

П. В. НЕШМОНИН, В. Ю. ТИХОВСКИЙ

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ
СВЯЗАННЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ
ТОКОНЕСУЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ**

СООБЩЕНИЕ 1.

В устройствах и приборах СВЧ широкое применение находят системы резонаторов, связанных через отверстия и возбуждаемых штырями, петлями или электронными потоками. Так, использование систем из связанных резонаторов в генераторных, усилительных, преобразовательных и других клистродах дает возможность управлять их частотными характеристиками и электрическим режимом. Например, применение систем из слабо связанных резонаторов (связи меньше критических) позволяет расширить полосу пропускания усилительных клистронов [1], увеличить диапазон электронной настройки генераторных клистронов [2]. При сильных связях (больше критических) между резонаторами система имеет несколько собственных резонансных частот (по числу резонаторов) [2]. При этом в качестве рабочей выбирается одна из собственных частот системы (режимы перестройки и стабилизации частоты автогенераторов), а потери для остальных искусственно увеличиваются [3]. В иных случаях используют все рабочие частоты системы. Примерами могут слу-

жить многочастотные генераторы, преобразовательные клистроны с избирательной частотной характеристикой на несущей и боковой частотах усиливаемого сигнала, усилители с оптимизированной группировкой электронного потока, у которых собственные частоты связанной системы резонаторов разнесены настолько сильно, что совпадают с частотами гармоник основного усиливаемого сигнала.

В различных типах клистронов и для разных целей применяются системы связанных резонаторов, соединенных последовательно, «звездой», кольцом. Так, использование цепочки последовательно связанных резонаторов целесообразно [2; 3] для однолучевых и в некоторых случаях для двухлучевых конструкций клистронов. При этом реализуется многополосная частотная характеристика с равными полосами пропускания и усилением на каждой из частот.

В связи с сильным влиянием связанных резонансных систем на частотные характеристики и электрический режим клистронов особое значение приобретает знание их параметров (спектра частот, структуры поля, добротности, проводимостей), зависимости от геометрии системы и возможность управления этими параметрами. Наиболее полно и с необходимой точностью такая задача может быть решена при электродинамическом подходе только с помощью ЭВМ.

Рассмотрим автоматизированное проектирование системы прямоугольных резонаторов, соединенных последовательно, связанных через прямоугольные отверстия в торцах и содержащих токонесущие элементы (*штыри*). В общем случае такая система представляет собой N резонаторов, любой из которых может содержать сторонний источник j_{ct}^{RN} и проводник с плотностью тока j_N . Токонесущие элементы допустимо располагать в любой точке широкой стенки резонаторов, отверстия связи могут иметь разные размеры и находиться в произвольном месте поперечного сечения.

Для расчета такой системы применим матричный метод [4], позволяющий получить спектр частот, выражения для составляющих поля, добротности, учитывая при этом влияние элементов ввода и вывода энергии и не упрощая существенно изучаемого устройства. Разбив систему на частичные области и записав уравнения непрерывности поля на границах, получаем систему интегральных уравнений. Для ее решения используем метод Галеркина, выбирая на отверстиях связи полную систему координатных функций. В итоге задача сводится к неоднородному матричному уравнению, решение которого позволяет определить амплитудные коэффициенты, затем — структуру поля, добротности, а также спектр частот.

Матричное уравнение для определения неизвестных амплитудных коэффициентов в разложении в ряд поля на отверстиях для описанной системы имеет вид

$$\begin{pmatrix}
 Y_{m_1 l_1}^{R_1} + Y_{m_1 l_1}^{R_2} & Y_{m_1 l_2}^{R_2} & \dots & 0 & N_{m_1 \rho_1}^{R_1} & N_{m_1 \rho_2}^{R_2} & \dots & 0 \\
 Y_{m_2 l_1}^{R_2} & Y_{m_2 l_2}^{R_2} + Y_{m_2 l_3}^{R_3} & \dots & 0 & 0 & N_{m_2 \rho_2}^{R_2} & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \dots & Y_{m_{N-1} l_{N-2}}^{R_{N-1}} & Y_{m_{N-1} l_{N-1}}^{R_{N-1}} & Y_{m_{N-1} l_{N-1}}^{R_N} & 0 & N_{m_{N-1} \rho_{N-1}}^{R_{N-1}} & N_{m_{N-1} \rho_N}^{R_N} \\
 N_{q_1 l_1}^{R_1} & 0 & \dots & 0 & Z_{q_1 \rho_1}^{R_1} & 0 & \dots & 0 \\
 N_{q_2 l_1}^{R_2} & N_{q_2 l_2}^{R_2} & 0 & 0 & 0 & Z_{q_2 \rho_2}^{R_2} & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \dots & 0 & N_{q_N l_{N-1}}^{R_N} & 0 & 0 & \dots & Z_{q_N \rho_N}^{R_N}
 \end{pmatrix} \times
 \begin{pmatrix}
 e_{l_1} \\
 e_{l_2} \\
 \vdots \\
 e_{l_N} \\
 h_{\rho_1} \\
 h_{\rho_2} \\
 \vdots \\
 h_{\rho_N}
 \end{pmatrix} =
 \begin{pmatrix}
 h_{m_1 \text{сг}}^{R_1} + h_{m_1 \text{сг}}^{R_2} \\
 h_{m_2 \text{сг}}^{R_2} + h_{m_2 \text{сг}}^{R_3} \\
 \vdots \\
 h_{m_{N-1} \text{сг}}^{R_{N-1}} + h_{m_{N-1} \text{сг}}^{R_N} \\
 e_{q_1 \text{сг}}^{R_1} \\
 e_{q_2 \text{сг}}^{R_2} \\
 \vdots \\
 e_{q_N \text{сг}}^{R_N}
 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Выражения в общем виде для каждого члена уравнения представлены в работе [4]. Для вывода формул, позволяющих получить численные значения каждого элемента матриц, необходимо выбрать полные системы собственных векторных функций невозмущенных резонаторов H_{ν}^{RN} , ϵ_{ν}^{RN} , координатных функций на отверстиях связи $\bar{\epsilon}_i$ и координатных функций распределения объемной плотности тока в проводниках M_{ρ_N} . Кроме того, следует задать сторонние источники $j_{\text{сг}}^{RN}$ и определить спектр частот системы.

Собственные векторные функции резонаторов образуются на основе скалярных собственных функций ψ_e , ψ_h некоторого двумерного самосопряженного оператора на поверхности поперечного сечения [5]. В качестве координатных целесообразно выбирать такую последовательность функций, которые удовлетворяют краевым условиям на контуре отверстия связи. Данную систему можно построить на основе решения мембранных уравнений для поверхности отверстия S_i :

$$\nabla^2 \psi_{e,h} + \chi_{e,h}^2 \psi_{e,h} = 0,$$

удовлетворяющих на контуре граничным условиям $\frac{\partial \psi_h}{\partial n} = 0, \psi_e = 0$

где $\frac{\partial \psi_h}{\partial n}$ — производная по нормали к границе поверхности S_j ; $\alpha_{e,h}$ — характеристические постоянные задачи.

Касательное электрическое поле на отверстии можно представить следующей последовательностью функций, принадлежащих к полной системе [5]:

$$\vec{E}_{\tau i} = \sum_h e_h \vec{\epsilon}_h + \sum_e e_e \vec{\epsilon}_e = \sum_{l_i=1}^L e_{l_i} \vec{\epsilon}_{l_i}.$$

Здесь $\vec{\epsilon}_h = [\nabla \psi_h \vec{n}]$, $\vec{\epsilon}_e = \nabla \psi_e$ — для H -и E -волн. Для прямоугольного отверстия

$$\psi_h = \sqrt{\frac{2 - \delta_{0m}}{a_{св}} \frac{2 - \delta_{0n}}{b_{св}}} \cos \frac{m\pi x}{a_{св}} \cos \frac{n\pi y}{b_{св}};$$

$$\psi_e = \frac{2}{\sqrt{a_{св} b_{св}}} \sin \frac{m\pi x}{a_{св}} \sin \frac{n\pi y}{b_{св}};$$

$$\alpha_{e,h} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a_{св}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b_{св}}\right)^2}; \quad \delta_{0j} = \begin{cases} 1, & j = 0; \\ 0, & j \neq 0, \end{cases} \quad j = (m, n).$$

Электродинамическая задача о распределении тока в штыре, возбуждающем резонатор, приводит к интегральному уравнению с ядром в виде двойного бесконечного ряда, происхождение которого связано с разложением электромагнитного поля в резонаторе по множеству его собственных функций. Получение решения представляет значительные математические трудности. Поэтому воспользуемся приближением, основанным на понятии относительно тонкого штыря ($2r/a \leq 0,15 - 0,2$), для которого принимаем, что ток распределен вдоль штыря по закону [6] $\vec{M}_{pN} = \cos kh - \cos ky$, где h — длина штыря в резонаторе. Кроме того, такое приближение позволяет в формулах для частичных сопротивлений Z_{qNpN}^{RN} , коэффициентов трансформации N_{mN-1pN}^{RN} и N_{qN1N-1}^{RN} и задающих напряжений e_{qNct}^{RN} перейти от объемных интегралов к линейным, что существенно упрощает расчет.

Учет стороннего тока в резонаторе должен производиться в предположении, что отверстия связи металлизированы и проводники с током из объема удалены. Тогда можно задать источник стороннего тока в виде проводника с линейным током, плотность которого \vec{j}_{ct}^{RN} представляет собой произведение известной амплитуды I_m и функции $\vec{M}_{pN} = \cos kh - \cos ky$.

Таким образом, по описанной методике были получены выражения в развернутом виде для каждого члена матричного уравнения, позволяющие численно рассчитать все элементы матрицы с необходимой точностью. Отметим, что суммирование в рядах (7)—(11) проведено по всем частным решениям, которые могут существовать в резонаторе [4]. В соответствии с этим для прямоугольных резонаторов с идеально проводящими стенками каждый из членов матричного уравнения представляет собой сумму по собственным значениям H - и E -полей и собственным значениям градиентного магнитного поля.

Необходимо указать, что собственные и взаимные клетки матрицы в левой части уравнения (1) — проводимости и коэффициенты трансформации — состоят из собственных и взаимных клеток, характеризующих взаимодействие единичных полей $e_{l_i} e_{l_j}$ принадлежащих рассматриваемому i -му отверстию, т. е.

$$Y_{m_i l_j}^{RN} = \begin{bmatrix} Y_{1_i 1_j}^{RN} & Y_{1_i 2_j}^{RN} & \dots & Y_{1_i L_j}^{RN} \\ \vdots & & & \vdots \\ Y_{L_i 1_j}^{RN} & \dots & \dots & Y_{L_i L_j}^{RN} \end{bmatrix}.$$

Задающие токи представляют собой матрицу-столбец

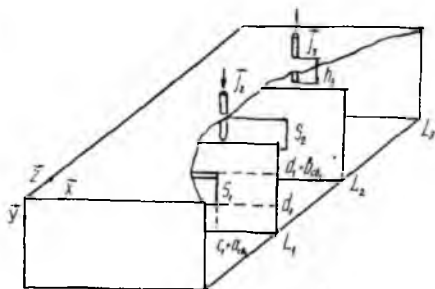
$$h_{m_i ct}^{RN} = \begin{bmatrix} h_{1ct}^{RN} \\ \vdots \\ h_{L_i ct}^{RN} \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим определение спектра частот системы, т. е. набора собственных волновых чисел $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$. Если исследовать невозмущенную систему связанных резонаторов (задающие токи и напряжения отсутствуют), то уравнение превратится в однородное, решение которого существует при равенстве нулю определителя системы. Из этого условия находим спектр частот невозмущенной системы, а тем самым и область существования корней неоднородной системы алгебраических уравнений, описывающих систему со штырями. Собственно же корни (набор k) получим в результате решения задачи оптимизации. Критерием оптимальности служит бесконечное возрастание амплитудных коэффициентов в разложении электромагнитного поля в резонаторе по собственным функциям, что является следствием резонанса в системе.

Для реализации описанного алгоритма был создан комплекс программ, объединенных в систему автоматизированного проектирования, которую в функциональном плане можно разделить на две взаимозависимые подсистемы — моделирующую и расчетную. Моделирующая подсистема, написанная на языке PL/I, обеспечивает: ввод исходных данных, описывающих реальную физическую модель (геометрические размеры, координаты располо-

жения штырей и отверстий связи); проверку корректности введенных данных и диалоговое исправление ошибок при вводе; анализ достаточности исходных данных для работы алгоритма; динамическое формирование массивов комплексных матриц (проводимостей, столбца задающих токов, амплитудных коэффициентов) и массивов для хранения типов колебаний, рабочего массива для хранения промежуточных вычислений и др.

В функции расчетной подсистемы, написанной на Фортране, входят вычисления значений проводимостей, сопротивлений, задающих токов, коэффициентов трансформации и заполнение комплексных матриц проводимостей и задающих токов; решение однородного комплексного матричного уравнения в целях нахождения спектра собственных частот системы, которая реализуется при помощи специальных подпрограмм вычисления комплексного определителя и поиска корня комплексного трансцендентного уравнения; решение неоднородного матричного уравнения с целью нахождения амплитудных коэффициентов и оптимизации волнового числа k .



После окончания полного цикла расчета управление снова передается моделирующей подсистеме, которая или завершает проектирование, или переходит в режим активного диалога для внесения любых изменений в физическую модель. После этого цикл повторяется.

В работе исследована система прямоугольных резонаторов с поперечным сечением 23×10 мм, связанных через прямоугольные отверстия в торцах и содержащих активный (во втором резонаторе) и пассивный (в третьем) штыри (рисунок). Длина отверстий связи $a_{св} = d - c$ изменялась от 5 до 23 мм с шагом 5 мм, ширина $b_{св} = Y_2 - Y_1$ — от 1 до 10 мм с шагом 2 мм. Глубина погружения штырей составляла 3,6 и 9 мм. Количество учитываемых собственных единичных полей на отверстиях связи изменялась от 1 до 5, а собственных типов колебаний в резонаторах — от 1 до 100.

Проведены экспериментальные исследования системы, включающие в себя панорамное измерение $K_{ст U}$ и ослабления с помощью панорамного измерителя Р2-61 с целью предварительной оценки частотного спектра системы и точный метод измерения $K_{ст U}$ и добротности — метод передачи.

Рассматриваемая задача решена в строгой электродинамической постановке с использованием систем базисных функций, учитывающих высшие типы колебаний. Совпадение выходных характеристик с результатами экспериментов свидетельствует о правильности полученных результатов и разработанных алгоритмов.

Список литературы: 1. *Лебединская А. Д.* Патенты США, № 3012170, № 2934672, № 3028519, № 3248594//Обзоры по электрон. технике. Сер. Электроника СВЧ. — 1970. — Вып. 7 (194). — С. 97—101. 2. *Зырин С. С.* Колебательные системы из связанных контуров для многочастотных клистронов//Электрон. техника. Сер. 1. — 1972. — Вып. 3. — С. 53—61. 3. *Артемьев С. М., Зырин С. С., Русаков В. Н.* Качественное сравнение различных схем многоконтурных пролетных автогенераторов с точки зрения возможности стабилизации и перестройки частоты//Электрон. техника. Сер. 1. — 1970. — Вып. 9. — С. 55—65. 4. *Терещенко А. И., Пащенко Ж. Ф., Тиховский В. Ю.* Автоматизированное проектирование систем сильно связанных резонаторов, содержащих токонесущие элементы. Часть 1. Выбор математической модели//Радиотехника. — 1981. — Вып. 58. — С. 27—31. 5. *Машковцев В. М., Цибизов К. Н., Емелин Б. Ю.* Теория волноводов. — М.: Наука, 1966. — 351 с. 6. *Chang K., Khan P. J.* Analysis of a narrow capacitive strip in waveguide//IEEE Trans. MTT-22, May 1974. — P. 25—28.

Поступила в редколлегию 06.05.86