

А. А. Гурко, К. И. Чистяков

ОАО «Владыкинский Механический Завод»
58, Дмитровское ш., Москва, 127238, Россия
E-mail: mosvmz@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАГНЕТРОНА НА НИЗКОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ

Магнетрон – широко применяемый в радиолокации задающий генератор СВЧ-излучения. Снижение рабочей длины волны локатора необходимо для увеличения его разрешающей способности и (или) уменьшения габаритов антенны. При продвижении в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн растет относительная погрешность изготовления резонаторной системы магнетрона. Технологические погрешности изготовления искажают структуру ВЧ-поля рабочей дублетной составляющей. Это приводит к росту брака магнетронов по КПД. Предлагается способ косвенной оценки «разрушения» спектра пространственных гармоник ВЧ-поля замедляющей системы магнетрона, позволяющий в процессе производства своевременно обнаруживать признаки возникновения дефектов колебательной системы магнетрона, приводящих к образованию скрытого брака по КПД. Предлагаемая методика контроля реализуется с помощью стандартной, используемой при изготовлении любого магнетрона, аппаратуры контроля параметров колебательной системы на низком уровне мощности, легко вписывается в типовой технологический процесс. Проведение ряда начальных экспериментов позволит получить необходимые для использования описанной методики данные. В результате будет уменьшен брак готовых магнетронов. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: магнетрон, измерения, пространственные гармоники, технологические неоднородности изготовления, резонаторная система.

Вторая половина XX столетия отмечена значительными успехами в области совершенствования конструкции и параметров магнетрона. Следует отметить три события, кардинальным образом повлиявших на перспективу использования магнетрона в современной технике: появление коаксиального магнетрона (КМ), магнетрона с безнакальным автоэмиссионным запуском и магнетрона на пространственной гармонике не π -вида колебаний. Предложение использовать в магнетроне режим взаимодействия электронного потока с пространственной гармоникой дублетного вида колебаний открыло путь к интенсификации освоения миллиметрового (мм) диапазона длин волн и в первую очередь – к продвижению в его коротковолновую часть. В 1984 г. в России (ОАО «Плутон», Москва) разработан первый и до сих пор единственный в мировой практике серийный магнетрон 2-х мм диапазона длин волн с рекордным для диапазона уровнем выходной мощности.

За рубежом разработка магнетронов мм диапазона длин волн осуществлялась путем моделирования конструкций сантиметрового (см) диапазона. Очень скоро стало ясно, что уменьшение длины волны до 3 мм является пределом возможного на этом пути. Причем попытки создания мм магнетронов непрерывного действия закончились неудачей. Режим взаимодействия электронного потока с низшей пространственной гармоникой ВЧ-поля одного из дублетных видов колебаний равнорезонаторной системы предложен исследователями Института радиофизики и электроники НАН Украины (г. Харьков) и в литературе иногда называется «харьковским». Разработка первых промышленных конструкций магнетронов непрерывного действия выявила принципиаль-

ную непригодность некоторых конструктивных решений, применявшихся украинскими исследователями. В частности, неприемлемым оказалось решение по устранению потерь излучения с торцов резонаторной системы с помощью анодных экранов. Анодные экраны были заменены торцовыми полостями в виде круглых запердельных волноводов, позволивших осуществлять механическую перестройку (подстройку) частоты с помощью расположенной над торцом резонаторной системы цилиндрической коронки. Неприемлемыми, требующими значительной корректировки оказались некоторые традиционные методы расчета режимов работы магнетрона, критерии годности и способы контроля технологических параметров конструкции.

Стабильность работы магнетрона и воспроизводимость его параметров при серийном производстве, по мнению автора работы [1], зависит от многих факторов, из которых выделяется точность изготовления резонаторной системы и совершенство методов контроля ее параметров. Очевидно, что следует говорить о контроле степени влияния технологических погрешностей выполнения номинальных размеров колебательной системы на ее параметры на низком уровне мощности.

Технологические погрешности изготовления резонаторной системы являются одной из наиболее распространенных причин так называемого скрытого брака при производстве магнетронов. Вызываемое технологическими неоднородностями увеличение количества пространственных гармоник в суммарном высокочастотном поле пространства взаимодействия и происходящее при этом уменьшение амплитуды рабочей (синхронной) гармоники приводит к уменьшению

электронного КПД и конкурентоспособности рабочего вида колебаний (вплоть до нестабильной его генерации). Расчетная оценка по методике [2] «разрушения» спектра пространственных гармоник единичной неоднородностью, адекватной допуску отклонения одного из размеров резонаторной системы с учетом вероятности суммирования последствий отклонения всех размеров, свидетельствует о возможности значительного уменьшения амплитуды рабочей гармоники в низковольтных магнетронах и магнетронах мм диапазона длин волн, имеющих мелкоструктурную колебательную систему. Строго говоря, резонаторная система при наличии вывода энергии, связанного с одним из резонаторов, не является однородной. Однако этим фактом пренебрегают вследствие слабой зависимости величины вносимого активного сопротивления от частоты.

При выборе резонаторной системы коротковолнового «классического» магнетрона предпочтение отдается резонаторам, обладающим более высокой собственной добротностью Q_0 [3]. По определению Q_0 колебательной системы пропорциональна отношению запасенной энергии к собственным потерям. Из практики разработки не π -видных магнетронов известно об увеличении Q_0 с уменьшением номера вида колебаний. Происходит это вследствие роста энергии, запасаемой в пространстве взаимодействия и торцовых полостях, выполненных в виде круглых предельных волноводов. Оценка величины диссипативных потерь резонаторной системы при условии равенства амплитуд синхронных гармоник на границе пространства взаимодействия показывает их увеличение с уменьшением номера вида колебаний [4]. Поэтому при фиксированной величине подводимой мощности и неизменном количестве резонаторов системы уменьшение номера вида колебаний сопровождается падением КПД.

При проектировании магнетрона ожидаемая величина контурного КПД (η_k) определяется на основании расчетных значений собственной добротности Q_0 и величины вносимого выводом энергии сопротивления, а электронного КПД (η_s) – параметров пространства взаимодействия и удаления рабочей точки по магнитному полю от параболы критических режимов [3]. Технологическим процессом серийного производства магнетрона предусмотрен (на разных его стадиях) только контроль параметров резонансной кривой рабочего вида колебаний, чего недостаточно для прогнозирования величины η_s .

Декларируемое в литературе влияние отклонения картины распределения в пространстве взаимодействия ВЧ-поля от «симметричной» на уменьшение η_s не находит отражения в реальном процессе изготовления магнетрона. Попытки оп-

ределять асимметрию ВЧ-поля пространства взаимодействия с последующей корреляционной оценкой работоспособности магнетрона оказались настолько субъективными, что в современной практике разработки и производства магнетронов этот способ практически не применяется. «...Зондовый метод дает возможность лишь надежно зафиксировать наличие искажений. Осциллограммы поля в этом случае могут не только количественно, но даже и качественно отличаться от истинного распределения поля у анода» [2].

Регламентировать технической документацией параметры технологических неоднородностей при случайном законе их количества, величины и расположения не представляется реальным как вследствие множества возможных вариантов, так и вследствие практической невозможности идентификации реальной системы с расчетным вариантом. Несостоятельность подобного подхода к выработке критериев количественной оценки влияния предельных отклонений размеров элементов резонаторной системы на эффективность работы магнетрона подтверждается материалами пятой главы работы [1]. Подтверждением служат и известные из практики промышленного выпуска магнетронов многочисленные случаи соответствия требованиям ТУ образцов, в которых использовались резонаторные системы с отклонениями размеров, превышающими, иногда значительно, предельно допустимые конструкторской документацией.

Нарушение однородности резонаторной системы отражается на величине Q_0 лишь в случае появления гармоники, способной существенно увеличить потери излучения с торцовых плоскостей замедляющей системы. Эту функциональную связь реально удается наблюдать лишь для разнорезонаторной системы и только в случае частичной трансформации 0-составляющей ВЧ-поля в волну H_{11} .

Конструкция вывода энергии, как показал анализ [5], 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, превосходящее технологические неоднородности изготовления резонаторной системы. Причина кроется в неблагоприятном сочетании отклонений геометрических размеров элементов конструкции от номинальных значений при ошибочном выборе последних. Явление это, относящееся к разряду ошибок, допущенных в процессе разработки, не всегда может быть полностью устранено на стадии серийного производства. Не следует исключать вероятности как изменения величин

возмущения, так и появления новых возмущений в процессе выполнения технологических операций. Поэтому представляется не только желаемой, но и необходимой селективная оценка роли вывода энергии и неоднородностей резонаторной системы в возмущении структуры ВЧ-поля пространства взаимодействия.

Существующие инженерные способы расчета [1] не позволяют определить геометрическую длину трансформатора сопротивления, соответствующую четвертьволновой электрической и его рабочую частотную полосу. При отклонении номинальной геометрической длины трансформатора от четвертьволновой электрической увеличивается влияние допусков отклонения выполнения геометрических размеров на величину реактивной составляющей 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 η , (вплоть до нестабильной генерации рабочего вида колебаний вследствие снижения конкурентоспособности). Экспериментальная корректировка расчетной длины трансформатора по результатам оценки выходных параметров магнетрона весьма сложна и трудоемка вследствие их зависимости от большого количества факторов. И хотя изложенная в работе [6] методика оптимизации параметров трансформатора сопротивлений позволяет на стадии разработки магнетрона осуществить объективную коррекцию его расчетной длины и оценку рабочей полосы частот, контроль сохранения параметров вывода энергии в серийном производстве магнетронов мм диапазона длин волн остается более чем желательной операцией. Вынуждает к этому рост относительных погрешностей исполнения номинальных размеров деталей. Похожая ситуация складывается и в низковольтных маломощных магнетронах коротковолновой части см диапазона длин волн, характеризующихся малой величиной вносимого сопротивления.

Способы [6] оценки рабочей полосы четвертьволнового трансформатора позволяют создать способы оперативного экспресс-контроля параметров вывода энергии в процессе изготовления магнетрона по принципу «годен–негоден» с критерием степень «разрушения» спектра пространственных гармоник однородной системы, параметром, наиболее чувствительным к величине реактивной составляющей вносимого выводом энергии сопротивления и легко поддающимся оценке на низком уровне мощности.

В качестве меры «разрушения» спектра пространственных гармоник предлагается принять изменение резонансной частоты f_0 вида ко-

лебаний при постановке катода. В однородной равнорезонаторной системе эта величина определяется долей основной волны в суммарном ВЧ-поле контролируемого вида колебаний в пространстве взаимодействия, а для вида $N/2$ разнорезонаторной системы – величиной 0-составляющей ВЧ-поля. В системе с неоднородностями доля этих волн в интегральном поле уменьшается, как и изменение резонансной частоты за счет постановки катода. Во избежание влияния на результат погрешности аксиальной установки катода при измерениях следует ориентироваться на приращение частоты при совпадении экрана катода с аксиальным центром резонаторной системы. Этому положению экрана соответствует изменение знака функции $\partial f_0 / \partial z$ при аксиальном перемещении (по координате z) катода. Можно применять гладкий (без экранов) имитатор катода. Его диаметр в целях повышения точности оценки «разрушения», как правило, отличается от диаметра штатного катода. Величина диаметра имитатора катода для конкретного типа магнетрона легко может быть определена экспериментально. 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 литеры чисто активное сопротивление, величина коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) в резонансе при перестройке резонансной частоты в этих пределах имитатором катода остается неизменной. Величина изменения резонансной частоты при постановке имитатора катода характеризует степень отклонения резонаторной системы от однородной. Изменение КСВН свидетельствует об изменении характера вносимого сопротивления. Путем набора экспериментальных результатов возможна выработка критерия, позволяющего по оценке величины приращения резонансной частоты от постановки имитатора катода, установить природу неоднородности и разделить колебательные системы на «годные» и «негодные».

Для коаксиального магнетрона в серийном производстве может быть применен более простой (по сравнению с изложенным в работе [6]) способ оценки параметров вывода энергии. Реактивная составляющая вносимого сопротивления вызывает появление в интегральном ВЧ-поле рабочего вида колебаний стабилизирующего резонатора парциальной составляющей с азимутальным числом единица. Ее парциальный вклад определяется по изменению собственной добротности вида колебаний H_{011} стабилизирующего резонатора (СР) при удалении из него поглотителя вида колебаний H_{121} или (и) поглотителя, распо-

ложенного в запоршневой полости. Аналогичный результат наблюдается и при чисто активном характере вносимого сопротивления в результате неперпендикулярности рабочей плоскости кольца перестройки частоты продольной оси СР. В этом случае вращение механизма перестройки вокруг своей оси вызывает изменение КСВН в резонансе рабочего вида колебаний, пропорциональное величине неперпендикулярности.

Изменение КСВН в резонансе рабочего вида колебаний можно наблюдать и при вращении анодной замедляющей системы (АЗС) вокруг продольной оси в случае ее несовпадения с осью СР. При повороте АЗС вокруг продольной оси на 360° КСВН в резонансе рабочего вида колебаний имеет явно выраженные один максимум и один минимум. Различие между ними по величине характеризует степень несоосности АЗС и СР. Одинаковая величина несоосности вызывает большую разницу между максимальным и минимальными значениями КСВН в резонансе для СР с меньшим отношением его внешнего диаметра к внутреннему диаметру.

Для перестраиваемых по частоте магнетронов количественное значение критерия, как правило, претерпевает весьма малое изменение. Иной результат свидетельствует о наличии частотно зависимой неоднородности. Исключением является разнорезонаторная система. Перестройка частоты разнорезонаторной системы мм диапазона длин волн осуществляется путем введения цилиндрической коронки в проходящую через большие резонаторы кольцевую проточку на торце резонаторной системы. При этом собственная частота большого резонатора увеличивается, вызывая уменьшение «разнорезонаторности». Парциальный вклад 0-составляющей в ВЧ-поле пространства взаимодействия уменьшается. Определение количественного значения приращения частоты (на краях диапазона перестройки частоты), соответствующего чисто активному характеру вносимого сопротивления, проводится по результатам сопоставления приращения частоты при постановке имитатора катода с характеристикой зависимости КСВН в резонансе от частоты КСВН(f).

В см диапазоне длин волн аналогичной аномалией является резонаторная система со связками. Перестройка ее частоты индуктивными штырями, вводимыми в последовательность нечетных (либо четных) резонаторов, трансформирует систему в разнорезонаторную с увеличением собственного значения частоты перестраиваемых резонаторов. Изменение приращения резонансной частоты при постановке катода (даже при сохранении характера и величины вносимого сопротивления) может служить свидетельством изменения спектра пространственных гармоник

ВЧ-поля пространства взаимодействия лишь на длинноволновом краю диапазона перестройки частоты. По мере перестройки частоты к коротковолновому краю увеличивается 0-составляющая ВЧ-поля. При наличии реактивной составляющей вносимого сопротивления вследствие роста «перекачки» 0-составляющей в волну типа H_{11} , вызывающего увеличение потерь излучения через ввод катода, будет происходить увеличение падения Q_0 при постановке катода. Увеличение 0-составляющей сопровождается падением η_0 в результате уменьшения амплитуды рабочей волны. Постановка катода в экземплярах с комплексным характером вносимого сопротивления сопровождается падением Q_0 (и КСВН в резонансе) тем большим, чем больше «разнорезонаторность» и реактивная составляющая вносимого сопротивления. При расположении индуктивных штырей в последовательности четных резонаторов перекрытие поперечного сечения трансформатора элементом перестройки частоты сопровождается уменьшением η_k .

По очевидным причинам количественное значение критерия допустимого «разрушения» спектра пространственных гармоник не может быть универсальным и должно для каждого типа магнетрона определяться в процессе проведения опытной конструкторской работы. Очевидно также, что конструктивные изменения колебательной системы магнетрона, влекущие за собой изменение интенсивности и характера распределения ВЧ-поля в пространстве взаимодействия, должны сопровождаться оценкой необходимости корректировки диаметра имитатора катода и количественного значения критерия.

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

Библиографический список

1. Самсонов Д. Е. Основы расчета и конструирования многорезонаторных магнетронов (резонаторные системы) / Д. Е. Самсонов. – М.: Сов. радио, 1966. – 224 с.
2. Букуева Р. Я. Развитие радиоэлектронных методов исследования приборов магнетронного типа коротковолновой части СВЧ-диапазона и реализация их в специальном оборудовании: дис. ...канд. техн. наук / Р. Я. Букуева. – М., 1981. – 201 с.

3. Шлифер Э. Д. Расчет многорезонаторных магнетронов / Э. Д. Шлифер. – М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1966. – 143 с.
4. Гурко А. А. Оценка возможности повышения КПД магнетронов миллиметрового диапазона с использованием не π -видных колебаний / А. А. Гурко // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – 5, № 1. – С. 80–83.
5. Гурко А. А. Вывод энергии магнетрона как неоднородность / А. А. Гурко // Антенны. – 2003. – № 10. – С. 60–66.
6. Gurko A. A. Optimization of Magnetron Transformer Parameters / A. A. Gurko // Telecommunications and Radio Engineering. – 1998. – 52, N 12. – P. 59–64.

Рукопись поступила 31.05.2012.

A. A. Gurko, K. I. Chistyakov

INCREASE OF BODY OF INFORMATION ABOUT ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF RESONATOR SYSTEM OF NOT-GENERATION MAGNETRON

Magnetron is a master microwaves oscillator which is widely used in radiolocation. Decrease in a locator operating wavelength is necessary for increase of its resolving ability and (or) for antennas downsizing. The relative inaccuracy of manufacturing magnetron resonator system increases while advancing in a short-wave part of mm wavelengths range. Manufacturing errors distort the HF-field structure of a working doublet component. This leads to spoilage growth in terms of the efficiency. The indirect estimation of distraction of HF-field spectrum of spatial harmonics in magnetron slowing down system has been suggested. The estimation allows to detect promptly the signs of defects origin in oscillation system of magnetron, which lead to hidden spoilage in terms of the efficiency. The suggested control is realized by means of standard equipment for control of oscillation system at low power, which is used in manufacturing of any magnetron. The initial experiments

will allow to get the data necessary for the described control. As a result there will be less spoilage in magnetrons.

Key words: magnetron, measurings, spatial harmonics, technological inhomogeneities of manufacturing, resonator system.

A. A. Gurko, K. I. Chistyakov

ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ КОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МАГНЕТРОНА НА НИЗЬКОМУ РІВНІ ПОТУЖНОСТІ

Магнетрон – широко застосовуваний в радіолокації задавальний генератор НВЧ-випромінювання. Зниження робочої довжини хвилі локатора необхідно для збільшення його роздільної здатності та (або) зменшення габаритів антени. При просуванні в короткохвильову частину мм діапазону довжин хвиль зростає відносна похибка виготовлення резонатора системи магнетрона. Технологічні похибки виготовлення спотворюють структуру ВЧ-поля робочої дублетної складової. Це призводить до зростання браку магнетронів по ККД. Пропонується спосіб непрямої оцінки «руйнування» спектру просторових гармонік ВЧ-поля уповільнювальної системи магнетрона, що дозволяє в процесі виробництва своєчасно виявляти ознаки виникнення дефектів коливальної системи магнетрона, що приводять до утворення прихованого браку по ККД. Запропонована методика контролю реалізується за допомогою стандартної, використовуваної при виготовленні будь-якого магнетрона, апаратури контролю параметрів коливальної системи на низькому рівні потужності, легко вписується в типовий технологічний процес. Проведення ряду початкових експериментів дозволить отримати необхідні для використання описаної методики дані. В результаті буде зменшений брак готових магнетронів.

Ключові слова: магнетрон, вимірювання, просторові гармоніки, технологічні неоднорідності виготовлення, резонаторна система.