

В противном случае произойдет срыв коммутации, и двигатель будет постоянно подключен к источнику питания.

Следует отметить, что схема на рис. 1 работоспособна и при отсутствии диода VD1, однако в этом случае на ее элементах могут возникать перенапряжения и невозможен рекуперативный режим.

ВЫВОДЫ

1. В рассмотренной схеме импульсного электропривода постоянного тока применен только один тиристор, и поэтому она отличается простотой и надежностью.

2. Электропривод целесообразно использовать при малой мощности электродвигателя и небольших диапазонах регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многодвигательный электропривод: а. с. 1169129 СССР / В. В. Романов // Бюл. изобр. – 1985. – № 27.
2. Многодвигательный электропривод постоянного тока: а. с. 1309236 СССР / В. В. Романов // Бюл. изобр. – 1987. – № 17.
3. Сен, П. Тиристорные электроприводы постоянного тока / П. Сен. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 17.10.2005

УДК 621.385.6

К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕЗОНАНСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

**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*

Электровacuумные приборы имеют значительные преимущества перед полупроводниковыми приборами аналогичного назначения при работе в условиях повышенных электрических и тепловых нагрузок, воздействии высоких уровней ионизирующей радиации или сильных электромагнитных полей. Эти приборы способны работать при больших изменениях температуры окружающей среды и обладают наименьшими амплитудными и частотными шумами.

Характерная особенность современного этапа развития электроники малой мощности – конкуренция между различными приборами. Это делает актуальным выявление и реализацию предельных возможностей каждого

типа прибора. Особый интерес приобрела проблема оптимизации параметров резонансных генераторов при наметившейся тенденции микроминиатюризации маломощных устройств с тормозящими полями, работающих при повышенных рабочих токах. Основными факторами в таких приборах являются многократные пролеты электронов в условиях сильной нелинейности статических полей в пространстве отражателя.

С учетом изложенного выше весьма необходимой является разработка удобной и наглядной методики расчета электродинамической колебательной системы для таких приборов.

Электронные процессы в электронном резонансном генераторе обусловлены взаимодействием движущегося пучка электронов с электромагнитным полем резонатора. На основании этого электронные явления в таком генераторе целесообразно изучать методами:

а) внешнего воздействия на колебательную систему исследуемого прибора;

б) исследования в режиме генерации прибора.

Сущность метода внешнего воздействия на колебательную систему заключается в следующем: исследуемая схема прибора находится в достартовом режиме, т. е. не выполняются условия самовозбуждения. При помощи специальных соединений от внешнего источника мощности вводится в колебательную систему определенная энергия. В зависимости от режима питания прибора происходит изменение резонансной частоты и добротности колебательной системы маломощного генератора.

Сложность данного метода заключается в расчете констант четырехполюсника, эквивалентного переходному устройству между пространством взаимодействия исследуемого прибора. Метод имеет существенный недостаток – не позволяет исследовать электронные явления в испытываемом генераторе в реальных рабочих условиях. Известно, что такие параметры электродинамической колебательной системы, как добротность резонатора $Q_{нг}$, проводимость потерь резонатора q_r и параметр согласования σ , в рабочем режиме значительно изменяются по сравнению с холодным состоянием за счет появления дополнительных потерь, вносимых электронным потоком и разогревом резонатора. Это в свою очередь сказывается на процессе электронных явлений в приборе и условии их выполнения. В то же время метод внешнего воздействия не позволяет непосредственно измерять важные параметры мощных генераторов резонансного типа, например КПД, пусковой ток, что является существенным недостатком данного метода.

Метод исследования в режиме генерации позволяет фиксировать самовозбуждение резонансного прибора при взаимодействии сгруппированных электронов с электромагнитным полем резонансной системы. Из эквивалентной схемы маломощного генератора [1] видно, что для самовозбуждения и поддержания колебаний необходимо выдерживать строгое соотношение между активными проводимостями резонатора, нагрузки и электронного луча, проведенного к центру зазора резонатора. Очевидно, что эти величины и границы зон генераций зависят не только от питающих напряжений, но и от свойств электродинамической системы в рабочем режиме.

Электронные явления, обусловленные самосогласованным взаимодействием электронов с электромагнитным полем в резонаторе, т. е. режим генерации, можно фиксировать по выходным параметрам генератора на специальных измерительных приборах.

Чтобы получить полные и строгие количественные данные об электронных явлениях в генерирующем приборе по измеряемому диапазону электронной настройки, мощности в нагрузке и так далее, необходимо провести тщательный расчет параметров колебательной системы в широком диапазоне изменения питающих напряжений, учитывая конструктивные особенности резонансного генератора.

Так как в электронике СВЧ принято все активные потери в резонаторе относить к проводимости g_r , включенной в середине зазора, а качественные характеристики резонатора характеризовать через добротность $Q_{нг}$, эти величины и являются важнейшими параметрами полых резонаторов, которые могут изменяться в значительной степени в зависимости от условий генерации исследуемых приборов. Известные теоретические расчеты, проведенные для основных параметров резонатора, имеют весьма громоздкий и сложный математический аппарат, а главное – конечные соотношения приобретают неопределенный характер для конкретных типов полых резонаторов. Это объясняется тем, что для реальных геометрических резонаторов весьма трудно получить строгое решение волновых уравнений. В то же время при выводе уравнений поля не учитывают потери энергии на излучение через отверстия в резонаторе, потери в соединительных контактах, на неровностях внутренней полости резонатора и так далее. Все эти потери зависят от конструкции и режима генератора, они еще не достаточно изучены и не поддаются сколь-нибудь точному количественному учету.

Все это приводит к тому, что теоретически рассчитанные значения активной проводимости g_r и добротности $Q_{нг}$ резонатора имеют значительные различия по отношению к реальным величинам.

Чтобы провести всестороннее качественное и количественное исследование маломощного резонансного генератора и результаты эксперимента сравнить с расчетами, выполненными на основании соотношений уточненной теории [2], учитывающей влияние угла пролета электронов в зазоре резонатора и объемного заряда в области отражения на основные параметры генератора резонансного типа, необходимо иметь более точные данные о параметрах полого резонатора. Для некоторых типов резонаторов, имеющих несложную конфигурацию, можно получить более высокую точность в расчете основных параметров методами последовательных приближений.

Однако эти методы настолько сложны и трудоемки, что воспользоваться ими практически затруднительно. Поэтому авторы считают целесообразным громоздкость и невысокую точность имеющихся в литературе методов расчета добротности $Q_{нг}$ и проводимости g_r заменить расчетно-экспериментальными методами, что позволит определить параметры колебательной системы с учетом всех вышеназванных потерь в резонаторе генерирующего прибора, а затем и основные параметры электронного гене-

ратора малой мощности резонансного типа в зависимости от условий его генерации.

В основе расчетно-экспериментального метода лежит полученное в [3] при аппроксимации полого резонатора соотношение

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{2g} \frac{dB}{d\omega}, \quad (1)$$

где Q_0 – добротность резонатора; ω_0 – собственная круговая резонансная частота электромагнитных колебаний в резонаторе; g – проводимость резонатора; B – волновая проводимость; ω – круговая частота колебаний поля в резонаторе.

Нахождение проводимостей, нужных для расчета стационарного режима генератора, необходимо производить из соотношения (1) через вычисленные значения добротности нагруженного прибора $Q_{нг}$ по экспериментальным данным и теоретически рассчитанным величинам волновой проводимости резонатора.

Определение нагруженной добротности резонатора одноконтурного электронного генератора в рабочем режиме необходимо производить через соотношение

$$Q_{нг} = \frac{f_0}{2} \frac{\frac{\Delta\theta}{\Delta U_{отр}}}{\frac{\Delta f}{\Delta U_{отр}}}, \quad (2)$$

где f_0 – резонансная частота электромагнитных колебаний в резонаторе.

Крутизна электронной настройки в центре зоны колебания $\frac{\Delta f}{\Delta U_{отр}}$ определяется путем измерения частоты генератора малой мощности при изменении напряжения отражателя в одну и другую стороны на 1 В по отношению к оптимальному напряжению $U_{отр}$.

Определение изменения угла пролета электронов в пространстве отражателя в зависимости от изменения напряжения на отражателе в центре зоны генерации $\frac{\Delta\theta}{\Delta U_{отр}}$ производится через экспериментально снятые величины по следующей формуле:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta U_{отр}} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{U_0}{|U_{отр}|}\right)^2}}{1 - \frac{U_0}{|U_{отр}|} \frac{|\Delta U_{отр}|}{\Delta U_0}} \frac{\theta}{2U_0}, \quad (3)$$

где U_0 – ускоряющее напряжение резонатора; θ – невозмущенный угол пролета электронов.

Изменение напряжения на отражателе в зависимости от напряжения на резонаторе $\left| \frac{\Delta U_{\text{отр}}}{\Delta U_0} \right|$ определялось в точке номинального напряжения на резонаторе из кривой зависимости $U_{\text{отр}} = f(U_0)$, построенной для каждой исследуемой зоны колебаний в отдельности. Определение проводимости нагрузки, вносимой в зазор резонатора генерирующего резонансного прибора, находится по формуле

$$g = \sigma g_r.$$

При проведении экспериментальных исследований связь генератора с нагрузкой необходимо поддерживать неизменной. За счет же различных потерь в резонаторе коэффициент согласования генерирующего прибора с нагрузкой можно рассчитать, используя следующее выражение:

$$\sigma_r = \frac{q\sigma_x}{1 + (1 - q)\sigma_x},$$

где σ_x – коэффициент согласования «холодного» прибора с нагрузкой;
 $q = \frac{Q_{\text{нг}}}{Q_{\text{нк}}}.$

Значение добротности нагруженного резонатора генерирующего прибора определяется по формуле (2), а коэффициент согласования «холодного» прибора с нагрузкой σ_x и добротность нагруженного резонатора генерирующего прибора $Q_{\text{нг}}$ находится согласно методам, приведенным в [3].

Для каждого типа генератора необходимо применять и различную методику измерения $Q_{\text{нк}}$ – добротности нагруженного резонатора в «холодном» состоянии, что исключает возможность повторения систематических ошибок, присущих тому или другому методу, и следовательно, точность и универсальность общей методики расчета эквивалентных параметров резонатора возрастает.

В общем случае волновая проводимость зависит только от размеров и вида колебаний в резонаторе и не зависит от режима работы и распределения потерь в этом контуре. Поэтому значения для волновой проводимости можно заимствовать готовыми из теоретических расчетов, приведенных на основании графоаналитического метода и представленных в виде графиков. Это позволяет упростить громоздкие и трудоемкие построения картин электростатических полей для различных маломощных резонансных электронных генераторов. В то же время отпала необходимость вычислять производную по частоте от входной проводимости эквивалентной цепочки четырехполюсников для ряда резонансных частот. Все это значительно уменьшает количество второстепенного графическо-математического материала и позволяет рассчитывать электродинамическую колебательную систему рассмотренных выше генераторов в реальных рабочих условиях достаточно быстро и с высокой точностью.

Рассмотренная методика расчета электродинамической колебательной системы генераторов в реальных рабочих условиях позволила с учетом конструкции и диапазона длин волн исследуемых одноконтурных резонансных генераторов исследовать влияние угла пролета электронов между сетками резонаторов и объемного заряда в зазоре резонатора и в пространстве отражателя на основные параметры маломощных генераторов с отражательными полями.

Результаты расчета и измерения показали, что для всех испытанных генераторов резонансного типа при учете факторов по уточненной теории теоретические расчеты основных параметров резонансных генераторов в среднем от 15 до 50 % больше соответствуют экспериментальным данным, чем расчет по теории, не учитывающей влияние этих факторов.

Результаты предложенной методики могут быть использованы при разработке и усовершенствовании современных низковольтных высокорезонансных устройств резонансного типа.

ВЫВОД

Расчет резонансных генераторов на электровакуумных приборах, по предложенной уточненной теории позволяет повысить точность расчета основных параметров резонансных генераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. О в с я н н и к о в, Р. И. Определение потерь в резонаторе Фабри – Перо по форме его отклика при быстром сканировании частоты возбуждения излучателя / Р. И. Овсянников, М. Ю. Третьяков // Радиотехника и электроника. – М.: Наука, 2005. – Т. 50, № 12. – С. 1509–1517.
2. П о л и ш у к, А. А. Влияние модуляционных потерь на диапазон и крутизну электронной настройки в генераторах резонансного типа / А. А. Полишук, Г. А. Михальцевич // Труды БГТУ. Сер. физ.-мат. наук и информатики. – Минск, 2002. – Вып. X. – С. 138–141.
3. К у р а е в, А. А. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ приборов / А. А. Кураев, В. Б. Байбурин, Е. М. Ильин. – Минск: Наука и техника, 1990. – 391 с.

Представлена кафедрой АПП и Э

Поступила 17.10.2005