

УДК 621.315.616.395

Одинцов Н. Н., к.т.н., доц. (Тел.: +38 048 705-03-50. E-mail: vols@onat.edu.ua)

Лесовой И. П., д.т.н., проф. (Тел.: +38 048 705-04-23. E-mail: ur5fo@i.ua)

Багачук Д. Г., ст. преподаватель (Тел.: +38 048 705-04-23. E-mail: vols@onat.edu.ua)

Савицкая Н. М., доцент (Тел.: +38 048 705-04-23. E-mail: vols@onat.edu.ua)

(Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова)

АНАЛИЗ НЕРЕГУЛЯРНЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Одинцов М. М., Лисовий І. П., Багачук Д. Г., Савицька Н. М. Аналіз нерегулярних спрямовуючих систем. У роботі отримано вираз, що визначає амплітуду хвилі в спрямовуючих системах з параметрами передачі які повільно змінюються, а також у зв'язаних лініях передачі при коефіцієнті зв'язку, що змінюється. На основі методу Вентцеля, Крамара, Брюлююена виконано дослідження умов поширення електромагнітних хвиль у зв'язаних лініях і виконано аналіз отриманих виразів. Достовірність отриманих результатів підтверджує збіг з відомими виразами теорії взаємних впливів.

Ключові слова: спрямовуюча система, коефіцієнт зв'язку, стала поширення

Одинцов Н. Н., Лесовой И. П., Багачук Д. Г., Савицкая Н. М. Анализ нерегулярных направляющих систем. В работе получено выражение, определяющее амплитуду волны в направляющих системах с медленно меняющимися параметрами передачи, а также в связанных линиях передачи при меняющемся коэффициенте связи. На основе метода Вентцеля, Крамара, Брюлююена произведены исследования условий распространения электромагнитных волн в связанных линиях и выполнен анализ полученных выражений. Достоверность полученных результатов подтверждает совпадение с известными выражениями из теории взаимных влияний.

Ключевые слова: направляющая система, коэффициент связи, постоянная распространения

Odintsov M. M., Lesovoy I. P., Bagachuk D. H., Savits'ka N. M. Analysis of irregular guiding systems. In this paper the expression which defines the amplitude of the wave in the guide systems with slowly varying parameters of transmission, as well as coupled transmission lines when changing the coupling coefficient. On the basis of the Wentzel, Kramar, Brillouin studies produced conditions of electromagnetic wave propagation in coupled lines and the analysis of the obtained expressions. Reliability of the results confirms the coincidence of coincidence with the known expression of the theory of mutual influences.

Keywords: guide system, the coupling coefficient, the propagation constant

Введение. Направляющие системы (НС) электромагнитных волн можно условно разделить на два вида: НС *первого рода*, по которым распространяются электромагнитные волны, длина которых намного превышает их поперечные размеры; НС *второго рода* поперечные размеры, которых соизмеримы с длиной распространяющихся по ним волн. Примером НС первого рода могут служить воздушные линии и кабельные линии, как симметричные, так и коаксиальные. При анализе условий распространения электромагнитных волн по НС первого рода применяются уравнения однородных линий или, так называемые "телеграфные уравнения". А для описания процессов, связанных с распространением электромагнитных волн в них, пользуются параметрами передачи. К НС второго рода относятся линии сверхвысокочастотного и оптического диапазонов, такие как: волноводные, линии поверхностной волны и волоконно-оптические линии.

Для описания процесса распространения энергии в НС второго рода не могут быть использованы уравнения однородной линии, хотя бы потому, что они, например, не учитывают такого эффекта, присущего диапазону сверхвысоких частот, как излучение электромагнитных волн. А понятие "параметры передачи", в применении к ним, не имеют физического смысла. В этом случае пользуются "первичными" понятиями

теории электромагнитного поля: векторами напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей.

При этом при анализе условий распространения электромагнитных волн в НС первого и второго рода предполагается, как правило, что линия является регулярной, у которой параметры передачи являются постоянными в направлении распространения электромагнитных волн. Вместе с тем, строго говоря, НС является, в большей либо меньшей степени нерегулярной, например, длинная кабельная линия, состоящая из отдельных строительных длин кабеля, параметры передачи которых, пусть даже незначительно, но все же отличаются друг от друга. В реальных длинных линиях параметры изменяются нерегулярно:

- вследствие нерегулярности работы машин в процессе производства и изменения взаимного расположения элементов кабеля и шага скрутки;
- вследствие резких изгибов, скачков размеров на сростках и соединителях, вызывающих возмущение электромагнитного поля;
- вследствие механических напряжений элементов в конструкции кабеля.

Условия распространения волн в направляющих системах первого рода с медленно меняющимися параметрами. Особый случай составляют НС, параметры которых непрерывно меняются по длине самой линии. Например, изгибы в волноводных, а также волоконно-оптических линиях передачи. Параметры оптического волокна нерегулярны вследствие дефектов в технологии изготовления, механических воздействия других элементов кабеля, наличия стыков между строительными длинами кабеля, особенностей трассы. К таким линиям можно также отнести направленные ответвители (НО) с непрерывно, меняющейся величиной связи.

В этом случае для исследования условий распространения электромагнитных волн, в длинной линии с изменяющимися по длине параметрами передачи не могут быть использованы известные решения уравнений однородных линий (для НС первого рода) и классическая электродинамическая теория для НС второго рода. При этом необходимо использовать приближенные методы решения уравнения (1), которое описывает условия распространения электромагнитных волн в ЛП:

$$\frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} + \gamma^2(z)U(z) = 0, \quad (1)$$

где $U(z)$ – функция, представляющая собой напряженность электрического или магнитного поля в НС второго рода либо напряжение или ток в НС первого рода; $\gamma(z)$ – функция, учитывающая изменение амплитуды и фазы волны в процессе распространения вдоль линии:

$$\gamma(z) = \beta(z) - i\alpha(z), \quad (2)$$

где $\beta(z)$ – коэффициент, учитывающий изменение фазы волны в направлении распространения волны (координаты z);
 $\alpha(z)$ – коэффициент, учитывающий изменение амплитуды волны.

В работе [1] предложен метод поперечных сечений для определения полей волн в изгибах волноводных линий. Однако применение данной методики ограничивается лишь линиями СВЧ диапазона и, в частности, волноводами. Вместе с тем, представляет теоретический и практический интерес исследование условий распространения волн в НС первого рода с медленно меняющимися параметрами, а также в связанных линиях с изменяющейся величиной связи. В этом случае целесообразно использовать метод ВКБ

(Вентцеля, Крамера, Бриллюэна), который является приближенным и применяемым к линиям с медленно меняющимися параметрами передачи, так называемым приближением геометрической оптики [2, 3]. В некоторых источниках [3] он именуется как метод ВВК.

В том случае, когда параметры линии по длине не изменяются, решение уравнения (1) представляется в виде:

$$U(z) = U(0)e^{-i\gamma z} = U(0)e^{-i[\beta - i\alpha]z}, \quad (3)$$

Условие произвольной, но слабо изменяющейся по длине функции $\gamma(z)$ является следующее соотношение:

$$\frac{\partial\gamma(z)}{\partial z} \lambda \ll \gamma(z). \quad (4)$$

При этом решение уравнение (1) будет иметь вид:

$$U(z) = U_0(z) e^{-i \int_{z_1}^{z_2} \gamma(z) dz}. \quad (5)$$

Равенство (5) означает, что решение уравнения (1) в приближении геометрической оптики аналогично (3) формальной заменой в нем $\gamma(z)$ на $\int \gamma(z)$.

Величина $U_0(z)$ в решении (5) определяется из соотношения:

$$U_0(z) = \frac{C}{\sqrt{\gamma(z)}}, \quad (6)$$

где C – постоянная, определяемая из граничного условия.

Тогда амплитуда волны ($U(z)$), на расстоянии z от начала линии, определится из выражения:

$$U(z) = U_0(z) e^{-i \int_0^z \gamma(z) dz}. \quad (7)$$

Если длина линии равна l , амплитуда волны в конце линии определится соотношением:

$$U(l) = U_0(z) e^{-i \int_0^l \gamma(z) dz}. \quad (8)$$

Рассмотрим наиболее простой случай, когда величина $\gamma(z)$ изменяется по линейному закону:

$$\gamma(z) = Kz\gamma, \quad (9)$$

где K – коэффициент пропорциональности, является известной величиной, таким, что справедливо условие (4).

При этом выражение (8) примет вид:

$$U(l) = U_0(z) e^{-\frac{1}{2}iKl^2\gamma} = U_0(z) e^{-\frac{1}{2}i[K\beta l^2 - iK\alpha l^2\gamma]} = U_0(z) e^{-\frac{1}{2}K\alpha l^2} \times e^{-\frac{1}{2}iK\beta l^2}. \quad (10)$$

В формуле (10) первый множитель характеризует амплитуду волны в конце линии, а второй – ее фазу.

Полученное соотношение (8) позволяет сравнительно несложно определять амплитуду волны в конце линии при известной зависимости $\gamma(z)$, в предположении что функция $\gamma(z)$, которая является постоянной распространения, меняется медленно.

Представляет интерес также определение амплитуды волн в связанных линиях, примером которых могут быть линии, работающие в многомодовом режиме, при котором существует связь между модами [5], а также взаимовлияющие цепи в воздушных и кабельных линиях. К связанным линиям передачи относятся также направленные ответвители (НО), используемые в линиях сверхвысокочастотного (СВЧ) и оптического диапазонов.

На Рис. 1 показаны две связанные линии (I и II), в первой из которых (I) распространяется электромагнитная волна с нормированной амплитудой в начале линии, равной $U_1(0)$.

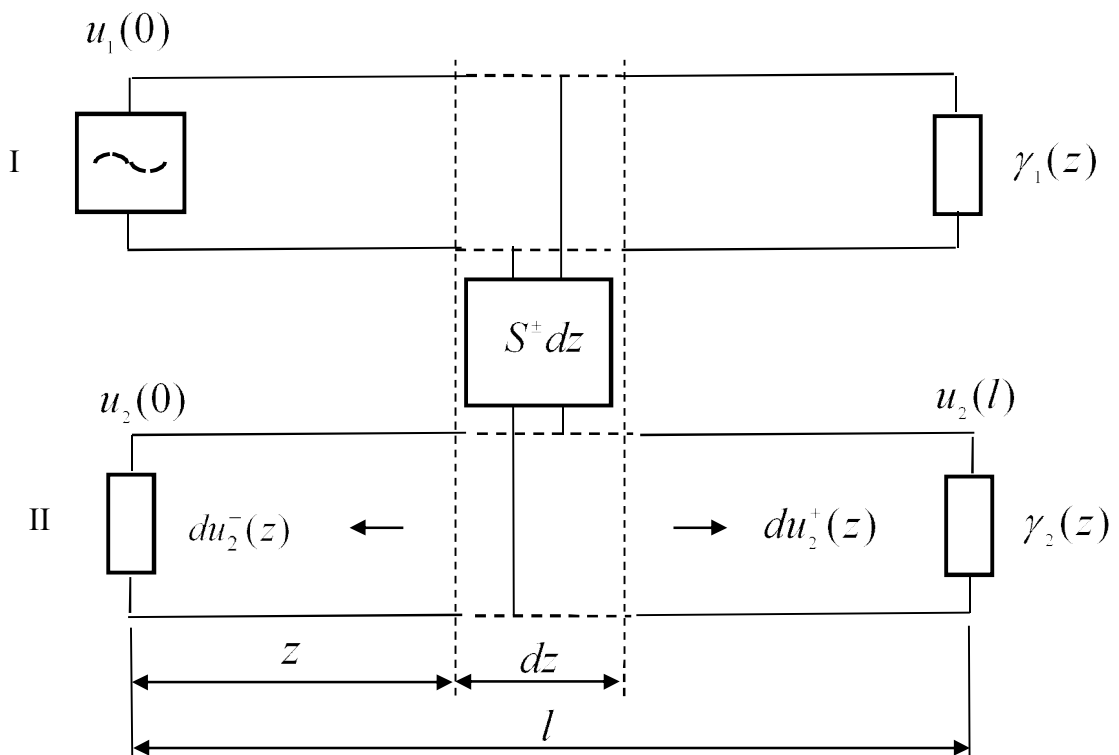


Рис. 1. Эквивалентная схема связанных линий

Постоянные распространения первой и второй линий обозначим $\gamma_1(z)$ и $\gamma_2(z)$ соответственно. Обозначим $S^\pm(z)$ коэффициент связи между линиями через элементарный участок dz , расположенный на расстоянии z от начала линии. Тогда элементарные амплитуды волн, возбуждаемых во второй линии, в прямом $dU_2^+(z)$ и обратном $dU_2^-(z)$ направлениях определяются соотношениями

$$dU_2^\pm(z) = U_1(0) S^\pm(z) e^{-\int_0^z \gamma_1(z) dz} dz, \quad (11)$$

где, индексы (+) и (-) соответствуют волнам распространяющимся в направлении конца и начала второй линии, соответственно. При этом предполагается, что коэффициент связи S^\pm

обладает собственной направленностью такой, что волны, возбуждаемые в положительном и отрицательном направлении оси z не равны по величине между собой.

Пропуская промежуточные выкладки, получим выражения для суммарных амплитуд волн, возбуждаемых во второй линии и поступающих к началу $U_2(0)$ и концу $U_2(l)$ в виде:

$$U_2(0) = \int_0^l \hat{E}_1(z) S^-(z) e^{-i \left[\int_0^z \gamma_1(z) dz - \int_z^0 \gamma_2(z) dz \right]} dz, \quad (12)$$

$$U_2(l) = \int_0^l \hat{E}_1(z) S^+(z) e^{-i \left[\int_0^z \gamma_1(z) dz + \int_z^l \gamma_2(z) dz \right]} dz, \quad (13)$$

где $\hat{E}_1(z)$ – некоторая новая функция, определяемая соотношением, аналогичным (6) при соответствующем граничном условии.

Если в соотношениях (12) и (13) положить, что постоянные распространения линии $\gamma_1(z)$ и $\gamma_2(z)$, а также коэффициент связи $S^\pm(z)$ являются постоянными величинами, не зависящими от z , то данные выражения станут аналогичными известным соотношениям из теории взаимного влияния [4], что свидетельствует о справедливости приведенных в данной работе рассуждений и полученных формул.

Выводы. Проведенный в работе анализ условий распространения электромагнитных волн в нерегулярных линиях с медленно меняющимися параметрами позволил на основе метода ВВК получить выражения, позволяющие определить амплитуду волны $u(z)$ на расстоянии z от начала линии при известной амплитуде $u(0)$ в начале линии и известном законе изменения постоянной распространения $\gamma(z)$.

Кроме того, получены также соотношения для определения амплитуд волн, распространяющихся к началу и концу второй линии в связанных линиях при известном законе изменения коэффициента связи $S^\pm(z)$.

Литература

1. Каценеленбаум Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами / Б. З. Каценеленбаум. – Москва : Наука, 1961. – 216 с.
2. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург. – Москва : Наука, 1967. – 683 с.
3. Машковцев Б. М. Теория волноводов / Б. М. Машковцев, К. Н. Цибизов, Б. Ф. Емелин. – Москва – Ленинград : Наука, 1966. – 354 с.
4. Гроднев И. И. Линии связи / И. И. Гроднев, С. М. Верник. – Москва : Радио и связь, 1988. – 544с.
5. Одинцов Н. Н. Связь между модами в многомодовой линии передачи / Н.Н. Одинцов, А.П. Заяц // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2000. – № 1. – С. 66 – 68.