

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕНИОТРОНА

А.А. КУРАЕВ, В.В. МАТВЕЕНКО, А.К. СИНИЦЫН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
kurayev@bsuir.by, sinitsyn@cosmostv.by*

С использованием разработанной математической модели проведено исследование влияния величины фазовой скорости рабочей СВЧ волны и увеличения скорости электронного пучка на предельные значения эффективности пениотрона. Показано, что при нерелятивистских скоростях электронов предельный КПД пениотрона превосходит 80% при изменении фазовой скорости в диапазоне  $1 \leq v_p/c \leq 2$ .

*Ключевые слова:* пениотрон, гирорезонанс, СВЧ, КПД.

В пениотроне, реализуется практически идеальный механизм, при котором независимо от момента влета в пространство взаимодействия все электроны тонкостенного, трубчатого, моновинтового пучка движутся в направляемом магнитном поле примерно в одинаковых условиях и без предварительного группирования в сгусток, отдают полю практически всю свою энергию движения [1]. Наиболее эффективно пениотронный механизм реализуется при взаимодействии такого пучка с циркулярно поляризованной модой шепчущей галереи  $H_{n1l}$  (поле описывается фактором  $e^{j(\omega t - n\phi)}$ ) в условиях дрейфового резонанса  $\omega(1 - \beta_z/\beta_p) \approx p\Omega$ , когда номер гармоники  $p$  на единицу меньше количества азимутальных вариаций поля  $n$ , т.е. при  $p=n-1$ . Здесь  $\Omega = eB_0/(m_0\gamma)$  – лармовская частота вращения электрона в продольном магнитном поле  $B_0$ ;  $e$ ,  $m_0$  – соответственно заряд, масса покоя электрона,  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $\beta_z = v_z/c$ ,  $v_z$  – скорость электрона в направлении распространения волны,  $\beta_p = v_p/c$ ,  $v_p$  – фазовая скорость волны,  $c$  – скорость света.

В этом случае за один оборот электрон опережает вращающееся поле ровно на одну вариацию. Эту ситуацию иллюстрируют рис. 1 для моды  $H_{21l}$ .

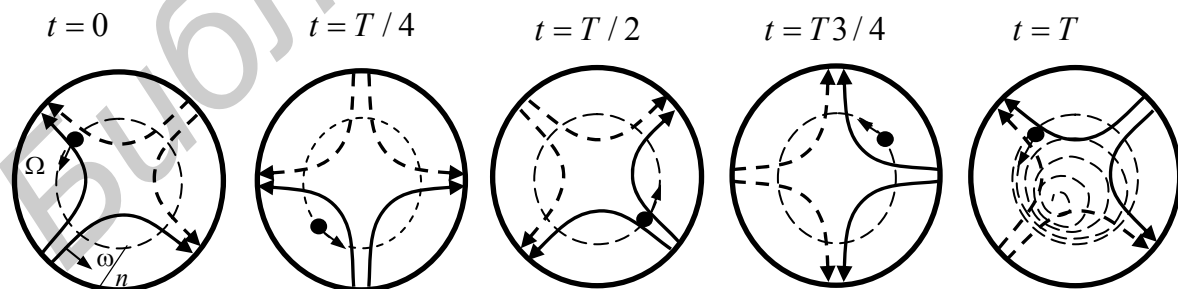


Рис. 1. Положение электрона, вращающегося с частотой  $\Omega = \omega/(n-1)$  по отношению к картине силовых линий моды  $H_{21l}$  за один период колебания  $T$

Здесь при условии  $p=n-1$  ( $n=2$ ) электрон совершает вращение с угловой скоростью  $\Omega = \omega/(n-1) = \omega$ , в то время как электрическое поле, представленное силовыми линиями, вращается с угловой скоростью  $\omega/n = \omega/2$ . Поэтому электрон начавший свое вращение

при  $t=0$  в начале вариации электрического поля (силовая линия нарисована сплошной линией), одну половину оборота  $[t=0, t=T/2]$  совершит в ускоряющем его движение поле, вторую половину оборота  $[t=T/2, t=T]$  в тормозящем. Благодаря совместному действию скрещенных полей (убывающего к центру электрического и направляющего магнитного) происходит постепенное смещение ведущих центров электронных орбит, что приводит к одинаковой потере энергии всех электронов за счет того, что электрон на каждом обороте движется в большем чем ускоряющее тормозящем поле.

В работе [2] на основе анализа полученного усредненного интеграла движения электронов, соответствующего рассматриваемому случаю, показано, что достаточным условием такого идеального механизма является нерелятивистский характер движения ( $\gamma=1$ ) и приближение фазовой скорости волны к единице. Настоящий доклад посвящен исследованию влияния отклонения от этих условий на эффективность пениотрона.

На рис.2 представлены результаты расчетов максимального КПД резонансного пениотрона без учета встречной волны на первой и третьей гармонике при начальных скоростях электронного пучка  $0.2 < \beta_0 < 0.9$  и значении питч-фактора  $q=2$  для значений фазовой скорости  $1 < \beta_p < 2$ . Длина области взаимодействия и амплитуда поля подбирались так, чтобы электрон совершал примерно 20 оборотов.

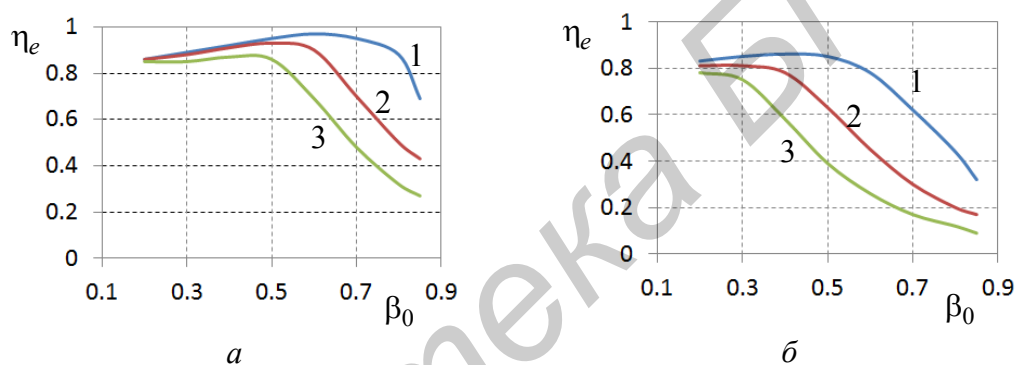


Рис. 2. Максимально достижимый электронный КПД ( $\eta_e$ ) пениотрона.  
Кривые 1 –  $\beta_p=1.1$ , 2 –  $\beta_p=1.3$ , 3 –  $\beta_p=2$ ; а)  $n=2$ ,  $p=1$ ; б)  $n=4$ ,  $p=3$

Как следует из этих рисунков, при нерелятивистских скоростях электронов эффективность взаимодействия остается высокой (КПД  $> 80\%$ ) и слабо зависит от величины фазовой скорости. Однако с ростом  $\beta_0$ , начиная с некоторого его значения наблюдается спад КПД тем раньше, чем больше величина фазовой скорости и номер гармоники  $p$ . В тоже время при  $\beta_p \sim 1$  на первой гармонике величина КПД превосходит  $80\%$  даже при релятивистских скоростях вплоть до  $\beta_0=0.8$ .

Рассмотрим роль еще одного фактора, приводящего к снижению эффективности резонансного пениотрона при приближении к условию гирорезонанса со встречной волной стоячей моды резонатора на  $p+1$  гармонике, который выполняется когда  $\beta_z \approx \beta_p / (2p + 1)$ . Как следует из этой формулы и вышеприведенных результатов, увеличивая  $\beta_p$  можно значительно отстроиться от условия гирорезонанса со встречной волной и обеспечить высокий КПД в резонансном пениотроне для технологических применений ( $f \sim 2.4$  ГГц) на гармониках  $p < 4$  при нерелятивистских скоростях электронов пучка.

#### Список литературы

1. Голеницкий И.И., Ерёмка В.Д., Сазонов В.П. // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. Москва. ЦНИИ «Электроника» 1988. 85с.
2. Кураев А.А. //Радиотехника и электроника. 1982. Т.27. №45. С.794-799.