

УДК 621.372.832

*П. В. НЕШМОНИН, В. Ю. ТИХОВСКИЙ,
Ж. Ф. ПАЩЕНКО, канд. техн. наук,
В. К. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук*

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ЩЕЛЕВЫХ МОСТОВ

Сообщение 3.

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ H -МОСТОВ

Для реализации математической модели щелевого H -моста, приведенной в работе [1], разработан комплекс программ, который функционально и по назначению можно условно разделить на три подсистемы: анализа сходимости решения задачи, автоматизированного расчета выходных параметров устройств по задаваемым геометрическим размерам в частотном диапазоне и получения оптимальных геометрических размеров устройства, обеспечивающих заданные отклонения затухания и полосы по частоте.

Подсистема анализа сходимости предназначена для обоснования выбора необходимого и достаточного количества и последовательности существования волн в волноводах и единичных полей на отверстиях связи. Подсистема состоит из следующих программных модулей: подпрограммы УНМ для расчета комплексных матриц проводимостей, задающих токов и рассеяния;

подпрограммы CSIMQ для решения неоднородного комплексного матричного уравнения; подпрограммы CMPRNT для распечатки комплексных матриц и основной программы, задающей различные наборы частот, геометрических размеров, волн в волноводах и единичных полей на отверстии связи.

Подсистема расчета выходных параметров устройств по задаваемым геометрическим размерам в частотном диапазоне предназначена для предварительного подбора геометрических размеров устройства, обеспечивающих заданные отклонения затухания и полосу по частоте, а также оценки характера их изменения. Подсистема включает в себя, кроме названных выше подпрограмм YHM, CSIMQ и CMPRNT, подпрограмму SUGRP2 для построения на АЦПУ графических зависимостей с переменным шагом по обеим координатным осям и основную программу, задающую выбранные волны в волноводах и единичные поля на отверстии связи и различные наборы геометрических размеров отверстия.

Подсистема получения оптимальных геометрических размеров устройства предназначена для поиска таких геометрических размеров отверстия связи, которые бы обеспечивали заданные отклонения затухания в возможно большем частотном диапазоне. Подсистема включает в себя, кроме названных ранее подпрограмм YHM, CSIMQ, CMPRNT и SUGRP2, подпрограммы SPS для слепого случайного поиска минимума функции при многопараметрической оптимизации, RRSV для получения равномерно-распределенных псевдослучайных чисел, AINIT с точкой входа Q для вычисления минимизируемой функции нескольких переменных и основную программу, задающую выбранный набор волн в волноводах и единичных полей на отверстии связи, геометрические размеры устройства и интервалы возможного изменения геометрических размеров области связи.

При решении задачи автоматизированного расчета H -мостов возникает необходимость создания подпрограмм, позволяющих получать комплексные матрицы проводимостей и задающих токов для конкретных устройств. Такой подпрограммой для направленных ответвителей в H -плоскости (H -мост) является подпрограмма YHM с точкой входа RASS. Она рассчитывает элементы комплексных матриц проводимостей и задающих токов, каждый из которых представляет собой сумму ряда по учитываемым волнам высших типов в волноводах и матрицу по единичным полям на отверстии связи H -моста.

Все вычисления матриц проводятся в комплексном виде, а сумма ряда по учитываемым волнам в волноводах — с удвоенной точностью, что позволяет учитывать даже те типы волн, вклад которых в конечную сумму комплексной проводимости незначителен.

Поскольку формулы, по которым вычислялись проводимости и задающие токи, сложны и объемны, возникла необходимость максимального снижения затрат машинного времени на полу-

чение матриц. Эта проблема становится особенно острой при учете большого количества единичных полей на отверстии связи, что приводит к необходимости решения комплексных систем уравнений больших порядков. Учет большого числа волн высших типов в волноводах также существенно сказывается на скорости вычислений. Поэтому для снижения времени счета в подпрограмме УНМ использовалось множество проверок условий и разветвлений, позволяющих сократить объем вычислений в зависимости от учитываемых внешних данных в несколько раз, что приводит к резкому сокращению требуемого для полного расчета машинного времени. Кроме того, поскольку волноводы в направленном ответвителе имеют одинаковые геометрические размеры, было решено учитывать в каждом из них одинаковое количество волн и расчеты производить только по одному из волноводов, считая, что для второго они будут аналогичными. Необходимо отметить, что комплексная матрица проводимостей симметрична относительно главной диагонали, поэтому в подпрограмме рассчитывается только половина ее членов, а остальные просто копируются.

В результате этого при расчетах волноводных ответвителей удалось существенно снизить затраты машинного времени. Так, например, при учете 10 единичных полей на отверстии связи и 40 волн высших типов в волноводах весь цикл расчета (расчет комплексных проводимостей и сторонних токов, заполнение матриц проводимостей размерностью 10×10 , решение комплексной системы линейных неоднородных уравнений 10-го порядка, расчет матрицы рассеяния, вычисление затухания и направленности) занимает на ЭВМ ЕС-1050 немногим более 4 с, причем это время значительно снижается при центральном расположении отверстия связи в узкой стенке.

Подпрограмма УНМ имеет точку входа RASS, используемую для расчета матрицы рассеяния после решения комплексной системы уравнений.

При использовании сравнительно небольшого количества учитываемых волн высших типов в волноводах и некоторых единичных полей на отверстии связи может возникнуть ситуация, когда указанные типы и единичные поля не взаимодействуют между собой, что приводит к появлению нулевых членов матрицы проводимостей, а иногда даже к появлению нулевых строк и столбцов, в результате чего решение системы комплексных уравнений не имеет смысла.

Для недопущения таких ситуаций в подпрограмме УНМ предусмотрено исключение из рассмотрения единичных полей, не взаимодействующих с остальными полями и типами волн.

В вызывающей программе перед обращением должны быть зарезервированы и заполнены массивы для хранения учитываемых типов волн в волноводах, единичных полей на отверстии связи и геометрических размеров устройства. Кроме того, в подпрограмму УНМ в качестве параметров передаются час-

тота, количество учитываемых волн и единичных полей, некоторые служебные массивы.

Для получения матрицы рассеяния, а также вычисления направленности и затухания волноводных разветвителей необходимо решить систему комплексных уравнений, полученную в результате работы подпрограммы УНМ. Для этого была переделана в комплексный вид известная подпрограмма решения системы линейных уравнений SIMQ [2], в которой применяется метод исключения при помощи наибольшего ведущего делителя. На каждом этапе изменялся порядок строк во избежание деления на нуль или на малый элемент.

Прямое решение для получения N -й переменной дано в N этапов. Обратное решение для получения других переменных производится последовательными подстановками. Окончательные результаты решения пересылаются в комплексный вектор начальных констант. Решение не имеет смысла, когда число уравнений и переменных меньше двух и в случае сингулярной матрицы, т. е. матрицы, в которой какие-нибудь строка или столбец равны нулю.

Если ведущий элемент не может быть найден (строка или столбец равны нулю), выходной параметр KS устанавливается в единицу и решение не производится.

Из вызывающей программы в подпрограмму CSIMQ в качестве параметров передаются заранее заполненные комплексные матрицы коэффициентов и начальных констант заданной размерности.

При отладке программ, а также при оценке сходимости метода большое значение имеет анализ изменения комплексных проводимостей, свободных членов и амплитудных коэффициентов. Поэтому было решено выводить указанные матрицы, сформированные в результате работы подпрограмм УНМ и CSIMQ, на АЦПУ в удобном для дальнейшего использования виде.

Сложность такой выдачи заключается в том, что указанные матрицы комплексные и часто имеют большую размерность. Например, размерность комплексной матрицы проводимостей при оценке сходимости изменялась от 1 до 40. Если выводить на АЦПУ матрицу размерностью 40×40 , то в полученных результатах при этом разобраться будет очень сложно. Поэтому возникла необходимость создания подпрограммы распечатки комплексных матриц любого размера на АЦПУ.

Подпрограмма SMPRNT производит распечатку комплексного массива любого размера. На каждой странице печатается заголовок, размер и способ хранения комплексного массива. Каждый столбец и строка в заголовке имеют соответствующий номер. Вывод производится по три столбца в каждой странице, так что чтение распечатанного подпрограммой комплексного массива в дальнейшем не вызывает затруднений. Каждый элемент массива может быть легко найден по номерам строки и столбца. Подпрограмма SMPRNT не требует, в отличие от

своего прототипа MXOUT [2], для работы никаких внешних функций и подпрограмм.

При расчетах зависимости направленности и затухания от частоты для различных наборов геометрических размеров отверстия связи волноводных разветвителей выяснилось, что значения направленности и затухания во всем исследуемом частотном диапазоне имеют довольно значительные перепады.

Возникла задача получить такие геометрические размеры отверстия связи, при которых в максимально широком частотном диапазоне выполнялось бы условие равенства направленности $3 \pm 0,5$ дБ и $3 \pm 0,2$ дБ. Однако эту задачу многопараметрической оптимизации нельзя достаточно эффективно решить каким-либо традиционным способом (метод скорейшего спуска, метод сопряженных градиентов и др.), поскольку функция (направленность или затухание) имеет во всем диапазоне несколько участков, в которых выполняется указанное условие и, следовательно, среди множества локальных решений нужно найти одно глобальное. Кроме того, функция, как уже отмечалось раньше, в некоторых участках частотного диапазона имеет сложный рельеф, резкие перепады и выбросы.

Весьма эффективным инструментом решения задач такого типа являются методы случайного статистического поиска [3].

Из множества программ, реализующих методы случайного поиска минимума функции при многопараметрической оптимизации для создания описываемой подпрограммы SPS были выбраны подпрограммы SPS1 и SPS3 [3].

Подпрограмма реализует метод слепого случайного поиска в автоматически изменяемой окрестности исходной точки.

Пусть $Q(X)$ — минимизируемая скалярная функция, (в нашем случае — ширина частотного диапазона с отрицательным знаком). Вектор $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ — аргументы этой функции, значения которых соответствуют выбранным исходным значениям геометрических размеров отверстия связи волноводного разветвителя и частоте. Каждый набор значений вектора X соответствует некоторой точке в четырехмерном пространстве E .

Отыскивается точка X' , принадлежащая E , в которой функция принимает минимальное значение (ширина частотного диапазона, в котором выполняется условие равенства направленности $3 \pm 0,5$ дБ соответственно максимальное). Предполагается, что X' существует и является единственной в E .

Пусть X_0 — исходная точка. Она выбирается на основании априорной информации о решаемой задаче. Вокруг X_0 строится окрестность, из которой при помощи генератора равномерно распределенных псевдослучайных чисел выбирается новая случайная точка X . Значение функции Q вычисляется в X_0 и X ,

причем, если значение функции в точке X оказывается меньшим, чем в точке X_0 , точка признается удачной и становится новой исходной. Относительно этой точки строится новая окрестность, и процесс продолжается. Если значение Q в точке X больше, чем в точке X_0 , то точка X признается неудачной и из области берется следующая случайная точка. И так до очередной удачной точки. При условии, что размеры окрестности, из которой выбираются случайные точки, превосходят области локальных минимумов по траектории движения поиска, последовательность удачных точек сходится к точке глобального минимума.

Эффективность поиска минимума в большой степени зависит от режима изменения размеров окрестности по мере приближения поисковой точки к минимуму. В [3] утверждается, что минимум находится с наименьшими затратами, если размеры окрестности автоматически поддерживаются такими, что число удачных проб составляет около 25 % от полного их числа. Поэтому в подпрограмме SPS предусмотрены серии испытаний, состоящих из заданного количества проб. При этом подсчитывается число удачных проб и вычисляется их относительное число к числу проб в серии. Если это относительное число больше 0,25, все размеры окрестности увеличиваются в 1,25 раза, а в противном случае — уменьшаются в 0,8 раза.

Прекращение работы подпрограммы SPS возможно в следующих случаях: по заданному числу проб, т. е. поиск продолжается до тех пор, пока не будет превышено заданное максимальное число попыток; по числу удачных проб в серии, если заданное при вызове подпрограммы число удачных проб в серии оказалось меньше заданного числа.

Подпрограмма использует при оптимизации следующие подпрограммы и функции: RRSV — подпрограмма — генератор псевдослучайных равномерно распределенных чисел в интервале $[-1...1]$, которая используется для получения новой точки в окрестности поиска; Q — подпрограмма типа FUNCTION, созданная пользователем, вычисляющая значение минимизируемой функции в текущей точке.

Подпрограмма RRSV является измененным вариантом подпрограммы RANDU, взятой из пакета программ математического обеспечения ЕС ЭВМ. Она позволяет получать псевдослучайные числа из интервала $[-1...1]$. В качестве исходного для L можно взять любое нечетное, но не более чем девятизначное число. В подпрограмме это число берется из памяти по месту загрузки.

Для работы подпрограммы SPS, осуществляющей оптимизацию геометрических размеров отверстия связи необходимо создание подпрограммы типа FUNCTION Q , вычисляющей значе-

ния минимизируемой функции по набору варьируемых параметров.

При получении полосы частотного диапазона, в которой выполняются условия направленности и переходного затухания волноводного ответвителя, в подпрограмме *Q* используется следующий алгоритм.

Все необходимые данные и массивы передаются из основной программы при первом обращении через точку входа *AINIT*, а затем используется точка входа *Q*.

Полученный от подпрограммы оптимизации *SPS* набор геометрических размеров и частота проверяются на соответствие ограничениям интервала поиска (используется метод штрафных функций), а затем вместе с другими необходимыми данными передается в подпрограмму *YHM*, где вычисляются комплексные матрицы проводимостей и сторонних токов. Затем эти матрицы используются при решении матричного комплексного уравнения с помощью подпрограммы *CSIMQ*.

Полученные в результате решения амплитудные коэффициенты снова передаются в подпрограмму *YHM* через точку входа *RASS*, в результате работы которой подпрограмме *Q* передается матрица рассеяния. После этого вычисляются направленность, затухание и другие параметры. Затем производится анализ соответствия полученного значения затухания заданному интервалу допустимого отклонения. Если это условие не выполняется, подпрограмма *Q* передает управление подпрограмме оптимизации для генерации нового набора геометрических размеров и частоты. Если условие выполняется, то включается алгоритм поиска границ частотного диапазона, за пределами которого условие соответствия затухания интервалу допустимого отклонения перестает выполняться. Поиск ведется с достаточно мелким шагом по частоте, а все полученные значения направленности и затухания запоминаются с целью последующего построения их зависимостей на *АЦПУ* при помощи подпрограммы *SUGRP2* после того, как будет найдено заданное количество таких интервалов.

Имеющиеся в математическом обеспечении ЭВМ типа ЕС подпрограммы для построения графиков не удовлетворяют пользователей из-за ограниченных возможностей. С их помощью, например, нельзя строить графики в полярных координатах, затруднен поиск значений координат точек, отсутствуют подписи значений координат под осью абсцисс, ограничено число выводимых графиков, отсутствует координатная сетка и др. Кроме того, построенные с помощью этих подпрограмм графики неудовлетворительны и с эстетической точки зрения.

Этих недостатков лишена описанная в [4] подпрограмма *SUGRP2*, с помощью которой можно получить на *АЦПУ* графические зависимости в переменных координатах (с переменным шагом по обеим координатным осям).

В подпрограмме производится выбор пределов изменения значений каждого графика с последующей их печатью и общих пределов изменения всех графиков, так как в одних координатных осях может быть построено до 60 графических зависимостей. Печатаются также и символы, которыми изображается каждый график, причем если нужно в одних осях получить до шести графиков, то изображаться они будут символами +, *, $\pm$, %, $\times$ &, а если графиков больше, то изображаться они будут практически всеми символами, которые есть на АЦПУ. При пересечении нескольких кривых печататься будет символ последнего из совпавших графиков. Так как часто не известно, в каких пределах меняются значения функций, выбор масштаба построения осуществляется автоматически.

Для удобства поиска значений координат точек в подпрограмме строится координатная сетка, вычерчиваются оси координат и подписываются их числовые значения.

В вызывающей программе должны быть обеспечены массивы с исходными данными. Количество строк в массивах должно соответствовать количеству графиков.

Все подпрограммы были написаны на языке программирования ФОРТРАН, отлажены и использовались на ЭВМ типа ЕС.

Список литературы: 1. Тиховский В. Ю., Пащенко Ж. Ф., Пироженко В. К. Автоматизированное проектирование волноводных шелевых мостов. Сообщение 1. Математическая модель шелевого H -моста//Радиотехника. 1987. Вып. 84. С. 8—13. 2. Сборник научных программ на ФОРТРАНЕ. Вып. 2. Матричная алгебра и линейная алгебра. М. 1974. 224 с. 3. Пакет программ для ЕС ЭВМ по статистической оптимизации и оценке их эффективности/Ф. Н. Ясинский, Л. С. Кустачева, Т. М. Романова и др.//Численные методы и их реализация на ЭВМ: Межвузов. сб. науч. тр. Иваново, 1979. С. 122—169. 4. Автоматизированное проектирование систем сильно связанных резонаторов, содержащих токонесущие элементы. Ч. 2. Разработка алгоритма и программ для расчета и оптимизации параметров идеальных резонаторов/А. И. Терешенко, Ж. Ф. Пащенко, П. В. Нешмонин, В. Ю. Тиховский//Радиотехника. 1981. Вып. 63. С. 104—109.

Поступила в редколлегию 10.12.87