

Исследование волноводного вывода энергии, суммирующего мощности нескольких вакуумных окон в выходном резонаторе сверхмощного клистрона

А.В. Галдецкий, А.Н. Савин

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: В работе предложена конструкция интегрированного с выходным резонатором окна вывода энергии сверхмощного клистрона. Приведены результаты теоретического исследования частотной характеристики вывода энергии с интегрированным окном. Проведена оценка электрического поля в критических областях и показано, что потери в вакуумноплотном диэлектрике значительно ниже, а тангенциальные компоненты поля на его поверхности, являющиеся источником пробоя, ниже или сопоставимы с аналогичными параметрами баночных окон.

Ключевые слова: сверхмощный клистрон, баночное окно, интегрированное в резонатор окно

1. Введение

Сверхмощные клистроны (СМК) с импульсной мощностью $P_{\text{имп}} = 5\text{--}150$ МВт широко применяются в ускорительной технике. Для обеспечения их надёжной работы требуются вакуумноплотные окна в выводах энергии, рассчитанные на высокий уровень импульсной и средней мощности. Создание таких окон является серьёзной научно-технической задачей, т.к. для предотвращения СВЧ пробоя необходимо обеспечить низкие значения электрического поля, как в полости окна, так и на поверхности диэлектрика, и в области спаев. Кроме того, необходимо обеспечить хорошее согласование и низкий уровень СВЧ потерь в рабочей полосе частот (как правило, достаточно узкой, менее 1%). Традиционно эти задачи решаются применением баночных окон в выводах энергии, работающих на моде E_{11} , на двух модах $TE_{11}+TM_{11}$ [1, 2] и др. Тем не менее, проблема не решена окончательно.

В работе проведено исследование параметров, предложенного авторами нового типа окна в выводе энергии СМК, интегрированного с выходным резонатором и рассчитанного на работу с повышенными мощностями.

2. Конструкция и принцип работы интегрированного в выходной резонатор СМК окна

Внешний вид вывода энергии СМК с предложенным интегрированным в выходной резонатор окном и распределение электрического поля в нём на рабочей частоте $f=2.856$ ГГц приведены на рисунке 1.

Выходной прямоугольный волновод (рисунок 1а), работающий на моде TE_{10} и закороченный с одного конца, опоясывает выходной резонатор СМК, имея с ним общую узкую стенку, в которой выполнены индуктивные щели связи, расположенные так, чтобы осуществлялось суммирование мощности, поступающей из каждой щели и на выходе закруглённого волновода образовалась бегущая волна.

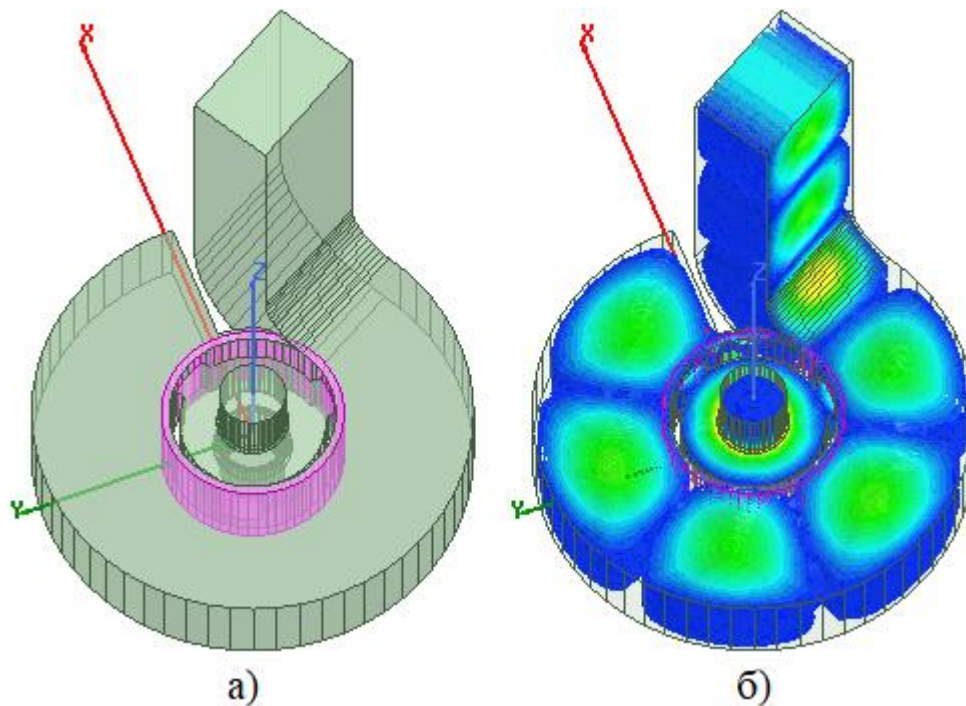


Рисунок 1. Конструкция вывода энергии СМК с интегрированным с выходным резонатором окном (а) и распределение электрического поля на рабочей частоте $f=2.856$ ГГц (б).

При этом вакуумноплотная керамика (выделена на рисунке 1а розовым цветом), выполненная в виде кольца, располагается в области с минимальным электрическим полем – в выходном резонаторе вблизи его внешней стенки или в волноводе вблизи его узкой стенки (рисунок 1б), что определяет пониженные диэлектрические потери. В последнем случае часть кольца проходит через запредельный участок волновода.

Процесс образования бегущей волны на выходе закороченного отрезка закруглённого волновода проиллюстрирован на рисунке 2.

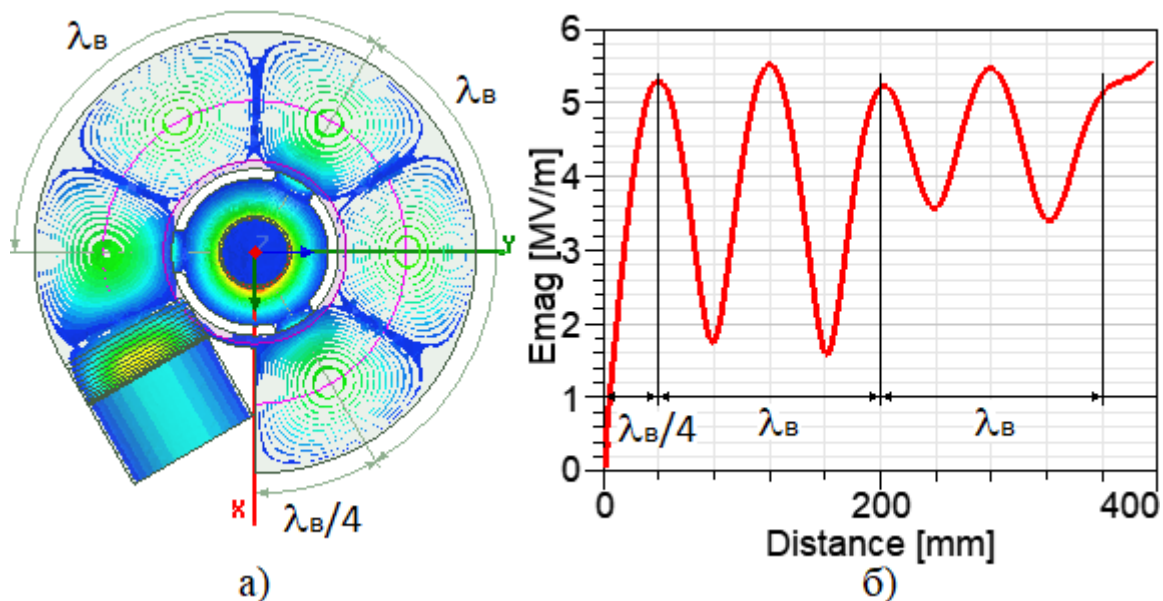


Рисунок 2. Распределение электрического поля в выводе энергии (а) и зависимость его комплексной амплитуды в середине широкой стенки закруглённого волновода от азимутальной координаты (б) при $P_{вх} = 40$ МВт, $f = 2.856$ ГГц. λ_w – длина волны в закруглённом волноводе.

При такой конструкции интегрированного окна отпадает необходимость обеспечения минимального КСВ в выводе энергии СМК – достаточно добиться требуемой нагруженной добротности выходного резонатора. Фактически узел представляет собой трансформатор импедансов с керамикой, расположенной в области минимума электрического поля.

3. Характеристики вывода энергии СМК с интегрированным в выходной резонатор окном

Синтез вывода энергии с интегрированным в выходной резонатор окном осуществлялся путём поэтапной оптимизации размеров входящих в вывод узлов, сводящей задачу многокритериальной оптимизации к нескольким одно-, двухкритериальным. Расчёт характеристик проводился в программе ANSYS HFSS.

На рисунке 3 представлена рассчитанная частотная зависимость мощности на выходе вывода энергии, оптимизированного на заданную частоту и нагруженную добротность, при возбуждении резонатора высокочастотным током в зазоре, моделирующим электронный пучок. Мощность, отбираемая от источника тока на центральной частоте, задавалась равной 40 МВт. При этом, как видно из рисунка 3, контурный КПД резонатора близок к единице.

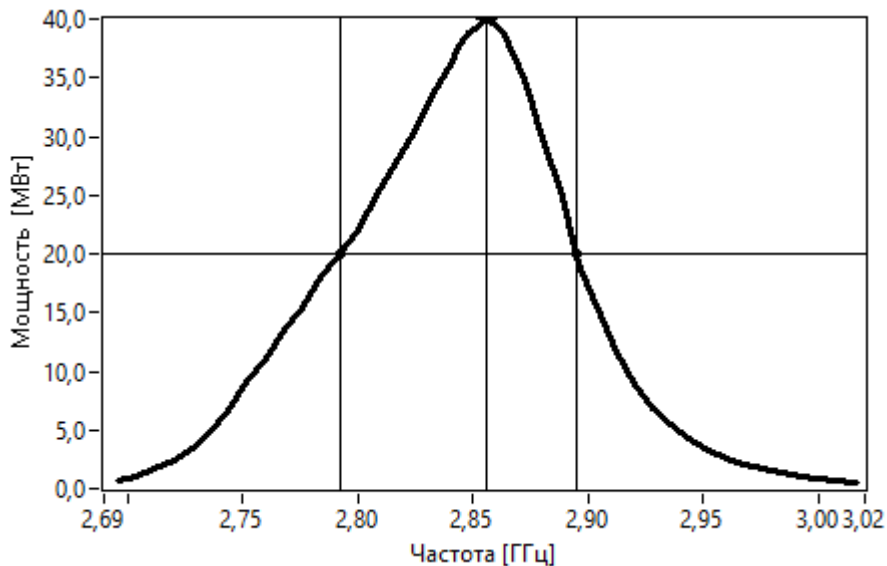


Рисунок 3. Частотная зависимость мощности на выходе вывода энергии при возбуждении резонатора высокочастотным током (с постоянной амплитудой) в зазоре. Частота настройки выходного резонатора $f = 2.856$ ГГц, нагруженная добротность $Q_n = 26$, при $P_{вх} = 40$ МВт на частоте $f = 2.856$ ГГц.

Рассчитанная импульсная мощность потерь в керамическом кольце, приводящая к его нагреву, составила 9,8 кВт. Как и предполагалось она оказалась значительно (примерно в 1,7 раза) меньше мощности потерь в керамическом диске баночного окна (пересчитанного на частоту $f = 2.856$ ГГц), работающего на смешанной моде $TE_{11} + TM_{11}$ [1].

Одной из основных причин ненадёжности окон в выводах энергии СМК при работе в импульсном режиме является наличие значительных тангенциальных компонент электрического поля на поверхности вакуумноплотной керамики, особенно в области спаев, приводящее к пробое по поверхности керамики. При этом предельное значение для используемого вида керамики составляет 8 МВ/м [1].

На рисунке 4 приведены распределения тангенциальных компонент электрического поля по центрам внутренней и внешней поверхностей керамического

кольца в плоскости XOY (см. рисунок 1а). Величина E_t в этой плоскости не превышает 1.3 МВ/м. Выбросы на краях щелей с внутренней стороны, обусловленные острыми ребрами на стенках щелей, могут быть устранены скруглением этих ребер.

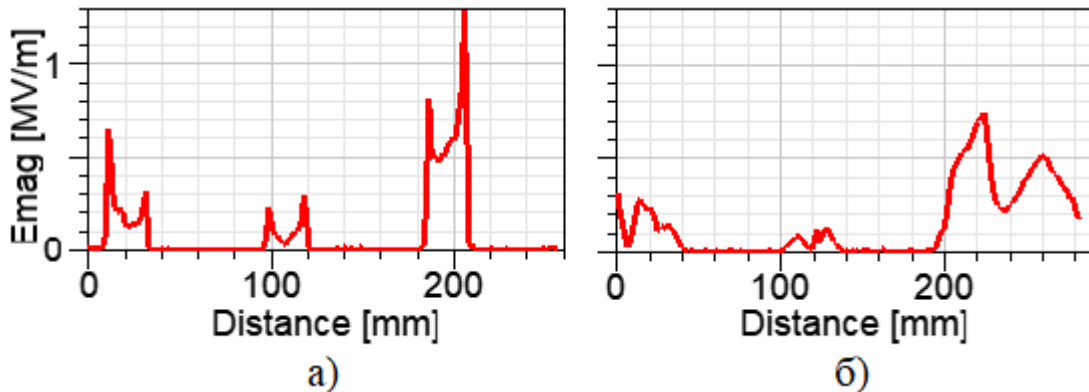


Рисунок 4. Распределение E_t по центрам внутренней (а) и внешней (б) поверхностей керамического кольца в плоскости XOY при $P_{вх}=40$ МВт, $f=2.856$ ГГц.

На рисунке 5 приведены распределения тангенциальной компоненты электрического поля по центрам внутренней и внешней поверхностей керамического кольца в щелях связи вдоль координаты z (см. рисунок 1а).

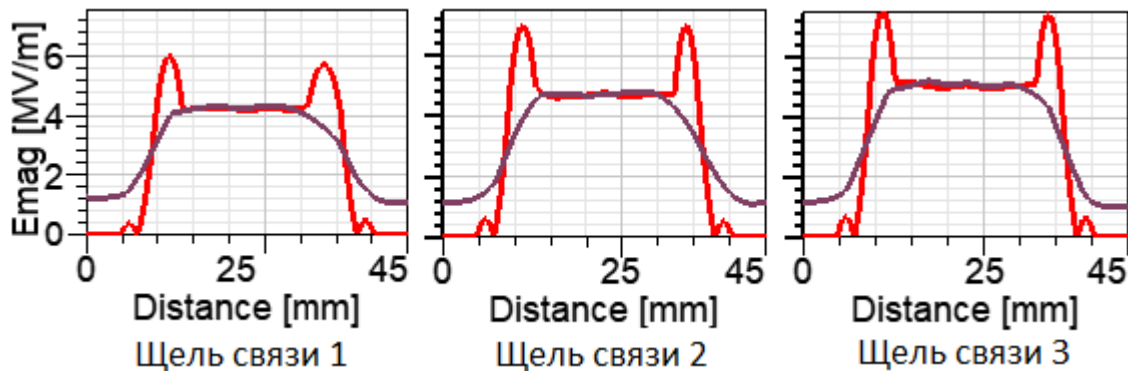


Рисунок 5. Распределение E_z по центрам внутренней (красные линии) и внешней (черные линии) поверхностей керамического кольца в щелях связи при $P_{вх}=40$ МВт, $f=2.856$ ГГц.

Величины E_t на внешней поверхности керамического кольца в щелях и на внутренней поверхности в центральной области не превышают 5 МВ/м. Однако по краям внутренней поверхности керамического кольца в щелях присутствуют выбросы до 7.5 МВ/м, связанные в данном случае с разной высотой резонатора и волновода. Увеличение высоты резонатора до высоты волновода или изменение расположения керамического кольца должны минимизировать эти выбросы. Но даже в таком варианте при входной мощности $P_{вх} = 40$ МВт на рабочей частоте $f = 2.856$ ГГц тангенциальные компоненты электрического поля на керамическом кольце в щелях связи не превышают предельного значения 8 МВ/м.

4. Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что вывод энергии СМК с предложенным окном, интегрированным с выходным резонатором, обеспечивает требуемые характеристики при выходной мощности $P_{вых} = 40$ МВт, и при этом потери в керамике значительно меньше аналогичных потерь в баночном окне, работающем на смешанной моде и являющимся самым высокомоощным.

Кроме того, в предложенном волноводном выводе энергии нет необходимости

хорошего согласования – достаточно обеспечить требуемую нагруженную добротность. При этом отсутствие отражений в волноводном тракте значительно повышает электропрочность.

Устранение выбросов тангенциальной компоненты электрического поля на поверхности керамики, как указано в п. 3, возможно путём дальнейшей оптимизации конструкции предложенного интегрированного окна и должно привести к улучшению его характеристик.

Список литературы

1. Prokofiev B.V., Martynenko M.A. A Simple Pillbox-Type Mixed-Mode Window for High Power Microwave Devices / B.V. Prokofiev, [et al.] // in 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2017. pp. 1-2.
2. Kazakov S.Yu. A new traveling-wave mixed-mode RF window with a low electric field in ceramic-metal brazing area / S.Yu Kazakov // KEK preprint 98-120, 1998, pp. 1 – 4.