — радиус диска).

Соотношения (6) — (8) в весьма полном виде математически описывают физическую картину, имеющую место при взаимодействии электрической составляющей электромагнитного поля с эллипсоидом вращения. В работе [7] получены также в нулевом приближении, формулы для расчета момента сил, обусловленных действием магнитной компоненты поля на эллипсоид.

В тех случаях, когда  $a \sim \lambda$  ( $a \leq 0,3\lambda$ ), расчет момента сил по формулам (6) — (8) дает завышенный результат. Его коррекция может быть выполнена путем учета второго приближения по  $(a/\lambda)$ , при этом

$$M_x = M_x^{(0)} + k^2 M_x^{(2)} \quad (9)$$

Здесь  $k = \omega/c$  — волновое число;

$\omega$  — частота;

$M_x^{(2)}$  — момент сил, соответствующий разложению по  $(a/\lambda)^2$ .

Так как выражение для  $M_x^{(2)}$  весьма громоздко, для практических целей рекомендуется использовать графики, приведенные в работах [7, 11]. Необходимо отметить, что формулы (6) — (9) могут быть использованы для анализа и многоэлементных пндеромоторных датчиков, если не ставится задача учета взаимного влияния между элементами. В противном случае их применение оказывается малоэффективным.

Учет взаимного влияния между элементами в настоящее время произведен только при вычислении момента сил, действующего на систему двух жестко связанных тел [13]. При расстоянии  $l$  между телами, большем длины волны ( $l/\lambda > 1$ ),  $x$  — компонента вращающего момента для диэлектрических эллипсоидов может быть вычислена, согласно формуле

$$M_x = P \sin 2\theta (1/B - 1/A) \left\{ \frac{(\epsilon_1 - 1)kv}{cS\beta_{10}} - \frac{(\epsilon_1 - 1)^2 k^3 v^2 l}{cS^2 \beta_{10} \cdot A} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{\sin^2 \psi}{A} + \frac{\cos^2 \psi}{B} \right) [1 - \cos(\beta_{10} l \cos \psi)] \right\}, \quad (10)$$

где  $\psi$  — угол между осью  $y$  волновода и коромыслом, связывающим эллипсоиды;  $S = dh$

$l$  — длина коромысла;  $A = 1 - (\epsilon_1 - 1) J_0^{200}$ ;  $B = 1 - (\epsilon_1 - 1) J_0^{002}$ . Полагая в формуле (10)  $\epsilon_1 = \infty$ , нетрудно получить выражение для расчета момента сил, действующего на систему двух жестко связанных металлических эллипсоидов, а при равенстве полуосей эллипсоида формула (10) трансформируется в выражение для расчета момента сил, действующего на систему двух жестко связанных диэлектрических шариков, при  $\epsilon_1 = \infty$  — металлических. Подробно эти случаи разобраны в работах [8, 13].

Если расстояние между диэлектрическими эллипсоидами (длина коромысла) меньше длины волны,  $x$ -компонента момента сил рассчитывается по формулам  $M_x = M_{x_1} + M_{x_2}$ ;  $M_{x_1}$  — момент, действующий на первый эллипсоид,  $M_{x_2}$  — на второй и

$$M_{x_1} = \frac{4(\epsilon_1 - 1)kvP}{cS\beta_{10}} \left\{ (1/B - 1/A) \cos(\theta - \varphi) \sin(\theta - \varphi) + \right. \\ \left. + \frac{3(\epsilon_1 - 1)vl^{-3}}{4\pi} \left( \frac{\cos^2 \varphi - 1}{B^2} - \frac{\sin^2 \varphi - 1}{A^2} \right) \cos(\theta - \varphi) \sin(\theta - \varphi) + \right. \\ \left. + \frac{3(\epsilon_1 - 1)vl^3}{4\pi AB} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cos 2(\theta - \varphi); \right. \quad (11)$$

$$M_{x_2} = \frac{3(\epsilon_1 - 1)^2 v^2 k^3 \beta_{10} P}{4\pi c S} \sin^2 \theta \left\{ \sin^2(\theta - \varphi) \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{\cos^2 \varphi - 1}{B^2} - \frac{\sin^2 \varphi - 1}{A^2} \right) + \frac{\sin^2 \varphi \cdot \cos 2(\theta - \varphi)}{AB} \right\}. \quad (12)$$

Здесь  $\Theta$  — угол между большой полуосью эллипсоида и осью  $z$  волновода,  $\varphi$  — между коромыслом и той же осью эллипсоида.

Для случая  $l/\lambda < 1$  в работах [8, 12] рассмотрены аналогичные предельные переходы, позволяющие рассчитывать момент силы для двух жестко связанных эллипсоидов, шаров и дисков металла с  $\varepsilon \rightarrow \infty$  и диэлектрика с  $\text{tg}\delta = 0$ .

Соотношения (10) — (12) использовались в [10, 16] для анализа характеристик двухэлементных пондеромоторных датчиков, сравнительно широко применяющихся на практике. Кроме того, на их основе строится методика исследования характеристик многоэлементной чувствительной системы с неэквидистантным распределением датчиков.

Следует отметить, что круг задач, стоящих перед исследователем пондеромоторных эффектов и инженером, разрабатывающим пондеромоторные СВЧ-ваттметры, достаточно большой, и данная работа не решает полностью всей проблемы.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность проф. Н. А. Хижняку за большую помощь в выполнении исследований, проф. Р. А. Валитову, сделавшему ряд ценных замечаний при обсуждении программы исследований, а также А. И. Сиротникову за помощь в выполнении ряда расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Валитов Р. А. Пондеромоторные силы электромагнитных волн и их применение для радиоизмерений в диапазоне сверхвысоких частот. Тр. ХВКИУ, т. II, вып. 3. Харьков, 1957, с. 182.
2. Кукуш В. Д. К устранению погрешности, связанной с рассогласованием пондеромоторных измерителей мощности.— Тр. радиофиз. ф-та ХГУ, 1957, т. 2, с. 74—77.
3. Кукуш В. Д. К вопросу создания коаксиального пондеромоторного измерителя мощности.— Тр. радиофиз. ф-та ХГУ, т. 3, 1959 с. 74—88.
4. Орлов В. Г., Кукуш В. Д. О пондеромоторных силах, действующих на тело в волноводе.— Тр. радиофиз. ф-та ХГУ, т. 7, 1962, с. 112—121.
5. Жилков В. С., Кукуш В. Д. Расчет погрешности рассогласования пондеромоторного измерителя мощности.— Сб. «Радиотехника». Вып. 9. Харьков, 1969, с. 169—172.
6. Хижняк Н. А. Рассеяние электромагнитных волн на малых телах в прямоугольном волноводе.— Сб. «Радиотехника». Вып. 4. Харьков, 1967, с. 88—97.
7. Хижняк Н. А. и др. Расчет пондеромоторных сил. Отчет по теме № 594, ХГУ, 1971. 62 с.
8. Хижняк Н. А. и др. Расчет момента сил. Отчет по теме 12/8, ХГУ, 1972. 74 с.
9. Жилков В. С., Сиротников А. И., Хижняк Н. А. О погрешности однопластинчатого пондеромоторного ваттметра, обусловленной высшими типами волн. Сб. «Радиотехника». Вып. 21. Харьков, 1972, с. 165—169.
10. Жилков В. С., Сиротников А. И. О погрешности двухпластинчатого пондеромоторного ваттметра, обусловленной высшими типами волн.— Сб. «Радиотехника». Вып. 22. Харьков, 1972, с. 100—103.

11. Момент пондеромоторных сил, действующих на тело правильной формы в прямоугольном волноводе.— Сб. «Радиотехника». Вып. 25. Харьков, 1973, с. 23—31. Авт.: Н. А. Хижняк, Г. П. Щербинин, Л. К. Гал. и др.
12. Момент пондеромоторных сил, действующих на систему двух жестко связанных тел правильной формы в прямоугольном волноводе. Ч. I.— Сб. «Радиотехника». Вып. 26. Харьков, 1973, с. 105—111. Авт.: Н. А. Хижняк, Л. К. Гал, В. С. Жилков и др.
13. Момент пондеромоторных сил, действующих на систему жестко связанных тел правильной формы в прямоугольном волноводе. Ч. II.— Сб. «Радиотехника». Вып. 26. Харьков, 1973, с. 112—117. Авт.: Н. А. Хижняк, Л. К. Гал, В. С. Жилков и др.
14. Механиков А. И. Синтез неэквидистантных СВЧ-устройств.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. РТ», вып. I, 1971, с. 24—29.
15. Сиротников А. И., Жилков В. С. Об одном методе синтеза многоэлементных датчиков СВЧ-мощности.— Сб. «Радиотехника». Вып. 24. Харьков, 1973, с. 77—80.
16. Жилков В. С. Разработка образцового ваттметра проходящей мощности. Отчет по теме 72 — 2, ХИРЭ, 1973. 49 с.
17. Валитов Р. А., Жилков В. С., Украинец Н. И. Пондеромоторное действие электромагнитного поля на металлический диск в прямоугольном волноводе. Сб. «Радиотехника». Вып. 17. Харьков, 1970, с. 80—85.