

В табл. 2 приведены значения k_z и k_v , рассчитанные для графиков ремонтных работ. Как видно из таблицы, коэффициенты для разных ПЭС значительно колеблются. Для большинства ПЭС фактические значения $k_{эф}$ оказались значительно ниже плановых, вместе с тем для одного ПЭС-5 $k_{эф}$ оказалось выше $k_{з.пл}$. Все это свидетельствует о наличии больших резервов повышения производительности труда ремонтного персонала.

Практическое осуществление предложенных методов количественного анализа эффективного использования ремонтного персонала будет способствовать скорейшему выявлению этих резервов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник № 35. Единые районные единичные расценки на строительные работы. ЛЭП 35–500 кВ. Открытые распределительные устройства электрических подстанций. — М., 1971, вып. 1, с. 25.
2. Сборник № 35. Единые районные единичные расценки на строительные работы. ЛЭП 0,4–35 кВ. Открытые распределительные устройства электрических подстанций. — М., вып. 2, 1976, с. 18.
3. Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.М. Электрические нагрузки промышленных предприятий. — Л., 1971, с. 312.

УДК 621.37/39

Е.М.САЦУКЕВИЧ, А.А.ПОЛИЩУК (БПИ)

ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МАЛОМОЩНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА СВЧ

Электронный КПД характеризует эффективность преобразования энергии постоянного источника питания в энергию сверхвысокой частоты при взаимодействии сгруппированного обратного электронного потока с высокочастотным полем в зазоре резонатора.

Из работы [1] видно, как велико расхождение между экспериментальными данными и значениями, рассчитанными по теории, которая не учитывает потери на модуляцию электронного потока. Поэтому представляет интерес рассмотреть влияние угла пролета через Вч-зазор на потери энергии.

Учет модуляционных потерь [1] выражается через определенную эквивалентную активную проводимость, включенную дополнительно к проводимости резонатора.

Используем выражение для активной мощности взаимодействия [2]:

$$P_e = -U_0 I_0 \frac{\sin \nu_0}{\nu_e} 2x F_1(x), \quad (1)$$

где ν_0 — суммарный угол пролета электронов; ν_e — эффективный угол группирования электронов; x — параметр группировки электронов; U_0 — напряжение резонатора; I_0 — ток резонатора.

На основании определения (1) активная составляющая электронной проводимости отражательного клистрона равна

$$g_e = \frac{2I_0 M F_1(x)}{U_1} \sin \nu_0 . \quad (2)$$

Так как в стационарном режиме выполняется равенство

$$g_e = g_r + g_H , \quad (3)$$

то амплитудное условие отражательного клистрона с учетом выражений (2) и (3) запишется в следующем виде:

$$\frac{F_1(x)}{x} = \frac{g_r + g_H}{g_0 M^2 \nu_e \sin \nu_0} . \quad (4)$$

Максимально возможная электронная мощность для заданной зоны колебаний согласно выражению (1) наблюдается при оптимальном значении параметра группировки. С увеличением же угла пролета электронов через зазор резонатора модуляционные потери и собственная проводимость резонатора возрастают. Поэтому согласно выражению (4) значение параметра группировки уменьшается и эффективность группирования электронного потока, возвращающегося в зазор резонатора, падает. В данном случае с увеличением угла пролета значение электронной мощности уменьшается, а положение максимумов электронных кпд смещается в сторону меньших значений параметров группировки по сравнению с кпд, вычисленным без учета модуляционных потерь. Это говорит о том, что для компенсации мощности, расходуемой на модуляцию электронного потока, необходимо повышать амплитуду высокочастотного напряжения, т.е. дополнительно расходовать энергию источника питания.

Для количественного анализа влияния угла пролета электронов на электронный кпд отражательного клистрона разделим выражение для колебательной мощности (1) на выражение для мощности, подведенной к клистрону от источника постоянного напряжения.

Предварительно введем обозначения:

$$x = \frac{M \nu_0 \xi}{2} ; \quad M = \frac{\sin \psi_0 / 2}{\psi_0 / 2} ; \quad \beta = \psi_0 + 1 - \frac{\cos \psi_0 / 2}{M} . \quad (5)$$

На основании выражения (5) и после соответствующих преобразований получим следующее соотношение для электронного кпд:

$$\eta_e = \frac{2x F_1(x)}{\nu_0} \sin \nu_0 - \frac{2x^2}{\nu_0^2} \beta (1 - \cos \nu_0) . \quad (6)$$

Для центров зон генерации выражение (6) примет вид

$$\eta_e = \frac{2x F_1(x)}{\nu_0} - \frac{2x^2}{\nu_0^2} \beta . \quad (7)$$

Второй член в выражении (7) характеризует собой уменьшение электронного кпд отражательного клистрона за счет модуляционных потерь. Для удобства дальнейших числовых расчетов с использованием основных соотношений элементарной теории целесообразно использовать понятие эффективного угла группировки, который в нашем случае равен $\nu_e = \nu_0 - 2\psi_0$.

Как и для фазового угла $\nu_0 = \Phi + \psi_0$, в выражении (6) под функцией синуса сохраняем все значения, пропорциональные углу $\mu\nu_e$, и после соответствующих вычислений и преобразований получим выражение для электронного КПД, аналогичное выражению (7):

$$\eta'_e = \frac{2x_e F_1(x_e)}{\nu_e} - \frac{2x_e^2}{\nu_e^2} \beta', \quad (8)$$

где

$$x_e = \frac{\xi M \nu_e}{2}; \quad \beta' = 1 - \frac{\psi_0}{2} \operatorname{ctg} \frac{\psi_0}{2}.$$

Из соотношения (8) видно, что для реальных углов пролета через зазор резонатора и допустимых значений параметра β' снижение электронного КПД за счет модуляционных потерь может быть значительным.

В отражательных клистродах имеются две проволочные сетки. Благодаря этому электронный ток, выходящий из катода, уменьшается в k раз при прохождении каждой сетки в отдельности. Роль модуляционных потерь при учете коэффициентов прозрачности сеток резко возрастает. Это объясняется тем, что модуляционные потери при прямом пролете электронов относятся к току $I_1 = k_1 I_0$, в то время как при обратном пролете — к току $I_3 = k_1^3 I_0$.

С учетом вышесказанного, выражение (8) для электронного КПД запишется в следующем виде:

$$\eta'_e = k_1^3 \left[\frac{2x_e F_1(x_e)}{\nu_e} - \frac{1 + k_1^2}{2k_1^2} \cdot \frac{2x_e^2}{\nu_e^2} \beta' \right]. \quad (9)$$

Как показывает формула (9), при коэффициенте прозрачности $k_1 = 0,5$ относительная роль модуляционных потерь возрастает в 2,5 раза, что влечет за собой дальнейшее снижение электронного КПД в отражательном клистроне.

Расчеты показывают, что при угле пролета $\psi_0 = \pi$ для 1-й зоны колебаний электронный КПД снижается почти в 15 раз, а для 2-й зоны колебаний — почти в 3,5 раза по сравнению с коэффициентами полезного действия отражательно-

го клистрона, в котором $\psi_0 = \frac{1}{4}\pi$. В то же время при $\psi_0 = \pi$ отражательный клистрон не может возбудиться для 1-й зоны колебаний, в которой параметр группировки $x > 1,3$ и для 2-й зоны колебаний при $x > 2,25$. С увеличением угла пролета электронов положение максимума электронного КПД смещается в сторону меньших значений параметра группировки. Как показывают данные расчетов, с возрастанием номеров n зон колебаний относительная разница между электронными КПД реального и идеального клистрона уменьшается, в то время как абсолютное значение КПД уменьшается обратно пропорционально номеру зоны колебаний.

Для упрощения выводов при определении максимального значения электронного КПД отражательного клистрона воспользуемся аппроксимацией беселевой функции простейшим полиномом:

$$F_1(x) = \frac{x}{2} \left(1 - \frac{x}{4} \right). \quad (10)$$

Такая аппроксимация вполне допустима и не дает особой погрешности, так как она эквивалентна аппроксимации колебательной области характеристики отражательного клистрона кубической параболой.

С учетом выражения (10) уравнение (7) запишется в следующем виде:

$$\eta_e = \frac{x^2}{\nu_n} \left(1 - \frac{x}{4}\right) - \frac{2x^2}{\nu_n} \alpha. \quad (11)$$

Для нахождения максимального значения электронного КПД необходимо выражение (11) продифференцировать по параметру группировки X , и полученный результат приравнять к нулю. После соответствующих преобразований с использованием рекуррентных формул получим следующее соотношение:

$$\eta_{e \max} = \frac{64}{27\vartheta_0} (1 - 2\alpha)^3 \quad (12)$$

при

$$x_{\max} = \frac{8}{3} (1 - 2\alpha). \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) показывают, что значение x_{\max} и $\eta_{e \max}$ в большой степени зависит от угла пролета ψ_0 (особенно для начальных зон колебаний).

Физически это объясняется следующим образом. Из соотношений (10) и (11) видно, что максимум электронной мощности имеет место при $x = x_{\text{opt}}$ для оптимальной проводимости цепи. Но поскольку с увеличением угла пролета электронов общая проводимость резонатора возрастает за счет модуляционных потерь, то, как было отмечено в работе [1], максимальное значение параметра группировки уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды сверхвысокочастотных колебаний. На основании этого максимум полной колебательной мощности уменьшается и, следовательно, максимальный электронный КПД падает.

В результате можно заключить, что основная причина большого расхождения между реальными значениями электронного КПД и теоретически рассчитанными на основании "элементарной" теорий отражательных клистронов заключается в пренебрежении углом пролета электронов через СВЧ-зазор резонатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. П о л и щ у к А.А. Энергетические соотношения в клистронном генераторе. — В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск, 1976, вып. 3, с. 248–259.
2. П о л и щ у к А.А. Влияние объемного заряда на пусковой ток и напряжение отражателя в ОК. — Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1969, XII, № 3, с. 295–299.
3. П о л и щ у к А.А. О группировке электронов в электрическом поле. — В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск, 1983, вып. 10, с. 39–43.