

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ МОДУЛЯЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА РЕАКТИВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В РЕЗОНАНСНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

Канд. техн. наук, доц. МОРОЗ В. К., канд. физ.-мат. наук, доц. ПОЛИЩУК А. А.,
инженеры МИХАЛЬЦЕВИЧ Г. А., САЦУКЕВИЧ Е. М.

*Белорусский государственный технологический университет,
Белорусский национальный технический университет*

Реальные электронные СВЧ генераторы малой мощности резонансного типа работают при конечных углах пролета электронов через зазор резонатора, который может достигать значения π . Весьма интересен анализ взаимодействия электронного пучка с высокочастотным полем резонатора с учетом изменения амплитуды высокочастотного напряжения (ВЧ-напряжения) за время пролета электронов между сетками резонатора.

При прохождении однородного по плотности электронного потока с начальной скоростью v_0 на него воздействует переменное модулирующее напряжение U_1 , которое приложено между сетками. Так как энергия потока электронов в общем случае определяется произведением заряда электронов на среднее значение ВЧ-напряжения, электроны в положительные периоды ВЧ-напряжения будут выходить с увеличенными скоростями, а в течение отрицательных полупериодов – с уменьшенными. В положительный полупериод в зазоре всегда больше электронов, чем в отрицательный, так как заторможенные электроны имеют большее время пролета. Следовательно, часть электронов не успевает покинуть зазор к началу ускоряющего полупериода ВЧ-напряжения между сетками. Поэтому энергия модуляции электронов, затраченная на ускорение электронов, больше энергии, затраченной на торможение электронов. Следовательно, при конечных углах пролета электронов вариация по скорости происходит с поглощением активной мощности от переменного электрического поля.

Это явление при скоростной модуляции эквивалентно увеличению собственной активной проводимости резонатора. Известно [1], что при некоторых условиях потери на модуляцию электронного потока могут превосходить тепловые потери в резонаторе и таким образом влиять на основные параметры резонансного генератора.

Исследуем влияние модуляционных потерь на такие параметры генератора резонансного типа, как диапазон и крутизна электронной настройки. Электронная настройка является одним из основных параметров генераторов резонансного типа и широко применяется на практике. Этот метод настройки базируется на использовании реактивных свойств электронного потока при изменении напряжения на отражателе, на который электроны не попадают и, таким образом, не происходит потребления мощности.

Уравнение, связывающее отклонение частоты колебаний от резонансной частоты $\Delta\omega$ и отклонение при этом угла пролета электронов в пространстве отражателя $\Delta\theta$, можно представить в виде [2]

$$\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q_n} \operatorname{tg} \Delta\theta, \quad (1)$$

где Q_n – добротность нагруженного резонатора.

Так как в (1) Q_i не зависит от угла пролета электронов, теоретическая кривая электронной настройки имеет вид симметричной тангенсоиды.

Учет потерь энергии при модуляции электронного потока высокочастотным полем при прямом и обратном пролетах электронов через высокочастотный зазор (ВЧ-зазор) резонатора

$$W_m = I_0 U_0 \frac{\xi^2}{2\psi_0^2} [2(1 - \cos \psi_0) - \psi_0 \sin \psi_0], \quad (2)$$

где I_0 – рабочий ток; U_0 – напряжение на резонаторе; ξ – коэффициент использования постоянного ускоряющего напряжения; ψ_0 – угол пролета электронов через ВЧ-зазор резонатора, приводит лишь к незначительному изменению добротности Q_n .

Как известно [3], при определении величины мощности, расходуемой на модуляцию электронного потока высокочастотным полем, для конечных углов пролета электронов через зазор резонатора на основе закона сохранения энергии с учетом всех членов разложения функции в ряд вплоть до квадратичных имеет место следующее выражение:

$$W_{\max} = I_0 U_0 \frac{\xi^2}{2\psi_0^2} [2(1 - \cos \psi_0) - \psi_0 \sin \psi_0] (1 - \cos \Delta \theta). \quad (3)$$

Таким образом, дополнительная проводимость за счет модуляционных потерь составит

$$\begin{aligned} g_m &= \frac{1}{2} \frac{I_0}{U_0 \psi_0^2} [2(1 - \cos \psi_0) - \psi_0 \sin \psi_0] (1 - \sin \Delta \theta) = \\ &= \frac{1}{2} g_0 M^2 \left(1 - \frac{\cos \frac{\psi_0}{2}}{M} \right) (1 - \sin \Delta \theta), \end{aligned} \quad (4)$$

где g_0 – проводимость постоянного электронного потока; M – коэффициент взаимодействия высокочастотного поля в зазоре с электронным потоком.

Принимая во внимание выражение (4), добротность нагруженного резонаторного генератора можно представить в виде

$$Q_n = \frac{\omega c}{g_n + g_r + g_m} = \frac{\omega c}{g_n + g_r + \alpha_1 (1 - \sin \Delta \theta)}, \quad (5)$$

где g_r – проводимость, эквивалентная активным потерям резонатора; g_n – активная проводимость полезной нагрузки, трансформированной к центру ВЧ-зазора; c – емкость эквивалентного колебательного контура;

$\alpha_1 = \frac{1}{2} g_0 M^2 \left(1 - \frac{\cos \frac{\psi_0}{2}}{M} \right)$ – модуляционный коэффициент.

С учетом соотношения (5) уравнение (1) принимает вид

$$\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{g_n + g_r + \alpha_1 (1 - \sin \Delta \theta)}{\omega c} \operatorname{tg} \Delta \theta. \quad (6)$$

Как следует из выражения (6), кривые электронной настройки приобретают асимметричный вид.

Для определения и анализа крутизны электронной настройки с учетом потерь энергии на модуляцию электронов воспользуемся формулой [1]

$$\frac{\partial f}{\partial U_{\text{отр}}} = -f_0 \frac{\pi(n+3/4)}{Q_n(U_0 - U_{\text{отр}})}, \quad (7)$$

где $U_{\text{отр}}$ – тормозящее напряжение на отражателе; n – номер зоны генерации; f_0 – резонансная частота электромагнитных колебаний.

Подставляя значение Q_n из выражения (5) в формулу (7), получим следующее соотношение:

$$\frac{\Delta f}{\Delta U_{\text{отр}}} = f_0 \frac{\pi(n+3/4)[g_r + g_n + \alpha_1(1 - \sin\Delta\theta)]}{\omega d(U_0 - U_{\text{отр}})}. \quad (8)$$

Сопоставляя крутизну электронной настройки в зависимости от напряжения на отражателе с учетом и без учета потерь на модуляцию, т. е. формулы (8) и (7), видим, что значение крутизны электронной настройки при учете модуляционных потерь увеличивается, особенно в области отрицательных углов $\Delta\theta$.

На основании условия возникновения и существования генерации в резонансном генераторе ширина зон генерации и диапазон электронной настройки при неизменных активных проводимостях резонатора и нагрузки для конечных углов пролета электронов через ВЧ-зазор резонатора зависят от проводимости. Она обусловлена потерями на модуляцию g_m . Следовательно, по формуле (5) с увеличением модуляционных потерь добротность колебательной системы резонансного генератора падает, что приводит к увеличению диапазона и крутизны электронной настройки.

Анализ нелинейных физических процессов в устройствах с тормозящими полями с учетом модуляционных потерь может быть полезным не только для более точного расчета параметров миниатюрных СВЧ приборов, но и при решении вопросов оптимизации комплекса электрических и эксплуатационных показателей этих устройств.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при определенных условиях модуляционные потери значительно превосходят тепловые потери в резонаторе и значительно влияют на основные потери СВЧ устройств с тормозящими полями.
2. Показано, что с увеличением угла пролета электронов эффективность группирования электронного потока ослабляется, что значительно влияет на диапазон и крутизну электронной настройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федяев, В. К. Электронная проводимость и коэффициент полезного действия плоского сверхвысокочастотного зазора в нелинейном режиме / В. К. Федяев, А. А. Пашков // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 3. – С. 361–365.
2. Федоров, Н. Д. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы / Н. Д. Федоров. – М.: Атомиздат, 1989. – 490 с.
3. Полищук, А. А. Влияние модуляционных потерь на диапазон и крутизну электронной настройки в генераторах резонансного типа / А. А. Полищук, Г. А. Михальцевич // Тр. БГТУ. Сер. физ.-мат. наук и информатики. – 2002. – Вып. X. – С. 138–141.

Представлена кафедрой
АПП и Э БГТУ

Поступила 17.10.2005

УДК 621. 311.019.3 (075.8)

Надежность резервированных релейно-контактных систем при множественных отказах / В. А. Анищенко, А. В. Машко // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2006. – № 6. – С. 26–33.

Рассматривается методика расчета надежности резервированных релейно-контактных систем, состоящих из элементов с двумя видами отказов. Показано влияние статистически зависимых отказов на надежность релейно-контактных систем.

Ил. 8. Библиогр.: 2 назв.

UDC 621. 311.019.3 (075.8)

Reliability of Reserved Relay and Contact Systems with Great Number of Failures / V. A. Anischenko, A. V. Mashko // Energetika – Proceedings of CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations. – 2006. – No. 6. – P. 27–33.

The paper considers a methodology for calculation of reliability of reserved relay and contact systems consisting of elements with two types of failures. Influence of statistical dependent failures on reliability of relay and contact systems is shown in the paper.

Fig. 8. Ref.: 2 titles.

УДК 621. 311. 019.3 (075.8)

НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ ПРИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКАЗАХ

Доктор техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В.А., инж. МАШКО А.В.

Белорусский национальный технический университет

Релейно-контактные системы, к которым принадлежат устройства релейной защиты и автоматики, состоят из элементов с тремя состояниями: исправном и двух неисправных по причине отказов типа «обрыв» или «замыкание». Для повышения надежности систем при одной и той же надежности элементов может предусматриваться структурное резервирование. Принимаемое при расчетах надежности таких систем допущение о статистической независимости отказов элементов не всегда соблюдается. По зарубежным данным, до 20 % отказов от их общего числа могут оказываться отказами двух и более элементов по общей причине [1].

Неучет множественных, т. е. статистически зависимых, отказов элементов ведет к ошибочному завышению расчетных надежностных показателей систем, содержащих эти элементы.

Известны [2] методика расчета надежности систем, состоящих из элементов с тремя состояниями при учете только статистически независимых отказов, и методика расчета надежности систем с двумя состояниями с учетом как независимых, так и множественных отказов. В настоящей рабо-