

## Повышение информативности контроля параметров колебательной системы магнетрона на низком уровне мощности

К. И. ЧИСТЯКОВ, А. А. ГУРКО

Владыкинский механический завод, Москва, Россия, e-mail: tesla.rus@gmail.com

*Предложен способ косвенной оценки разрушения спектра пространственных гармоник высокочастотного поля замедляющей системы магнетрона, позволяющий в процессе производства своевременно обнаруживать признаки возникновения дефектов колебательной системы магнетрона, приводящих к образованию скрытого брака по коэффициенту полезного действия.*

**Ключевые слова:** магнетрон, пространственные гармоники, резонаторная система.

*The indirect method of estimation destruction of spatial harmonics spectrum of high frequency field of magnetron slow-wave structure allowing to timely detect the occurrence of magnetron oscillatory system hidden flows of efficiency during manufacturing is suggested.*

**Key words:** magnetron, spatial harmonics, resonator system.

Предложение использовать в магнетроне режим взаимодействия электронного потока с пространственной гармоникой колебаний дублетного вида открыло путь к интенсификации освоения миллиметрового диапазона длин волн приборами М-типа и, в первую очередь, к продвижению в его коротковолновую часть. В 1984 г. в СССР (ОАО «Плутон», Москва) разработан первый и до сих пор единственный в мировой практике серийный магнетрон двухмиллиметрового диапазона с термоэлектронным катодом и рекордным уровнем выходной мощности.

Цель данной статьи — проинформировать разработчиков магнетронов миллиметрового диапазона о способе косвенной оценки разрушения спектра пространственных гармоник высокочастотного поля замедляющей системы магнетрона, позволяющем в процессе производства своевременно обнаруживать признаки возникновения дефектов его колебательной системы, приводящих к образованию скрытого брака по коэффициенту полезного действия (КПД).

Согласно [1] стабильность работы магнетрона и воспроизводимость его параметров при серийном производстве зависит от многих факторов, из которых выделяются точность изготовления резонаторной системы и совершенство методов контроля ее параметров. Очевидно, имеется в виду контроль степени влияния отклонения номинальных размеров колебательной системы на ее параметры в случае низкого уровня мощности.

При проектировании магнетрона ожидаемый контурный КПД  $\eta_k$  определяется на основании расчетных значений собственной добротности  $Q_0$  и сопротивления, вносимого выводом энергии, а электронный КПД  $\eta_e$  — на базе параметров пространства взаимодействия и удаления рабочей точки по магнитному полю от параболы критических режимов [2]. Технологическим процессом серийного производства магнетрона предусмотрен (на разных его стадиях) только контроль параметров резонансной кривой рабочего вида колебаний, чего недостаточно для прогнозирования  $\eta_e$ .

Декларируемое в литературе влияние отклонения от «симметричной» картины распределения в пространстве

взаимодействия высокочастотного поля на уменьшение  $\eta_e$  не подтверждается в процессе изготовления магнетрона. Попытки определять асимметрию высокочастотного поля пространства взаимодействия зондовым способом с последующей корреляционной оценкой работоспособности магнетрона оказались настолько субъективными, что в современной практике разработки и производства магнетронов этот способ практически не применяется.

Параметры технологических неоднородностей при случайном их количестве и расположении нереально регламентировать как вследствие множества вариантов, так и из-за практической невозможности идентификации системы с расчетной. Несостоятельность подобного подхода к выработке критериев количественной оценки влияния предельных отклонений размеров элементов резонаторной системы на эффективность работы магнетрона подтверждается в [1, гл. 5]. Кроме того, из практики известно, что во многих магнетронах, которые соответствуют техническим условиям, использовали резонаторные системы с отклонениями размеров, иногда значительно превышающими предельно допустимые.

Нарушение однородности резонаторной системы отражается на добротности  $Q_0$  лишь в случае появления гармоники, способной существенно увеличить потери излучения с торцевых плоскостей замедляющей системы. Эту функциональную связь реально удается наблюдать для разнорезонаторной системы и только в случае частичной трансформации нуль-составляющей высокочастотного поля в волну  $H_{11}$ .

Конструкция вывода энергии, как показал анализ [3], также может быть весомой и практически неконтролируемой причиной скрытого брака при производстве магнетронов в случае рассогласования рабочего диапазона вывода энергии с частотой генерации. Часто вывод энергии вносит в резонаторную систему возмущение, превышающее технологические неоднородности ее изготовления. Поэтому не только желательна, но и необходима селективная оценка роли вывода энергии и неоднородностей резонаторной системы в возмущении структуры высокочастотного поля пространства взаимодействия.

Существующие инженерные способы расчета [1] не позволяют определить геометрическую длину трансформатора сопротивления, соответствующую четвертьволновой электрической, и его рабочую частотную полосу. При отличии номинальной геометрической длины трансформатора от четвертьволновой электрической увеличивается влияние допусков отклонения геометрических размеров на реактивную составляющую вносимого сопротивления. Происходящее при этом разрушение спектра пространственных гармоник приводит к уменьшению амплитуды синхронной (рабочей) гармоники и, как и в случае неоднородной резонаторной системы, сопровождается падением  $\eta_{\text{э}}$  (вплоть до нестабильной генерации рабочего вида колебаний). Экспериментальная корректировка расчетной длины трансформатора по результатам оценки выходных параметров магнетрона весьма сложна и трудоемка вследствие их зависимости от большого количества факторов.

Предложенные в [4] способы оценки рабочей полосы четвертьволнового трансформатора помогают проводить экспресс-контроль параметров вывода энергии в процессе изготовления магнетрона по принципу «годен—негоден» с критерием степени разрушения спектра пространственных гармоник однородной системы. Этот параметр имеет наибольшую чувствительность к реактивной составляющей вносимого вывода энергии сопротивления и легко поддается оценке при низком уровне мощности.

В качестве меры разрушения спектра пространственных гармоник предлагается принять изменение резонансной частоты  $f_0$  вида колебаний при постановке катода. В однородной равнорезонаторной системе она определяется долей основной волны в суммарном высокочастотном поле контролируемого вида колебаний в пространстве взаимодействия, а для вида  $N/2$  разнорезонаторной системы — нуль-составляющей высокочастотного поля. В системе с неоднородностями доля этих волн в интегральном поле уменьшается, как и изменение резонансной частоты при постановке катода (или его имитатора). Изменение резонансной частоты от постановки имитатора катода уменьшается с увеличением разрушения спектра пространственных гармоник как технологическими неоднородностями, так и реактивностью вывода энергии. Если вывод энергии вносит в пределах частотной полосы чисто активное сопротивление, то коэффициент стоячей волны по напряжению  $K_0$  при резонансе остается неизменным в процессе перестройки резонансной частоты в указанных пределах имитатором катода. При постановке последнего изменение резонансной частоты характеризует степень отклонения резонаторной системы от однородной, а изменение  $K_0$  свидетельствует об ином характере вносимого сопротивления. Путем набора экспериментальных результатов можно выработать критерий, позволяющий по оценке приращения резонансной частоты при установке имитатора катода выяснить природу неоднородности и разделить колебательные системы на годные и негодные.

По очевидным причинам количественное значение критерия допустимого разрушения спектра пространственных гармоник не может быть универсальным и должно определяться для каждого типа магнетрона в процессе проведения опытно-конструкторских работ. Очевидно также, что конструктивные изменения колебательной системы магнетрона, влекущие за собой изменение интенсивности и характера распределения высокочастотного поля в пространстве

взаимодействия, должны сопровождаться оценкой необходимости корректировки диаметра имитатора катода.

Для расчета приращения частоты при постановке имитатора катода в неоднородную резонаторную систему воспользуемся начальными условиями из [5] с тем исключением, что амплитуда высокочастотного поля на границе резонатора со стороны пространства взаимодействия считается неизвестной и равной  $E_q$  для резонатора с номером  $q$ . В результате получается система линейных однородных уравнений, которая записывается в матричном виде

$$\|R_{p,q} + \sigma_{p,q}\|E_q = 0, \quad (1)$$

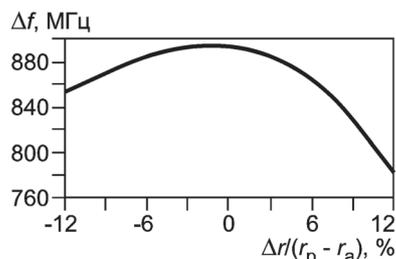
$$\text{где } R_{p,q} = \frac{1}{NY_p^{\text{ЛР}}} \sum_{k=0}^{N-1} \left( e^{j\frac{2\pi}{N}k(p-q)} Y_k^{\text{ОРС}} \right); p, q — \text{индексы строки и столбца в матрице; } \sigma_{p,q} — \text{символ Кронекера; } N — \text{число резонаторов; } Y_p^{\text{ЛР}} — \text{проводимость лопаточного резонатора (ЛР), определенная в [5]; } Y_k^{\text{ОРС}} — \text{проводимость пространства взаимодействия однородной резонаторной системы (ОРС) для вида колебаний } k, \text{ полученная в [5].}$$

Система уравнений (1) имеет ненулевое решение тогда и только тогда, когда выполняется условие, которое фактически является дисперсионным уравнением неоднородной резонаторной системы:

$$\det \|R_{p,q} + \sigma_{p,q}\| = 0. \quad (2)$$

Этот метод реализован в программе [6], по которой были рассчитаны приращения частоты неоднородной резонаторной системы при постановке катода. На рисунке приведена зависимость приращения частоты резонаторной системы при постановке имитатора катода с неоднородностью в виде изменения радиуса  $r_p$  периферийной стенки резонатора. Параметры резонаторной системы: количество резонаторов  $N = 32$ , номер рабочего вида колебаний  $n = 6$ , радиус анода  $r_a = 1,6$  мм, радиус катода  $r_k = 1,0$  мм.

Таким образом показано, что предложенный метод контроля позволяет определять резонаторные системы магнетрона с браком на ранних этапах производства. Следует отметить, что точности средств измерений частоты может оказаться недостаточно для фиксации изменения приращения частоты резонаторной системы в случае постановки катода при недопустимой в производстве неоднородности резонаторной системы. При этом реакцию приращения ча-



Зависимость приращения частоты  $\Delta f$  при постановке имитатора катода от неоднородности в одном из резонаторов:  $\Delta r$  — приращение радиуса резонатора  $r_p$  по задней стенке;  $r_a$  — радиус анода

стоты можно повысить, увеличив диаметр имитатора катода. Расчеты показывают, что при увеличении диаметра имитатора с 2,0 до 2,8 мм различие между отсутствием неоднородности и неоднородностью, равной 3 % глубины резонатора, возрастает с 1 МГц до 30—50 МГц в зависимости от знака приращения. Однако при этом абсолютное значение приращения частоты возрастет с 900 МГц до 19 ГГц, в связи с чем могут потребоваться более широкополосные измерительные приборы.

Простота и малая трудоемкость приведенных способов контроля очевидны. Предлагаемая методика контроля реализуется при помощи стандартной, используемой при изготовлении любого магнетрона, аппаратуры контроля параметров колебательной системы на низком уровне мощности и легко вписывается в типовой технологический процесс. Появляется возможность оперативной оценки сохранения критерия годности параметров резонаторной системы и вывода энергии при выполнении монтажных операций, уменьшения стоимости проводимых работ.

## Литература

1. Самсонов Д. Е. Основы расчета и конструирования многорезонаторных магнетронов. М.: Сов. радио, 1966.
2. Шлифер Э. Д. Расчет многорезонаторных магнетронов. М.: МЭИ, 1966.
3. Гурко А. А. Вывод энергии магнетрона как неоднородность // Антенны. 2003. № 10. С. 60—66.
4. Gurko A. A. Optimization of Magnetron Transformer Parameters // Telecom. and Radio Eng. 1998. V. 52. № 12. P. 59—64.
5. Магнетроны сантиметрового диапазона. Т. 1 / Пер. с англ., под ред. С. А. Зусмановского. М.: Сов. радио, 1950.
6. Свид-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2011611258 «Расчет дисперсионных характеристик магнетронов» К. И. Чистяков, А. А. Омиров (RU) // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2011. № 2 (75). Ч. 2. С. 306.

Дата принятия 22.10.2012 г.

## МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

615.471+681.2.088

### Основные источники погрешностей в неинвазивной медицинской спектрофотометрии. Ч. 2. Медико-биологические факторы погрешностей

Д. А. РОГАТКИН, Л. Г. ЛАПАЕВА, О. А. БЫЧЕНКОВ, С. Г. ТЕРЕЩЕНКО,  
В. И. ШУМСКИЙ

Московский областной научно-исследовательский клинический институт  
им. М. Ф. Владимирского, Москва, Россия, e-mail: rogatkin@medphyslab.com

Описаны первые результаты комплексных экспериментальных исследований инструментальных и методических погрешностей диагностики в неинвазивной медицинской спектрофотометрии. Рассмотрены медико-биологические источники и факторы погрешностей при натурных измерениях в условиях клиники. Показано, что наибольший вклад в суммарную погрешность измерений дает интерактивная составляющая, обусловленная взаимодействием средства и объекта измерений.

**Ключевые слова:** неинвазивная медицинская спектрофотометрия, обратнорассеянное излучение, лазерная доплеровская флоуметрия, оптическая тканевая оксиметрия, лазерная флюоресцентная диагностика, сатурация оксигемоглобина.

The first results of complex experimental studies of instrumental and methodical errors of diagnostics in noninvasive medical spectrophotometry are described. Both medical and biological sources and factors of errors are considered at carrying out the nature measurements in the conditions of clinics. It is shown that the interactive component of errors caused by interaction of the measuring instrument and measurement object gives the greatest contribution to a total measurements error.

**Key words:** noninvasive medical spectrophotometry, backscattered radiation, laser Doppler flowmetry, optical tissue oximetry, laser fluorescent diagnostics, oxyhaemoglobin saturation.

Исследования и разработка метрологического обеспечения методов и приборов в неинвазивной медицинской спектрофотометрии (НМС) — наиболее важные и ключевые задачи, которые необходимо решить для успешного внедрения этого нового диагностического направления в практи-

ческую медицину. Базовые теоретические положения, сформулированные в [1], позволяют в настоящее время перейти непосредственно к системным и комплексным экспериментальным исследованиям в этой области. В первой части [2] рассмотрены физико-технические факторы и явления,