

К повышению эффективности работы мощных усилительных клистронов для ускорителей заряженных частиц

В.Г. Андреев

Московский радиотехнический институт, Москва, Россия

С.К. Есин, Л.В. Кравчук

Институт ядерных исследований, Москва, Россия

Еще несколько десятилетий назад коэффициент полезного действия мощных клистронов, широко используемых в ускорителях заряженных частиц, составлял 30÷40%. Такое неэффективное использование подводимой к клистроноу электрической мощности имело отрицательные последствия: катод, электронная пушка и коллектор работали в напряженных режимах, что сказывалось отрицательно на сроке службы клистронов и, следовательно, на надежности и эффективности работы больших ускорительных комплексов. К настоящему времени при изготовлении мощных усилительных клистронов достигнут большой прогресс: коэффициент полезного действия составляет 60÷70% и выше, а срок службы – 20 тысяч часов и более. Этот прогресс достигнут за счет лучшего использования процесса динамики пучка в клистронах, за счет использования новой технологии изготовления клистронов.

Как нам представляется, еще не все возможности для повышения КПД мощных усилительных клистронов использованы достаточно полно. Так, для аппроксимации линейного нарастания высокочастотного электрического поля в зазорах резонаторов в пределах каждого периода, когда достигалась бы полная группировка электронов пучка, используется только первая гармоника и обособлено – вторая гармоника путем введения дополнительного резонатора, настроенного на удвоенную частоту сигнала. Такое усложнение конструкции клистроноа оказывается частично оправданным, так как введение дополнительного резонатора приводит к повышению КПД клистроноа на несколько процентов.

Введение дополнительного резонатора на удвоенной частоте сигнала помимо усложнения конструкции клистроноа ставит область взаимодействия электронов пучка на удвоенной гармонике в иные условия по сравнению с областями взаимодействия электронов пучка на первой гармонике. Оба эти недостатка могут быть устранены, если в резонаторах клистроноа (за исключением выходного резонатора) наряду с настройкой на частоту сигнала (волна TM_{010}) предусмотреть настройку резонаторов и на удвоенную частоту сигнала (волна TM_{020}). Распределение высокочастотного электрического поля на оси и в приосевой области на волнах TM_{010} и TM_{020} в резонаторах клистроноа очень близки и поэтому взаимодействие электронов пучка с гармониками поля будет происходить практически в одинаковых условиях. Перестройку резонансной частоты колебания на волне TM_{020} на удвоенную частоту сигнала можно осуществить при помощи двух кольцевых выступов (рис.1), закрепленных на днищах резонаторов [1]. При такой перестройке резонансной частоты колебания на волне TM_{020} на удвоенную частоту сигнала удастся сохранить настройку колебания на волне TM_{010} на частоте сигнала, не изменяя при этом внешние размеры резонатора или характерные размеры области взаимодействия электронного пучка с полями резонатора (расстояние между трубками дрейфа, их форма, диаметр кругового канала в трубках дрейфа).

Для повышения эффективности взаимодействия пучка электронов с полем на удвоенной гармонике целесообразно возбудить входной резонатор клистроноа и на удвоенной частоте сигнала (рис.2) В этом случае во всех группирующих резонаторах взаимодействие первой и второй гармоник с пучком электронов будет происходить примерно в одинаковых условиях. Необходимая для возбуждения входного резонатора ВЧ-мощность на удвоенной частоте может быть получена стандартным образом из сигнала на рабочей частоте.

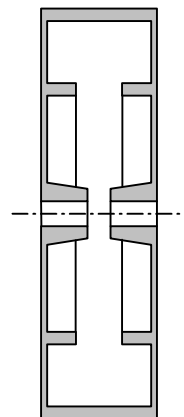


Рис. 1. Входной резонатор клистроноа, настроенный одновременно на рабочую частоту и на удвоенную частоту на волне TM_{020} .

Для развязки цепей возбуждения во входном резонаторе могут быть использованы известные приемы и устройства. В цепи возбуждения входного резонатора на удвоенной частоте сигнала необходимо предусмотреть устройства для регулировки амплитуды и фазы электромагнитного поля в резонаторе.

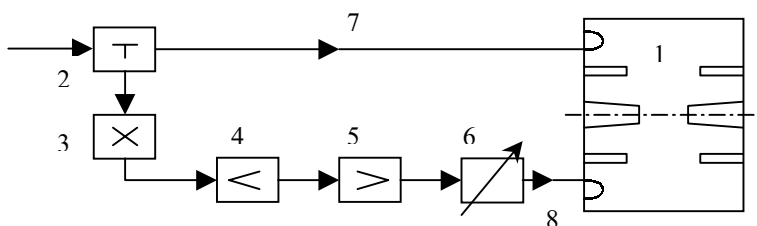


Рис. 2. Блок-схема возбуждения входного резонатора клистрона (1 – входной резонатор; 2 – направленный ответвитель; 3 – умножитель частоты; 4 – усилитель мощности; 5 – аттенюатор; 6 – фазовращатель; 7 – линия возбуждения на рабочей частоте; 8 – линия возбуждения на удвоенной частоте).

При линейно нарастающей напряженности электрического поля в пределах каждого периода соотношение между амплитудами первой и второй гармоник составляет 1:0,5 (рис.3). При аппроксимации линейной зависимости двумя гармониками это соотношение (оптимальное с точки зрения группировки электронов пучка) может быть установлено либо путем численного расчета, либо экспериментальным путем. Поэтому приведенное здесь соотношение можно рассматривать в качестве начального приближения.

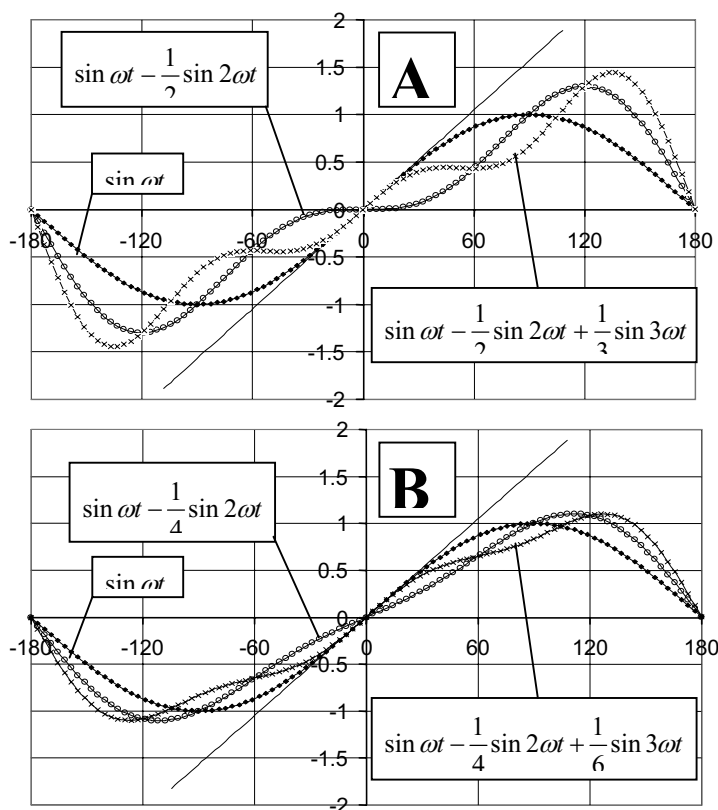


Рис. 3. Напряженности электрических полей в зазоре между трубками дрейфа при возбуждении входного резонатора на одной, двух и трех кратных частотах. Соотношение амплитуд гармоник:
А - 1:1/2:1/3; В-1:1/4:1/6.

Изложенное здесь предложение о повышении эффективности работы мощных усилительных клистронов для ускорителей заряженных частиц может быть реализовано в отечественных клистромах КИУ-12 и КИУ-15.

Для возбуждения полей в ускоряющих резонаторах основной части линейного протонного ускорителя Московской мезонной фабрики используются многолучевые клистроны КИУ-40. Применяемые в этом клистроне резонаторы обладают весьма существенными отличиями от тороидальных резонаторов мощных однолучевых клистронов. Нами начаты исследования по выяснению возможности настройки на удвоенную частоту резонансной частоты второго азимутально-симметричного поперечного магнитного колебания при сохранении настройки на рабочую частоту первого азимутально-симметричного поперечного магнитного колебания. Непременным условием такой настройки будет сохранение внешних размеров резонаторов, а также характерных размеров области взаимодействия пучков с полями резонаторов.

Литература

1. В.Г. Андреев, Н.В. Андреев, В.И. Белугин. Авторское свидетельство №1279441.