МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЗОНАТОРНЫХ СВЧ-ПРИБОРОВ О-ТИПА

Г. М. Антонова, В. В. Базуткин, А. Ю. Байков (Москва)

Мощные вакуумные резонаторные сверхвысокочастотные приборы (СВЧ-приборы) О-типа (ordinary type), такие как клистрон, клистрод и т.п., применяются для получения высоких уровней мощности (до сотен мегаватт) в СВЧ-диапазоне частот от сотен мегагерц до десятков гигагерц. Они широко используются в системах радиолокации и дальней радиосвязи, в СВЧ-энергетике (объемный нагрев), в ускорительной технике (питание мощных ускорителей, включая коллайдеры) и во многих других областях.

При разработке таких приборов на стадии аванпроекта, включающего выбор конструкции и определение численных значений параметров выбранной конструкции, широко используется компьютерное моделирование. Для клистронов основными параметрами конструкции являются пролетные длины (расстояния между зазорами резонаторов), собственные частоты и добротности резонаторов. Они должны быть такими, чтобы обеспечить необходимые выходные характеристики прибора, в первую очередь – максимальный коэффициент полезного действия (КПД) в заданной полосе частот при заданном уровне входной мощности.

Задача оптимизации параметров клистрона имеет следующие особенности:

1) значительная размерность пространства входных параметров;
2) большое число параметров оптимизации (20–30 и более);
3) векторная форма критерия оптимизации, т.е. многокритериальный характер задачи оптимизации;
4) негладкий характер компонент векторной целевой функции, наличие значительного числа локальных экстремумов;
5) сравнительно большое время расчета одного значения целевой функции и статистические ошибки, например, из-за конечной точности расчета;
6) необходимость экспериментального определения области допустимых значений входных параметров в связи со сложным характером зависимости выходных параметров от входных.

В качестве основной целевой функции используется КПД в заданной полосе. При конструировании векторной целевой функции в качестве дополнительных компонент используются дисперсия и асимметричность КПД в заданной полосе. Для дополнительных компонент целевой функции в первую очередь отслеживается их попадание в заданный диапазон.

$ЛП_\tau$-поиск с усреднением [1–4] позволяет находить приближенные решения задач оптимизации динамических стохастических систем, для которых оптимальное решение представляет собой область в пространстве параметров, функцию или множество значений. Примеры задач, решенных с использованием оптимизационно-имитационных методов и методики $ЛП_\tau$-поиска с усреднением, рассмотрены в [4,5]. Раасмотрим еще одну возможность поиска приближенного решения оптимизационной задачи с использованием $ЛП_\tau$-поиска с усреднением.

Для описания функционирования клистрона созданы разные виды моделей, но их можно разделить на две группы: аналитические и численные. В существующих моделях не учитывается стохастический характер процессов, происходящих при взаимодействии электронов с электромагнитным полем. Нелинейный характер зависимости значений выходных параметров (КПД, амплитудно-частотной характеристики, скоростей электронов и др.) от входных (количества каскадов, размеров зазоров резонаторов, длин труб дрейфа, расстроек, волновых сопротивлений, добротностей, входных мощностей и т.д.) приводит к тому, что область определения входных параметров оценивается по результатам расчёта выходных параметров. Эта особенность затрудняет процесс конструирования прибора и усложняет поиск оптимальных значений параметров СВЧ-прибора.

Аналитические модели можно построить после наложения ряда ограничений. Точность таких моделей, естественно, высока, но область допустимых значений входных параметров невелика. Скорость расчета выходных параметров при использовании стандартных процедур решения уравнений на несколько порядков выше скорости расчета с использованием численных моделей.

Численные модели опираются на метод крупных частиц и численно- разностные методы расчета электрических полей. Скорость расчета для таких моделей снижается за счет увеличения количества численных процедур, необходимых для обеспечения заданной точности результата.

Известен ряд работ, посвященных классу моделей, названных дискретно-аналитическими [6–8]. Эти модели описывают пролетные клистроны, в которых в результате взаимодействия потока электронов с электромагнитным полем малая модуляция скорости электронов преобразуется в глубокую модуляцию плотности потока электронов. Этот поток проходит через последовательность зазоров резонаторной системы и труб дрейфа, усиливается и обеспечивает на выходе прибора значительное увеличение приложенной мощности.

Первое ограничение, наложенное на уравнения, описывающие клистрон, связано с одномерным пространством координат. Очевидно, что поток электронов в трехмерном пространстве резонаторов и труб отличается от одномерной проекции, но сложность уравнений в трехмерном пространстве резко возрастает, при этом свойства создаваемой конструкции оцениваются медленно и эффект от перехода к точной модели прибора падает.

Клистрон представляется как последовательность идентичных каскадов. Каскад включает один резонатор с зазором и одну трубу дрейфа. Поток электронов проходит через зазор с возбуждением резонатора, а затем проходит через трубу дрейфа.

В трубе дрейфа в сечении выполняется усреднение, поток электронов превращается в одномерный поток «усредненных частиц». Из уравнения Лоренца в результате усреднения по сечению в нерелятивистском приближении получаем уравнение движения

$$\frac{d^2 z(t,t_0)}{dt^2} = \frac{e}{m} E_e(z,t), \tag{1}$$

где функция $z(t,t_0)$ описывает текущую координату; t – текущее время; t_0 – время прибытия частицы на вход первого зазора, когда пучок еще однороден; $E_e(z,t)$ – напряженность поля пространственного заряда, определяемая по функции Грина для трубы.

Напряженность поля пространственного заряда

$$E_e(z,t) = \frac{\partial}{\partial z} \int_{-\infty}^{\infty} G(z-z')\rho(z',t)dz', \tag{2}$$

где $G(z-z')$ – одномерная функция Грина, полученная после усреднения трехмерной функции Грина по сечению пучка; $\rho(z,t)$ – плотность заряда.

Если порядок следования частиц не нарушается, функция $z(t,t_0)$ рассматривается как монотонная функция параметра t_0, справедливо

$$\rho(t,t_0) = \frac{-j_0}{\partial z(t,t_0)/\partial t}, \tag{3}$$

где j_0 – плотность тока в однородном пучке.

Система уравнений (1), (2), (3) дает описание движения потока электронов через трубу дрейфа без учета обгона одних частиц другими.

С учетом обгона система уравнений включает (1) и уравнение (2), переведенное в Лагранжеву систему координат:

$$E_e(t,t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{G}[z(t,t_0) - z(t,t_0')]dt_0, \tag{4}$$

где $\overline{G}$ – производная функции G по сложному аргументу.

Начальные условия включают время появления частицы на входе данной трубы дрейфа t_0 и скорость частицы в этот момент $\nu_1(t_0)$.

Для вывода уравнения движения потока электронов в зазоре СВЧ напряжение *u(t)* представляется в виде

$$u(t) = \sum_{k=k_1}^{k_g} U_k \exp(ik\omega t), \tag{5}$$

где k_1 – номер основной рабочей гармоники, т.е. 1 или 2; k_g – номер последней учитываемой гармоники; U_k – комплексная амплитуда *k*-й гармоники; ω – СВЧ-частота; *t* – текущее время; *i* – мнимая единица.

В предположении о том, что в результате решения электродинамической задачи известно пространственное распределение СВЧ-поля в зазоре как функция $\psi(t)$, выражение напряженности СВЧ-поля в зазоре будет иметь вид

$$E_z(z,t) = \frac{u(t)\psi(t)}{d}, \tag{6}$$

где *d* – протяженность зазора.

Уравнение движения частиц в зазоре

$$\frac{d^2 z(t,t_0)}{dt^2} = \frac{e}{m}[E_z(z,t) + E_e(z,t)], \tag{7}$$

где $E_e(z,t)$ определяется из уравнения (2), если предположить, что протяженность зазора мала по сравнению с трубой дрейфа и примерно равна диаметру трубы.

Для определения величин U_k уравнение возбуждения резонатора записывается в виде

$$U_k = Z_k(I_e + I_{in}), \tag{8}$$

где I_{in} – комплексная амплитуда внешнего возбуждающего тока (входной резонатор); Z_k – импеданс резонатора на k-й гармонике;

$$I_e = \frac{1}{2\pi d}\int_0^d dz\psi(t)\int_{-\pi}^{\pi} d(\omega t_0)\exp(ik\omega t(z,t_0)) - \tag{9}$$

комплексная амплитуда тока пучка, полученная после усреднения по зазору и разложения в ряд Фурье мгновенной силы тока $I(z,t)$, оцениваемой с помощью функции $t(z,t_0)$.

Таким образом, в одномерной системе координат полное описание взаимодействия потока электронов с электромагнитным полем в резонаторе дают уравнения (2), (6), (7), (8), (9).

В многорезонаторной системе зазоры одиночных резонаторов разделяются трубами дрейфа и электродинамически связаны между собой. Все резонаторы возбуждаются одновременно, а токи определяются исходя из описания изменения пучка по мере его движения. Можно использовать вышеприведенные уравнения, но смысл переменных изменяется с учетом изменения структуры устройства. Например, Z_k становится комплексной матрицей размерности $n\times n$.

В дискретно-аналитической модели описываются единым образом как одноазорные, так и многозазорные приборы. $ЛП_\tau$-поиск используется для преодоления трудностей, связанных с расходимостью итерационных процедур расчета СВЧ-напряжений.

При оптимизации методом зондирования в точках $ЛП_\tau$- последовательности в специально созданной программе KlyP указываются параметры оптимизации, задаются диапазоны их изменения, вид и размерность целевой функции, количество проб и количество сохраняемых лучших вариантов. При оптимизации учитываются только корректные точки – для них анализируются значения целевой функции. Заданное количество лучших вариантов сохраняется. В результате определяются параметры, обеспечивающие требуемый вид амплитудно-частотной характеристики клистрона.

Исследование процессов группирования и отбора энергии при помощи комплекса программ KlyP позволило синтезировать перспективные конструкции клистрона. Скорость расчета оказалась на один–два порядка выше скорости расчета для существующих численных моделей. Модель позволяет для разных каскадов прибора выбирать разное количество сечений разбиения. Поскольку точность расчета зависит от размеров парциальных зазоров и труб, можно добиться компромисса между скоростью и точностью расчета, изменяя эти размеры.

Оптимизационно-имитационные методы исследования, основанные на сеточных методах зондирования и гибких дискретно-аналитических моделях, позволяют описать и исследовать различные СВЧ-приборы О-типа и обеспечивают создание конструкций с хорошими характеристиками.

Литература

1. **Антонова Г.М.** Идентификационный подход в исследовании стохастических систем, представленных имитационными моделями//2-я Международная конференция “Идентификация систем и задачи управления”. Научные труды. – М., 2003. –С. 2125–2138.
2. **Антонова Г.М.** Методика $ЛП_\tau$-поиска с усреднением для исследования динамических стохастических систем, представленных имитационными моделями. –М., 2000 (Препринт/Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН). – 76 с.
3. **Антонова Г.М.** Параллельный алгоритм для исследования динамических стохастических процессов или систем, представленных имитационными моделями//Труды международной конференции "Параллельные вычисления и задачи управления (PACO`2001)". – М., 2001. – Т. 3. –С. 30–41.
4. **Антонова Г.М.** $ЛП_\tau$-поиск с усреднением как новая технология поиска рациональных решений//Приложение к журналу "Информационные технологии". – 2001. – № 6. – С. 1–24.
5. **Antonova G.M.** LP_τ-search with averaging for stochastic system study//Proceedings of the international conference “Automation, Control and Information Technology”. – Novosibirsk, 2002. – P. 245–250.
6. **Артюх И.Г., Байков А.Ю., Петров Д.М.** Высокоэффективные пролетные клистроны//Тезисы докладов Международной конференции, посвященной Дню радио. – М., 1997.
7. **Байков А.Ю., Петров Д.М.** Проблемы создания мощных и сверхмощных клистронов с высоким КПД//Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения". – Саратов: СГТУ, 1998. – Т. 1. – С. 56–58.
8. **Байков А.Ю., Петров Д.М.** Мощные широкополосные клистроны с высоким КПД (методика синтеза и результаты)//Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения". – Саратов, 1996. –Ч. 1. – С. 22–23.