

Выходная система сверхмощного клистрона S-диапазона частот

А.В. Галдецкий, А.Н. Савин, Н.А. Голованов, Медянцева Н.В.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в работе предложена конструкция выходной системы сверхмощного клистрона S-диапазона частот, обеспечивающая широкий диапазон нагруженных добротностей и симметрию распределения электрического поля в области пространства взаимодействия с электронным потоком. Приведены результаты теоретического исследования электродинамических параметров выходной системы.

Ключевые слова: сверхмощный клистрон, выходной резонатор, нагруженная добротность, характеристическое сопротивление

1. Введение

Сверхмощные клистроны (СМК) с импульсной мощностью $P_{имп} = 10 \div 150$ МВт широко применяются в системах накачки линейных ускорителей частиц [1].

Выходной резонатор СМК и система отбора мощности от него, образующие выходную систему, должны обеспечивать максимально возможный отбор СВЧ энергии от сгруппированного электронного потока, а также иметь значительную электропрочность для передачи больших уровней мощности [2].

Решение указанной задачи предполагает выбор оптимальных значений параметров выходной системы СМК, таких как нагруженная добротность Q_n , характеристическое сопротивление ρ на рабочем виде колебаний нагруженного выходного резонатора с частотой f_0 , и при этом обеспечение низких значений электрического поля в полости и токов на поверхностях выходной системы для предотвращения СВЧ пробоев и перегревов.

Традиционно, в СМК S-диапазона частот с импульсной мощностью $P_{имп} = 10 \div 20$ МВт отбор СВЧ энергии от сгруппированного электронного потока в выходной прямоугольный волновод осуществляется посредством одной ёмкостной щели связи, расположенной на боковой стенке выходного резонатора (рисунок 1а) [2].

Недостатками такого решения являются большая величина напряжённости электрического поля в области ёмкостной щели связи, приводящая к СВЧ пробоям при потоках передаваемой мощности более 25 МВт, а также значительная азимутальная неоднородность продольной компоненты электрического поля в области взаимодействия с электронным потоком, снижающая отбор СВЧ мощности от него.

Работа посвящена исследованию параметров предложенной авторами конструкции выходной системы СМК S-диапазона частот, позволяющей в значительной степени устранить указанные выше недостатки и, соответственно, обеспечить повышение выходной мощности.

2. Объект и результаты исследования

Предложенная выходная система СМК (рисунок 1б) представляет собой выходной резонатор 1, связанный через индуктивную щель 4 с выходным прямоугольным волноводом 2, а также с закороченным отрезком прямоугольного волновода 5 через такую же щель 4, расположенную симметрично относительно плоскости XOZ.

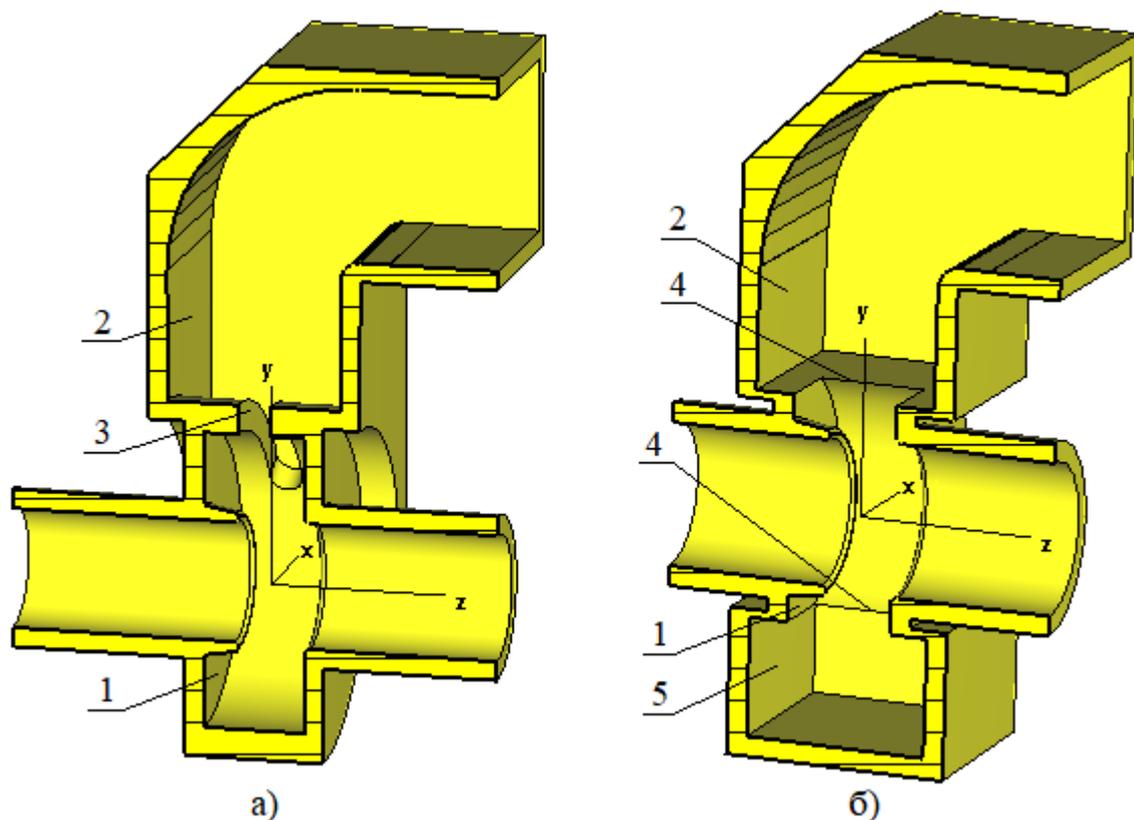


Рисунок 1. Выходная система СМК с одной ёмкостной щелью связи (а) и с двумя индуктивными щелями связи (б): 1 – выходной резонатор; 2 – выходной прямоугольный волновод; 3 – ёмкостная щель связи; 4 – индуктивные щели связи; 5 – закороченный отрезок прямоугольного волновода.

Использование индуктивных щелей связи 4 с высотой равной высоте резонатора 5 вместо узких ёмкостных 3 (см. рисунок 1) должно значительно снизить напряжённость электрического поля в области щелей 4 и, следовательно, вероятность СВЧ пробоя, но приводит к возрастанию поверхностных токов на их боковых гранях и, соответственно, к дополнительному нагреву выходной системы СМК.

Для уменьшения поверхностных токов боковые грани щелей связи 4 скруглялись, а также для снижения напряжённости электрического поля скруглялись их верхние и нижние края.

Симметрия электрического поля в области пространства взаимодействия в плоскости XOY (см. рисунок 1б) обеспечивается подстройкой длины закороченного отрезка прямоугольного волновода 5, ориентировочно равной четверти длины волны в нём на рабочей частоте f_0 .

В процессе исследования параметров рассматриваемой конструкции выходной системы СМК были получены три её варианта, имеющие одну рабочую частоту f_0 и нагруженные добротности $Q_n = 23, 28, 32$ при одинаковом пространстве взаимодействия с электронным потоком (зазор, пролётный канал, высота резонатора).

Требуемые величины нагруженной добротности Q_n выходной системы СМК обеспечивались подбором ширины щелей связи путём одновременного симметричного смещения выходного и закороченного прямоугольных волноводов относительно центра резонатора. При этом уход резонансной частоты от заданной величины f_0 компенсировался изменением радиуса резонатора.

Расчёт параметров рассматриваемой выходной системы СМК осуществлялся методом конечных элементов в программе 3D моделирования электромагнитных полей.

Рассчитанные распределение мгновенных значений амплитуды напряжённости электрического поля в оптимизированной выходной системе СМК с $Q_n = 28$ при $P_{\text{вых}} = 20$ МВт, а также распределение модуля комплексной амплитуды плотности поверхностного тока приведены на рисунке 2. Фаза колебаний подобрана таким образом, чтобы в резонаторе было максимальное значение электрического поля.

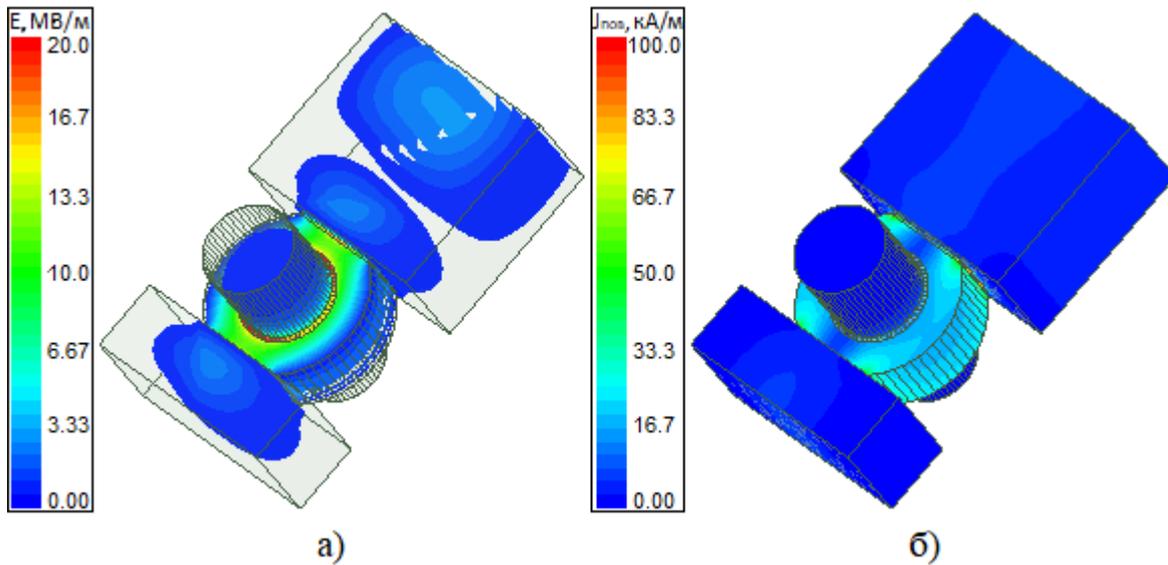


Рисунок 2. Распределение электрического поля (а) и комплексной амплитуды поверхностных токов (б) в выходной системе СМК с двумя индуктивными щелями связи с $Q_n = 28$ на рабочей частоте f_0 (в S-диапазоне) при $P_{\text{вых}} = 20$ МВт.

Как и предполагалось, электрическое поле в резонаторе является симметричным относительно плоскости XOY , а максимальные поверхностные токи располагаются в области боковых граней щелей связи. Поверхностные токи в центральных областях боковых граней щелей связи находятся в пределах $80 \div 90$ кА/м при всех рассмотренных значениях Q_n .

Для оценки влияния нагруженной добротности Q_n рассматриваемой выходной системы СМК на распределение полей в ней на рисунке 3 приведены рассчитанные на рабочей частоте f_0 при $P_{\text{вых}} = 20$ МВт комплексные амплитуды продольной компоненты электрического поля на оси (а) и электрического поля в центре зазора (б) резонатора выходной системы СМК, а на рисунке 4 – комплексные амплитуды продольной компоненты электрического поля в центре щели связи резонатора вдоль оси OZ (а) и вдоль оси OX (б) выходной системы СМК.

Пунктирной линией на рисунках 3, 4 обозначен критический уровень напряжённости электрического поля, превышение которого вызывает СВЧ пробой в вакууме [3].

Как видно (рисунок 3), увеличение нагруженной добротности Q_n приводит к значительному увеличению напряжённости электрического поля в области пространства взаимодействия с электронным потоком, что может приводить к СЧ пробоям (см. рисунок 3б, $Q_n = 32$).

При этом (рисунок 4) в области индуктивных щелей связи электрические поля имеют относительно небольшие величины и увеличиваются незначительно, что позволяет передавать через них значительно большие уровни мощности.

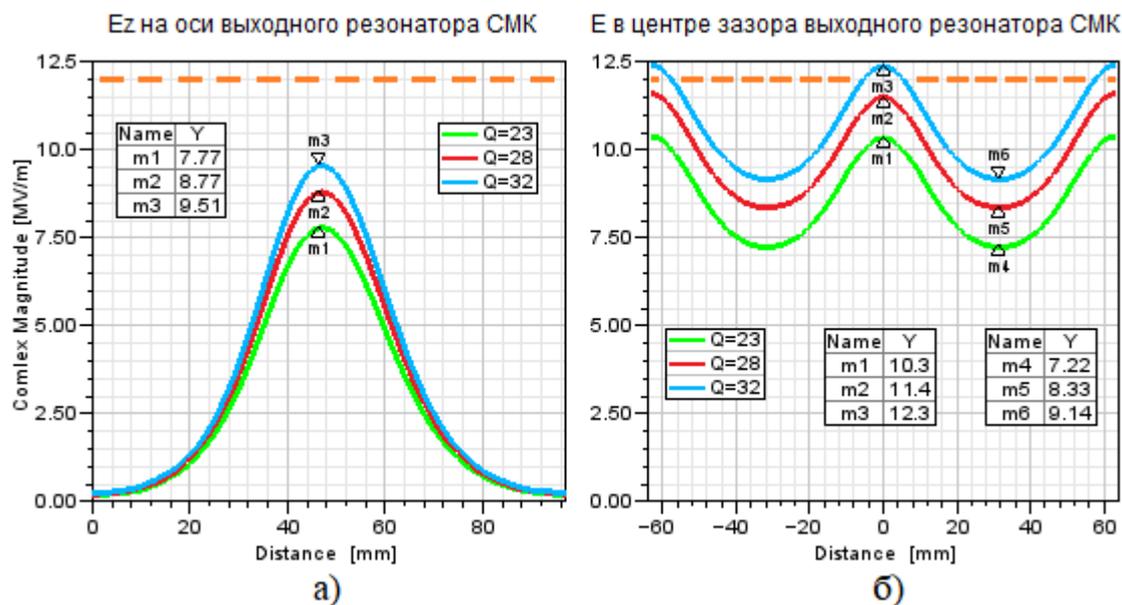


Рисунок 3. Комплексные амплитуды продольной компоненты электрического поля на оси (а) и электрического поля в центре зазора (б) резонатора выходной системы СМК с двумя индуктивными щелями связи с различными Q_n на рабочей частоте f_0 при $P_{вых}=20$ МВт.

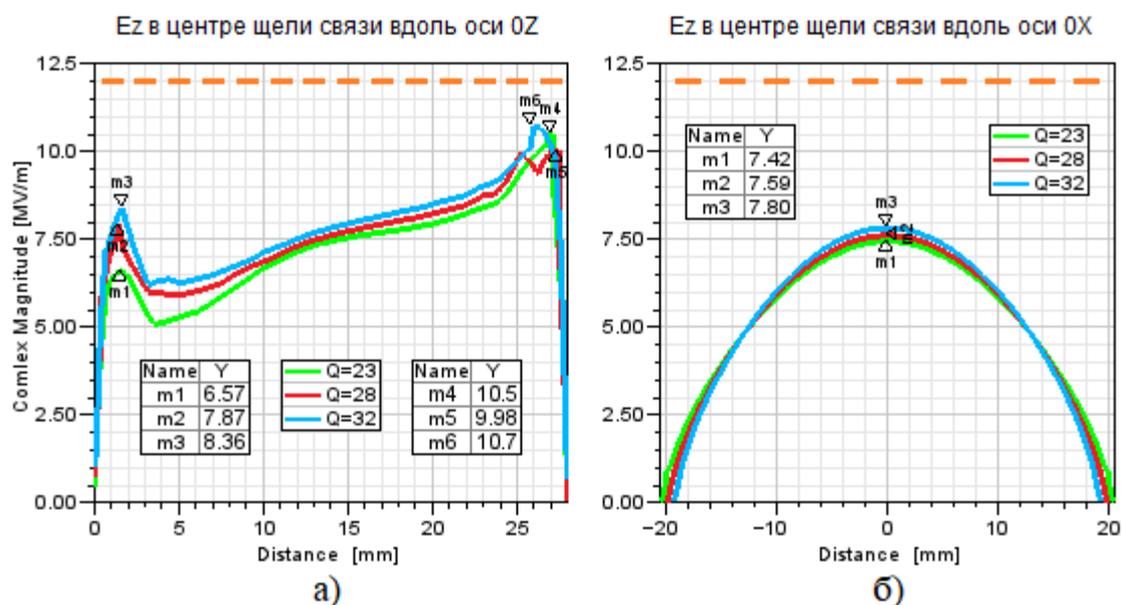


Рисунок 4. Комплексные амплитуды продольной компоненты электрического поля в центре щели связи резонатора вдоль оси OZ (а) и вдоль оси OX (б) выходной системы СМК с двумя индуктивными щелями связи с различными Q_n на рабочей частоте f_0 при $P_{вых}=20$ МВт.

Интегральные параметры, характеризующие рассматриваемую выходную систему СМК, рассчитанные при различных нагруженных добротностях Q_n на рабочей частоте f_0 при $P_{вых}=20$ МВт, приведены в таблице 1.

Как видно, увеличение Q_n приводит к увеличению характеристического сопротивления ρ , отвечающего за эффективность взаимодействия электрического поля резонатора со сгруппированным электронным потоком.

Однако при этом увеличиваются напряжения в критических областях и потери в стенках, что может приводить к СВЧ пробоям и перегревам. Следовательно, в процессе проектирования требуется выбирать параметры выходной системы СМК, обеспечивающие баланс между её эффективностью и надёжностью.

Таблица 1. Интегральные параметры выходной системы СМК с двумя индуктивными щелями связи с различными Q_n на рабочей частоте f_0 при $P_{вых}=20$ МВт

Нагруженная добротность Q_n	Характеристическое сопротивление ρ , Ом	Напряжение на оси резонатора, кВ	Напряжение на щели связи, кВ	Мощность поверхностных потерь, кВт
23	78,1	268,7	198,4	83,0
28	81,9	303,5	207,8	97,9
32	84,5	329,7	216,2	112,9

3. Заключение

Предложена конструкция выходной системы сверхмощного клистрона S-диапазона частот, обеспечивающая широкий диапазон нагруженных добротностей и симметрию распределения электрического поля в области пространства взаимодействия с электронным потоком.

По результатам теоретического исследования установлено, что при оптимальном выборе параметров, обеспечивающем баланс между эффективностью и надёжностью, предложенная выходная система СМК позволяет значительно увеличить передаваемую мощность.

Список литературы

1. CHAPTER 5. X-band RF power sources // ISG Progress Report. – April, 2000. – P. 150 – 175.
2. Faillon G.J. THOMSON high peak power klystrons / PS Klystron Modulator Technical Meeting. October 7th and 8th 1991. – Cern. – P. 239.
3. Галдецкий А.В., Савин А.Н., Ключников Н.А. Вывод энергии баночного типа сверхмощного клистрона S-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 4(547). – С. 64 – 75.