

3091 - 2

О.А. Колпаков

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯДОВ И ТОКОВ
В НЕКОТОРЫХ ОГРАНИЧЕННЫХ СТРУКТУРАХ

Автореферат диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук

Б.М. Болотовский

Дубна 1967

3091 - 2

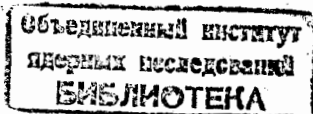
О.А. Колпаков

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗАРЯДОВ И ТОКОВ
В НЕКОТОРЫХ ОГРАНИЧЕННЫХ СТРУКТУРАХ

Автореферат диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук

Б.М. Болотовский



В предлагаемой работе исследуются потери энергии вследствие излучения при движении зарядов и токов в некоторых ограниченных структурах. Необходимость иметь точное представление о таких потерях возникла в связи с проблемой ускорения больших зарядов и токов в резонаторах и волноводах. При движении зарядов и токов в ограниченных структурах также не менее важно знать поле излучения, угловое распределение потока излучаемых волн и спектр волн. Определение потерь вызывает необходимость также исследовать более подробно условия распространения волн в волноводах.

Поэтому в работе сначала исследуются условия существования собственных полей и волн в замкнутых резонаторах и волноводах с периодической структурой.

Далее рассматривается излучение, возникающее при пролете зарядов и токов через резонаторы, волноводы с периодической структурой и полубесконечные волноводы.

При этом использованы общие теоретические методы, изложенные в /2,14-16,25/ и др. В диссертации получены решения, пригодные для непосредственного произведения вычислений.

В соответствие с поставленной задачей работа естественным образом делится на четыре части:

В первой части рассматриваются собственные поля в резонаторе, возбужденные пролетающим зарядом. Для замкнутого резонатора известен вид функций, описывающих собственные поля. Чтобы определить излучение, необходимо знать распределение собственных полей в пространстве и времени в зависимости от тока. Для решения задачи можно применить математический формализм из /2/. Если задан ток с известным распределением в пространстве, то этот ток можно представить в виде разложения по собственным функциям резонатора.

Задача сводится к решению неоднородных - уравнений - отысканию полей, возбужденных внешней силой.

Следующие параграфы содержат рассмотрение условий распространения волн в волноводах с периодической структурой.

В § 2 содержится обзор способов получения дисперсионных уравнений для волноводов с периодической структурой. Со схемой решения такой задачи можно познакомиться в работе Ахлезера и Файнберга ^{/2/}.

Для получения точного дисперсионного уравнения поле в волноводе необходимо представить в виде бесконечных рядов. Это приводит к необходимости решать системы уравнений с бесконечным числом неизвестных. Но в некоторых случаях возможно приближенное рассмотрение. В ^{/2/} рассматривается случай так называемого диафрагмированного волновода. В этом случае возможно учитывать по одной основной волне в смежных областях волновода. В работах Владимирского ^{/6,7/} рассматривается волновод, представляющий собой цепочку связанных резонаторов. Для получения дисперсионного уравнения поля в волноводе рассматриваются как квазистатические. В ^{/26/} рассматриваются волноводы, для которых, учитывая в одной области бесконечную сумму волн, допустимо в другой области поля представить в виде одной основной волны. При помощи метода, изложенного в ^{/26/}, в данной работе рассмотрен волновод со щелями. Для этого волновода было получено дисперсионное уравнение. В работе также показывается, что такой метод нахождения дисперсионного уравнения универсален. Например, показывается, что ранее полученные дисперсионные уравнения для диафрагмированного волновода ^{/2/} и цепочки связанных резонаторов ^{/6,7/} могут быть выведены как следствия из дисперсионного уравнения для волновода со щелями.

Иной способ отыскания дисперсионного уравнения применяется в других работах ^{/31/}. В ^{/31/} рассматривается волновод из колец. В таком волноводе волны свободно распространяются как внутри, так и вне колец. Следуя методу ^{/31/}, для получения дисперсионного равенства необходимо решить систему интегральных уравнений.

В § 3 производится вывод и анализ дисперсионного уравнения для волновода со щелями. Волновод со щелями - это такой волновод, в котором ширина резонансных полостей много меньше расстояния между соседними полостями.

Согласно ^{/26/}, поле в резонаторных полостях волновода возможно представить одной нулевой гармоникой. Действительно, если длина волны много больше ширины резонаторной полости, то можно допустить, что в последней возбуждается квазистационарное поле. В области распространения волн поля необходимо описывать бесконечной суммой волн, чтобы удовлетворить граничным условиям. Анализ дисперсионного равенства позволяет определить полосы пропускания волновода в зависимости от геометрических резонаторов волновода.

В § 4 получены следствия из дисперсионного уравнения для волновода со щелями. При выводе этого дисперсионного уравнения использовалось предположение, что длина волны больше периода структуры. При этом не обязательно, чтобы ширина полости была много меньше периода структуры, чтобы поле в полостях рассматривать как квазистационарные. Следовательно, можно ожидать, что таким способом можно получить дисперсионное уравнение для любого волновода с периодической структурой, если только длина волны больше периода структуры.

Волновод с бесконечно тонкими диафрагмами - это предельный случай волновода со щелями, когда ширина щели равна периоду структуры. В данной работе показывается, что дисперсионное уравнение для диафрагмированного волновода, определенное в ^{/2/}, можно получить в качестве следствия из дисперсионного уравнения для волновода со щелями.

В § 5 производится вывод другого следствия. Из дисперсионного уравнения для волновода со щелями получено выражение для полосы пропускания частот цепочки связанных резонаторов. Ранее такое выражение было получено Владимирским ^{/6/}. Владимирский использовал предположение, что поля вблизи отверстия связи можно рассматривать как квазистатические. В ^{/6/} выражение для полосы частот получено при помощи громоздких расчетов, по-видимому, применимых только для этого частного случая. В нашей работе выражение для полосы частот получено как следствие из решения более общей задачи при помощи простых способов вычисления.

В § 6 исследуются условия распространения волн в волноводе с диэлектрическими диафрагмами. Такой волновод тоже является волноводом с периодической структурой. Но если длина волны больше периода структуры, то волновод с диэлектрическими диафрагмами можно рассматривать как заполненный сплошным анизотропным диэлектриком. Такой подход к решению задачи имеется, на-

пример, в работе ^{/11/}. В ^{/11/} таким образом исследуются условия прохождения волны через слоистый диэлектрик и определяются характеристики идеализированного анизотропного диэлектрика в зависимости от параметров диафрагм и реального диэлектрика.

В нашей работе получено дисперсионное уравнение и исследованы условия, при которых этот приближенный метод позволяет получить достаточно точные решения.

В § 7 проведено рассмотрение волновода из колец. Этот волновод интересен в том отношении, что обладает свойствами, благоприятными для распространения волн магнитного типа. Волны магнитного типа возбуждаются токами с азимутальной компонентой. Для анализа свойств такого волновода был использован метод, описанный в ^{/29-31/}. Задача сводится к отысканию некоторой функции, описывающей граничные условия. Таким образом, в ^{/31/} получено дисперсионное уравнение для волновода из колец.

В нашей работе производится анализ дисперсионного уравнения. В результате этого анализа получены формулы, использованные при определении излучения от пролетающего тока. Вычислено дисперсионное равенство для волновода из колец, если последний расположен в другом гладком волноводе.

Часть вторая содержит исследование излучения зарядов и токов, пролетающих с постоянной скоростью через резонаторы и волноводы с периодической структурой.

В § 8 рассматриваются методы решения задач по определению излучения. Ахиезер и Файнберг ^{/1/} описали метод решения задач на определение излучения в волноводах с периодической структурой, который заключается в следующем. Если известны собственные функции волновода, то пролетающие в волноводе токи можно представить в виде разложения по этим функциям. Решение неоднородных уравнений дает выражения для полей, возбужденных внешней силой — пролетающим через волновод током. Сумма всех возбужденных волн, возможных в данном волноводе согласно дисперсионному уравнению, характеризует поле излучения. В другой работе этих авторов ^{/2/} определена энергия излучения, возникающего при пролете заряда через волновод с тонкими металлическими диафрагмами, причем излученная энергия подсчитана только для основной волны.

Метод, изложенный в ^{/2/}, удобен для определения излученной энергии при пролетании заряда через отдельный резонатор, собственные функции которого обычно бывают известны.

При определении излучения в сплошных средах удобно применить другой метод. Можно считать, что энергия излучается в результате действия на заряд поля, возбужденного самим зарядом (за исключением собственного поля заряда в свободном пространстве).

В § 9 рассматривается излучение, возникающее при пролетании зарядов и токов через цилиндрический резонатор. Как уже упоминалось, задача сводится к отысканию полей в резонаторе, возбужденных пролетающим зарядом и вычислению энергии этих полей. В нашей работе рассмотрено излучение в резонаторе при пролете по оси резонатора точечного заряда и при пролете магнитного диполя.

Реальный резонатор не является полностью замкнутым. Следовательно, при суммировании энергии полей необходимо каким-то образом учесть незамкнутость резонатора. В работе рассматривается цилиндрический резонатор, имеющий входное и выходное отверстия. Естественно предположить, что при пролете заряда или тока через резонатор испытывают возмущение волны, длина которых превышает размеры отверстия в резонаторе.

Однако вследствие математических трудностей не имеется возможности вычислить полную сумму возбужденных полей. В нашей работе суммирование произведено для всех волн нулевой гармоники или для всех волн какой-нибудь высшей гармоники. Имеются расчеты, позволяющие оценить общее излучение.

Точно рассчитан предельный случай: излучение заряда и магнитного диполя при пролетании через отверстие в бесконечном экране. Полученный результат совпадает с выражением, приведенным в ^{/13/}. Это свидетельствует о правильном выборе оценки числа членов, которые надо учитывать при суммировании полей.

В § 10 определена энергия, излученная при пролетании заряда через волновод со щелями. Вычислена полная энергия, потерянная зарядом в волноводе и произведено сравнение выражения для излученной энергии с соответствующим выражением для энергии, излученной зарядом при пролете через резонатор.

В § 11 произведено вычисление энергии, излученной магнитным диполем при пролетании в волноводе из колец, расположенном в открытом пространстве, и в волноводе, расположенном в другом, гладком волноводе. Подобный волновод представляет интерес для изучения условий возбуждения магнитных волн. Для вычисления энергии, потерянной магнитным диполем при пролетании в волноводе, используется метод, рассмотренный в ^{/1/}.

В § 12 определены потери энергии при пролетании заряда в волноводе с диэлектрическими диафрагмами. Для длинных волн такой волновод можно считать заполненным однородным анизотропным диэлектриком. Для вычисления энергии, излученной зарядом в волноводе, заполненном однородным диэлектриком, использован метод, рассмотренный в ^{/14/}.

В третьей части работы рассмотрено излучение зарядов и токов, пролетающих через полубесконечный волновод.

В § 13 приведено краткое изложение способа определения энергии, излученной зарядом или током при пролетании через полубесконечный волновод. Этот способ основан на теории дифракции волн на открытом конце полубесконечного волновода, которая изложена в работах Вайнштейна ^{/3/}.

Для определения поля дифракции Вайнштейн употребил математический метод, который является одним из вариантов более общего и известного под названием "метода Винера-Хопфа" ^{/8/}.

Задача об излучении формально может быть сведена к задаче о дифракции поля заряда или тока на полубесконечном волноводе.

Следовательно, сначала необходимо определить собственные поля зарядов и токов. Собственные поля можно представить в виде бесконечного спектра волн и определить дифракцию этих волн на открытом конце полубесконечного волновода. Суммарное поле диафрагмированных волн определяет энергию излучения. Примеры подобного решения задачи имеются в работах Болотовского, Воскресенского, Сердакона и др. ^{/15,16,25/}. В упомянутых работах рассмотрены задачи на определение излучения при пролете точечного заряда по оси полубесконечного цилиндрического волновода, при пролете заряда параллельно оси волновода, при пролете заряда параллельно системе параллельных полубесконечных плоскостей, при пролете по оси волновода заряженной нити. В ^{/25/} определено излучение с учетом конечной проводимости стенок волновода. В перечис-

ленных работах рассматривается полубесконечный волновод, расположенный в открытом пространстве.

В некоторых экспериментальных установках осуществляется влет или вылет заряда в волновод с конечными размерами. Такой волновод обычно располагается в другом волноводе большего радиуса, который играет роль экрана для первого волновода. Имея в виду подобное устройство, в нашей работе исследовано излучение при пролетании произвольного распределения зарядов и токов по оси полубесконечного волновода, расположенного в другом бесконечном волноводе.

В § 14 получены собственные поля произвольного распределения зарядов и токов, пролетающих в бесконечном волноводе. Если теперь в бесконечном волноводе расположить полубесконечный, то будет иметь место дифракция волн собственного поля зарядов. Определение собственных полей произвольного распределения зарядов и токов является существенным моментом в нашей работе, необходимым для нахождения полей дифракции.

В § 15 при использовании полученных собственных полей от произвольного распределения зарядов и токов в бесконечном волноводе определены поля дифракции. Для этого был применен метод, рассмотренный Вайнштейном, согласно которому поле дифракции описывается при помощи некоторых вспомогательных функций. Для задачи, рассмотренной в предлагаемой работе, функции имеют характерные особенности, определяющие свойства полей, когда полубесконечный волновод расположен в бесконечном. В предлагаемой работе исследованы свойства вспомогательных функций и получены выражения для полей при помощи этих функций.

В § 16 рассмотрены различные следствия из решения задачи об излучении произвольного распределения зарядов и токов в полубесконечном волноводе. В качестве первого примера вычислено излучение для случая, когда по оси волновода пролетает точечный заряд. Показано, что если произвести предельный переход, встраивая диаметр бесконечного волновода к бесконечности, то можно получить результат, совпадающий с результатом из ^{/16/}, где определено излучение заряда, пролетающего по оси полубесконечного волновода, расположенного в открытом пространстве. Другое следствие получено для случая, когда заряд пролетает параллельно оси волновода. Третье следствие выведено

для случая, когда по оси волноводов пролетает магнитный диполь. Если опять произвести предельный переход к открытому пространству, то можно получить результаты, совпадающие с формулами из ^{/25/}, где рассмотрено излучение магнитного диполя, пролетающего по оси полубесконечного волновода, расположенного в свободном пространстве.

В § 17 получены приближенные формулы, удобные для расчетов. Рассмотрен такой случай, когда в пространстве, заключенном в волноводах, возбуждается только одна волна. Оказывается, что именно такой случай вероятнее всего встретится в эксперименте.

В четвертой части работы определяются оптимальные характеристики волновода при учете активных потерь энергии. Рассмотрен волновод с диэлектрическими диафрагмами. В таком волноводе возникают активные потери двух видов: потери в металлических стенках волновода вследствие конечной проводимости стенок и потери в диэлектрике.

Использован метод вычисления активных потерь энергии, изложенный в ^{/10/}. Согласно этому методу, необходимо граничные условия для полей изобразить в таком виде, который позволяет для вычислений применить такой же формализм, как и в случае бесконечной проводимости стенок волновода.

Коэффициент потерь в стенках волновода характеризуется отношением энергии, которая расходуется при протекании токов в стенках, к энергии, заключенной во внутреннем объеме волновода.

Потери в диэлектрике характеризуются мнимой частью постоянной распространения волны. С использованием полученных в первой части работы дисперсионных уравнений и учетом активных потерь энергии вычислены оптимальные размеры волновода с диэлектрическими диафрагмами.

Получены формулы, удобные для инженерных расчетов.

Основными результатами предлагаемой работы можно назвать следующие.

1. Получены дисперсионные уравнения для различных волноводов с периодической структурой и показано, что использованная методика расчета применима для любого волновода с периодической структурой.

2. Определены потери энергии вследствие излучения при пролете зарядов и токов через резонаторы и волноводы.

3. Получены выражения для собственных полей волновода при движении в нем произвольного распределения зарядов и токов.

4. Определены потери энергии на излучении при пролетании зарядов и токов произвольного распределения через полубесконечный волновод.

Основной материал диссертации опубликован в работах:

1. О.А. Колпаков, В.И. Котов. Препринт ОИЯИ, 1966, Дубна 1963.
2. О.А. Колпаков, В.И. Котов. ЖТФ, 34, 1387 (1964).
3. О.А. Колпаков, В.И. Котов, ОМ. Саядха. Препринт ОИЯИ Р-1565, Дубна 1964.
4. О.А. Колпаков, В.И. Котов. ОМ. Саядха. ЖТФ, 35, 26 (1965).
5. О.А. Колпаков, В.И. Котов. Препринт ОИЯИ, 1901, Дубна 1964.
6. О.А. Колпаков, В.И. Котов. ЖТФ, 35, (12) (1965).
7. О.А. Колпаков. Препринт ОИЯИ 2118, Дубна 1965.

Л и т е р а т у р а

1. А.И. Ахиезер, Г.Я. Любарский, Я.Б. Файнберг. ЖЭТФ, 25, 2526 (1955).
2. А.И. Ахиезер, Я.Б. Файнберг. УФН, 44, 321 (1951).
3. Л.А. Вайнштейн. Дифракция электромагнитных и звуковых волн на открытом конце волновода. Сов. Радио (1953).
4. Л.А. Вайнштейн. ЖТФ, 25, 847 (1955).
5. Л.А. Вайнштейн. ДАН, 1X, 1421 (1948).
6. В.В. Владимирский. ЖТФ, 17, 1269 (1947).
7. В.В. Владимирский. ЖТФ, 17, 1277 (1947).
8. Б. Нобл. Метод Винера-Хопфа, И.Л. (1962).
9. И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений ф.м. (1964).
10. Луи де Бройль. Электромагнитные волны в волноводах и полых резонаторах.
11. Я.Б. Файнберг, Н.А. Хижняк. ЖЭТФ, 32, 4 (1957).
12. Я.Б. Файнберг, И.А. Хижняк, Н.П. Селиванов, К.Н. Степанов. Сборник статей "Теория и расчет линейных ускорителей", стр. 186 Госатомиздат (1962).

13. Ю.Н. Днестровский, Д.П. Костомаров. Радиотехника и электротехника, 4, 303 (1959).
14. Б.М. Болотовский. УФН, 75, 295 (1961).
15. Б.М. Болотовский, Д.М. Седракан. Ц.А.Н. Арм. ССР, серия ф.-м., 17, 2 (1964)
16. Б.М. Болотовский, Г.М. Воскресенский. ЖТФ, 34, 711 (1964).
17. Б.М. Болотовский, Г.М. Воскресенский. ЖТФ, 34, 1806 (1964).
18. Б.М. Болотовский, Г.М. Воскресенский. ЖТФ, 34, 11 (1964).
19. Б.М. Болотовский, Г.М. Воскресенский. ЖТФ, 34, 704 (1964).
20. Л.С. Богданович, Б.М. Болотовский. ЖЭТФ, 32, 6, 1421 (1957).
21. Л.С. Богданевич. ЖТФ, 28, 7, 1505 (1958).
22. Э.М. Лазнев. Изв. АН Арм. ССР, серия ф.-м., 17, 135 (1964)
23. К.А. Барсуков. ЖЭТФ, 37, 1106 (1958).
24. А.Г. Бонч-Осмоловский. ЖТФ, 33, 3, 296 (1963).
25. Л.П. Игушкин, Э.И. Уразаков. ЖТФ, т. 37, вып. 1 (1967).
26. М.Ф. Стельмах, И.Б. Ольдфрое. Радиотехника и электроника, 6, 980 (1959).
27. Н.Н. Смирнов. ЖТФ, 27, 1494 (1958).
28. В.В. Малин. Радиотехника и электроника, 8, 1834 (1963).
29. В.В. Малин. Радиотехника и электроника, 7, 1349 (1962).
30. В.В. Малин. Радиотехника и электроника, 8, 211 (1963).
31. В.В. Малин. Радиотехника и электроника, 8, 1834 (1963).
32. Б.Я. Мойжес. ЖТФ, 20, 6, 716 (1950); 25, 1, 158 (1955).
33. Н.Н. Смирнов. ДАН, 108, 2, 243 (1956).
34. А.Н. Сивов. Радиотехника и электроника, 6, 4, 483 (1961).

Рукопись поступила в издательский отдел
28 декабря 1966 г.