УДК 621.37.029.6

К.И. Кисиленко, А.С. Раевский, С.Б. Раевский

О ВЗАИМНЫХ ПОТОКАХ МОЩНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ВОЛН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Расчеты взаимных потоков мощности комплексных волн в направляющих электродинамических структурах.
Методология/подход: Используемая методология основана на теории несамосопряженных электродинамических операторов.
Выводы: Результаты расчетов могут быть использованы при проектировании фильтров на основе комплексного резонанса.
Ограничения исследования/развитие исследований: Настоящие результаты обеспечивают отправную точку для дальнейшего исследования свойств комплексных волн в направляющих электродинамических структурах.
Оригинальность/значение: Исследуются комплексные волны в волноводных электродинамических структурах. Показывается, что собственные комплексные волны, не переносящие в среднем за период мощности, могут иметь взаимные потоки мощности, отличные от нуля.

Ключевые слова: комплексные волны, взаимные потоки мощности, дисперсионное уравнение, комплексный резонанс.

Существование в неоднородных по поперечному сечению направляющих электродинамических структурах комплексных волн (КВ) [1-9] объясняется [10] распределенным разворотом мощности, приводящим к образованию встречных (в пределах поперечного сечения структуры) потоков энергии. В результате поток мощности каждой собственной КВ, средний за период, оказывается равным нулю. Как отмечалось в [11], указанные встречные потоки мощности своим существованием обязаны взаимодействию парциальных волн, на которые можно разложить поля любых волн направляющих структур [12].

Известно [13], что взаимодействие запредельных (реактивно затухающих) нормальных волн, не переносящих активной мощности, возникающих на любых нерегулярностях направляющей структуры, приводит к образованию отличного от нуля потока мощности, среднего за период. На этом явлении основывается принцип действия предельных аттенюаторов. Аналогичное явление обнаруживается и при совместном возбуждении КВ. Если каждая собственная КВ неоднородной направляющей структуры в результате равенства (в пределах поперечного сечения) встречных потоков мощности не переносит в среднем за период энергии, то их взаимный поток мощности может быть отличен от нуля. Покажем это.

Рассмотрим взаимодействие двух КВ со встречно убывающими полями, решение дисперсионного уравнения для которых изображается одной точкой на комплексной плоскости поперечного волнового числа. Как показано в [10, 12], источники, описываемые действительной функцией координат, возбуждают пары КВ с комплексно-сопряженными амплитудами и волновыми числами. Такие пары волн образуют поле стоячей волны, локализованное вблизи источника, то есть экспоненциально убывающие при удалении от него. В этом случае взаимодействие двух собственных КВ не приводит к возникновению ненулевого потока мощности. Возникновение экспоненциально убывающего от источника поля стоячей волны приводит к явлению, называемому комплексным резонансом [6]. Поскольку последний существует при обязательном присутствии [12] источника, колебание, соответствующее ему, следует [14] классифицировать как колебание, «присоединенное» к источнику.

Волны могут принадлежать любой неоднородной направляющей структуре, например, круглому двухслойному экранированному волноводу.

Продольная зависимость полей двух указанных волн имеет вид

$$e^{\pm i(\beta_1+i\beta_2)z}, \tag{1}$$

где (-) соответствует прямой комплексной волне; (+) – обратной; $\beta_1>0$; $\beta_2<0$.

На комплексных плоскостях поперечных волновых чисел ($\alpha_{1,2}$) внутренней и внешней областей направляющей двухслойной структуры волнам (1) соответствуют одни и те же точки, являющиеся изображениями решений дисперсионного уравнения.

Описывая поля комплексных продольными компонентами векторов Герца,

$$\Pi_{z_{1,2}}^{e,m} = \Psi_{1,2}^{e,m}(r,\varphi)e^{\pm i\beta z},$$

где $\beta=\beta_1+i\beta_2$; r и φ – цилиндрические координаты, индексы 1 и 2 соответствуют внутренней и внешней областям направляющей структуры. Для продольных компонент комплексных векторов Умова-Пойнтинга может иметь вид

$$S_{z_{1,2}} = \frac{|\beta|^2}{r}\left(\frac{\partial\Psi^e}{\partial r}\frac{\partial\Psi^{m^*}}{\partial\varphi} - \frac{\partial\Psi^e}{\partial\varphi}\frac{\partial\Psi^{m^*}}{\partial r}\right) + \frac{\varepsilon\mu\omega^2}{r}\left(\frac{\partial\Psi^m}{\partial\varphi}\frac{\partial\Psi^{e^*}}{\partial r} - \frac{\partial\Psi^m}{\partial r}\frac{\partial\Psi^{e^*}}{\partial\varphi}\right) \pm \quad (2)$$
$$\pm\omega\varepsilon\beta\left(\left|\frac{\partial\Psi^e}{\partial r}\right|^2 + \frac{1}{r^2}\left|\frac{\partial\Psi^e}{\partial\varphi}\right|^2\right) \pm \omega\varepsilon\beta^*\left(\left|\frac{\partial\Psi^m}{\partial r}\right|^2 + \frac{1}{r^2}\left|\frac{\partial\Psi^m}{\partial\varphi}\right|^2\right),$$

где индекс 1 и знак (+) соответствуют прямой (первой) комплексной волне, индекс 2 и знак (-) – обратной (второй).

Поскольку для двух рассматриваемых волн имеет место равенство

$$\frac{\partial\Psi^{e,m(2)}}{\partial\varphi} = \frac{\partial\Psi^{e,m(1)}}{\partial\varphi},$$

их продольные компоненты векторов Умова-Пойнтинга, согласно (2), равны по величине и противоположны по знаку.

Продольная компонента взаимного комплексного вектора Умова-Пойнтинга записывается в виде

$$S_{z_{1,2}} = \left\{\frac{|\beta|^2}{r}\left(\frac{\partial\Psi^e}{\partial r}\frac{\partial\Psi^{m^*}}{\partial\varphi} - \frac{\partial\Psi^e}{\partial\varphi}\frac{\partial\Psi^{m^*}}{\partial r}\right) + \frac{\varepsilon\mu\omega^2}{r}\left(\frac{\partial\Psi^m}{\partial\varphi}\frac{\partial\Psi^{e^*}}{\partial r} - \frac{\partial\Psi^m}{\partial r}\frac{\partial\Psi^{e^*}}{\partial\varphi}\right) \pm \right. \quad (3)$$
$$\left. \pm\,\omega\varepsilon\beta\left(\left|\frac{\partial\Psi^e}{\partial r}\right|^2 + \frac{1}{r^2}\left|\frac{\partial\Psi^e}{\partial\varphi}\right|^2\right) \pm \omega\varepsilon\beta^*\left(\left|\frac{\partial\Psi^m}{\partial r}\right|^2 + \frac{1}{r^2}\left|\frac{\partial\Psi^m}{\partial\varphi}\right|^2\right)\right\}e^{-2i\beta z}.$$

Введем обозначения:

$$\frac{\partial\Psi^e}{\partial r}\frac{\partial\Psi^{m^*}}{\partial\varphi} - \frac{\partial\Psi^e}{\partial\varphi}\frac{\partial\Psi^{m^*}}{\partial r} = a + ib;$$
$$\omega\int_S \varepsilon\left(\left|\frac{\partial\Psi^e}{\partial r}\right|^2 + \frac{1}{r^2}\left|\frac{\partial\Psi^e}{\partial\varphi}\right|^2\right)dS = x;$$
$$\omega\int_S \mu\left(\left|\frac{\partial\Psi^m}{\partial r}\right|^2 + \frac{1}{r^2}\left|\frac{\partial\Psi^m}{\partial\varphi}\right|^2\right)dS = y,$$

где S – площадь поперечного сечения направляющей структуры. В предположении равенства нулю собственных и взаимного потоков мощности в среднем за период из (2) и (3) получаем две системы линейных алгебраических уравнений относительно x и y:

$$x \pm y = -\frac{1}{\beta_1}\int_S \frac{a}{r}(\varepsilon\mu\omega^2 \pm |\beta|^2)dS; \quad (4)$$
$$x \mp y = -\frac{1}{\beta_2}\int_S \frac{b}{r}(\varepsilon\mu\omega^2 \mp |\beta|^2)dS.$$

В (4) верхние знаки соответствуют системе, получаемой из (2), нижние – из (3).

Нетрудно показать, что системы уравнений (4) несовместны. Отсюда следует вывод, что, поскольку равенство нулю потоков мощности собственных комплексных волн является известным [10] фактом, предположение о равенстве нулю взаимного потока мощности двух рассматриваемых комплексных волн, следствием которого является вторая система (4), некорректно.

Таким образом, показали, что взаимодействие двух комплексных волн любой направляющей структуры может привести к возникновению потока мощности среднего за период, отличного от нуля.

Библиографический список

1. **Clarricoots, D.J.B.** Evanescent and propagating modes of dielectric-loaded circular waveguides / D.J.B. Clarricoots and B.C. Taylor // Proc. IEE. 1964. V. 111. № 12. P. 1951.
2. **Шевченко, В.В.** Плавные волновые переходы / В.В. Шевченко. – М.: Наука, 1969. – 191 с.
3. **Раевский, С.Б.** Комплексные волны в двухслойном круглом экранированном волноводе // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1972. Т. XV. № 1. С. 112.
4. **Раевский, С.Б.** О существовании комплексных волн в некоторых двухслойных изотропных структурах // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1972. Т. XV. № 12. С. 1926.
5. **Калмык, В.А.** Экспериментальное исследование комплексных волн в двухслойном круглом экранированном волноводе / В.А. Калмык, С.Б. Раевский, В.П. Угрюмов // Радиотехника и электроника. 1978. Т. XXV. № 4. С. 699.
6. **Веселов, Г.И.** Исследование комплексных волн двухслойного экранированного волновода / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский, В.А. Калмык // Радиотехника. 1980. Т. 35. № 9. С. 59.
7. **Веселов, Г.И.** Особенности волновых процессов в двухслойном волноводе круглого сечения / Г.И. Веселов, С.Г. Семенов // Радиотехника. 1982. Т. 37. № 10. С. 57.
8. **Веселов, Г.И.** Комплексные волны круглого диэлектрического волновода / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 2. С. 230.
9. **Веселов, Г.И.** О спектре комплексных волн круглого диэлектрического волновода / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника. 1983. Т. 38. № 2. С. 55.
10. **Веселов, Г.И.** Слоистые металло-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988. – 247 с.
11. **Веселов, Г.И.** О встречных потоках мощности в некоторых двухслойных изотропных структурах / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1983. Т. XXVI. № 8. С. 1041.
12. **Раевский, А.С.** Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника. 2010. – 223 с.
13. **Вайнштейн, Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
14. **Раевский, А.С.** Присоединенные колебания и волны в слоистых направляющих структурах / А.С. Раевский, С.Б. Раевский // Антенны. 2014. Вып. 3.

Дата поступления
в редакцию 22.04.2014

K.I. Kisilenko, A.S. Raevskii, S.B. Raevskii

ABOUT MUTUAL POWER FLOWS OF COMPLEX WAVES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Calculations of the mutual power flows of complex waves in the guide electrodynamics structures.
Design/methodology/approach: The methodology used is based on the theory of non-selfadjoint electrodynamics operators.
Findings: Results of calculations could be used in an engineering of filters based on complex resonance.
Research limitations/implications: The present results provide a starting-point for further research of properties of complex waves in the guide electrodynamics structures.
Originality/value: The researches deal with complex waves in the guide electrodynamics structures.

Key words: complex waves, mutual power flows, dispersion equation, complex resonance.