

Разработка и исследование системы вывода СВЧ-энергии в сверхмощных клистронах S-диапазона частот

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

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: методами математического моделирования исследованы варианты конструкций выходной системы сверхмощного клистрона S-диапазона частот с выходной импульсной мощностью до 20 МВт. Проведён сравнительный анализ их электродинамических и энергетических характеристик. Авторами предложена выходная система, обеспечивающая уменьшение неоднородности распределения электрического поля в области пространства взаимодействия с электронным потоком. При этом конструкция имеет высокую эффективность и позволяет работать с повышенными выходными мощностями.

Ключевые слова: сверхмощный клистрон, система вывода СВЧ-энергии

1. Введение

Одним из направлений развития современной вакуумной СВЧ электроники является повышение выходной мощности. В связи с этим актуальна задача создания сверхмощных клистронов (СМК) с импульсной мощностью до 50 МВт для их использования в системах накачки линейных ускорителей частиц [1]. При этом особого внимания требует разработка эффективной выходной системы (ВС), представленной выходным резонатором вместе с системой отбора от него мощности.

К ВС СМК предъявляются противоречивые требования: она должна обеспечивать максимально возможный отбор СВЧ энергии от сгруппированного электронного потока (ЭП) для получения высокого КПД и при этом иметь значительную электропрочность для передачи больших уровней мощности [2].

Указанная задача решается на этапе разработки ВС путём подбора оптимальных значений эффективного характеристического сопротивления ρM^2 нагруженного выходного резонатора на частоте f_0 рабочего вида колебания, нагруженной добротности Q_{load} , а также выбором конструкции ВС, обеспечивающей безопасное с точки зрения СВЧ пробоев электрическое поле в её полости и незначительные поверхностные токи для предотвращения перегревов.

Цель работы: исследование и сравнение электродинамических и энергетических параметров различных вариантов конструкций ВС СМК S-диапазона частот для оценки возможности работы с высокими выходными мощностями.

2. Объекты и результаты исследования

Рассмотрим ряд конструкций ВС СМК с импульсной мощностью до 20 МВт, в которых отбор СВЧ энергии от сгруппированного ЭП в выходной прямоугольный волновод (2) осуществляется через одну емкостную (3) или индуктивную (4) щели связи, расположенные на боковой стенке выходного резонатора (1) (рисунок 1 а, б), а также двумя индуктивными щелями связи, где дополнительная щель связана с закороченным отрезком прямоугольного волновода (5) (рисунок 1 в) [3].

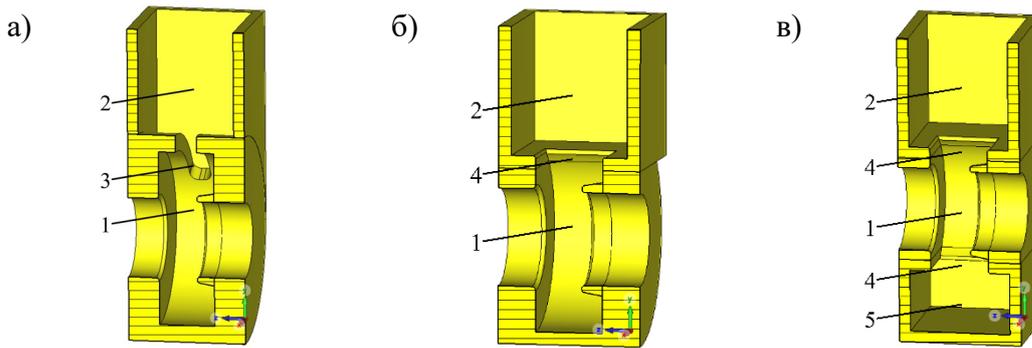


Рисунок 1. Выходная система СМК с одной емкостной щелью связи (а), с одной индуктивной щелью связи (б) и с двумя индуктивными щелями связи: 1 – выходной резонатор; 2 – выходной прямоугольный волновод; 3 – емкостная щель связи; 4 – индуктивные щели связи; 5 – закороченный отрезок прямоугольного волновода.

Представленные на рисунке 1 ВС имеют идентичную геометрию пространства взаимодействия: ширину зазора, диаметр пролётного канала, высоту резонатора. Рабочая частота $f_0 = 2.797$ ГГц.

Вначале проведено исследование конструкций ВС на наличие СВЧ пробоев, а затем, с целью определения порога появления возвратных электронов, расчёт нагруженного ЭП выходного резонатора при следующих параметрах клистрона: ускоряющее напряжение $U_0 = 185$ кВ, ток ЭП $I_0 = 200$ А.

С помощью моделирования методом конечных элементов распределения электромагнитных полей выявлены критически важные с точки зрения СВЧ пробоев области ВС: зазор выходного резонатора и щель связи с выходным волноводом. Подобранные размеры всех ВС обеспечивают отсутствие пробоев в указанных областях. Результаты в цилиндрической системе координат приведены на рисунке 2.

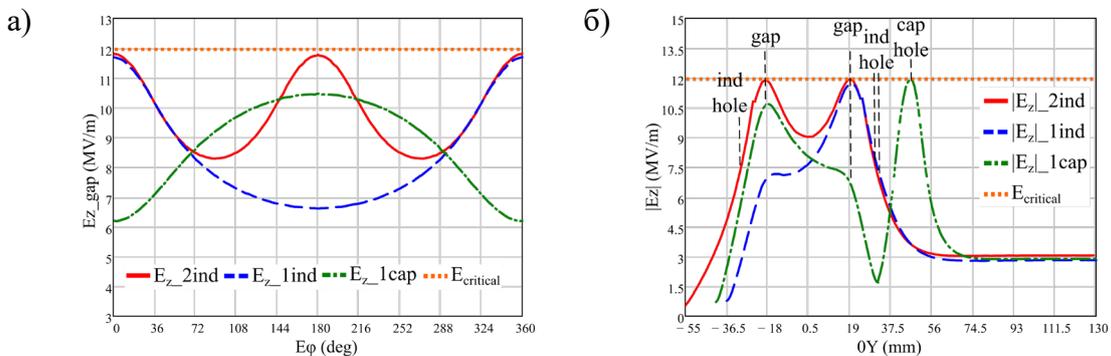


Рисунок 2. Зависимости комплексных амплитуд продольной компоненты электрического поля исследуемых ВС по центру зазора резонатора на радиусе канала в цилиндрической системе координат от азимутального угла (а), по центру щели связи вдоль оси OY (б). Сплошная линия – две индуктивные щели связи, пунктир – одна индуктивная, штрих-пунктир – одна емкостная щель связи, точки – критическая напряженность поля.

Как видно из рисунка 2, наличие дополнительного закороченного отрезка прямоугольного волновода значительно снижает азимутальную неоднородность электрического поля в области его взаимодействия с ЭП по сравнению с ВС, имеющими одну щель связи. Коротким пунктиром обозначен критический уровень напряжённости электрического поля, превышение которого вызывает СВЧ пробой в вакууме [4].

В таблице 1 приведены рассчитанные для оценки эффективности взаимодействия параметры выходного резонатора: ρM^2 , нагруженные добротности, предельные

выходные мощности $P_{вых}$, обусловленные особенностями рассматриваемых ВС.

Таблица 1. Энергетические параметры конструкций ВС СМК

Тип ВС СМК	Эфф. хар. сопр. ρM^2 ,	Нагр. добр., Q_{load}	Предельная P_{out} , ограниченная зазором, МВт	Предельная P_{out} , ограниченная щелью связи, МВт
	Ом			
1 емкостная щель	25.8	24	32.6	18.3
1 индуктивная щель	30.5	20	17.5	55.9
2 индуктивные щели	34.5	23	20.3	52.4

Как следует из таблицы 1, без учёта влияния возвратных электронов, применение в ВС индуктивных щелей вместо ёмкостных позволяет увеличить в 2 раза передаваемую на выход мощность за счёт снижения напряжённости электрического поля в области щелей и соответственно снизить вероятности СВЧ пробоев, а также увеличить эффективное характеристическое сопротивление.

3. Элементы теории возбуждения выходного резонатора наведённым током

Наличие возвратных электронов в зазоре выходного резонатора клистрона приводит к снижению выходной мощности. Для определения порога их появления необходимо решить задачу возбуждения резонатора сгруппированным ЭП.

В работах [5, 6] авторами были предложены методики расчёта электродинамических параметров нагруженного выходного резонатора с помощью его возбуждения дискретными источниками тока, а также формализма Z-матрицы. Используя данные подходы для исследуемых конструкций с одной емкостной, одной и двумя индуктивными щелями связи (рисунок 1), был проведён расчёт процесса отбора энергии от сгруппированного кольцевого ЭП при его пролёте через зазор нагруженного выходного резонатора связанного с внешним трактом.

Согласно [5], источники наведённого тока можно представить в виде размещённых в канале по окружности идентичных парциальных дискретных источников тока (рисунок 3 а).

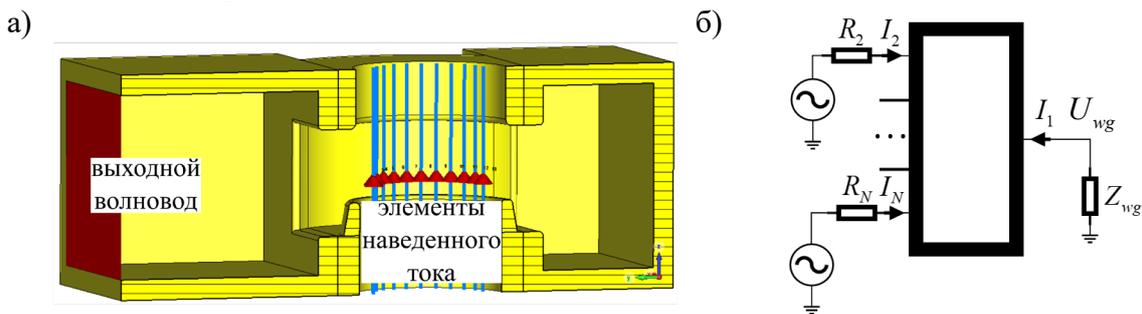


Рисунок 3. Возбуждение выходной системы СМК наведёнными парциальными токами (а), эквивалентное представление нагруженного выходного резонатора в виде N-полюсника (б).

Наведённый ток $I_{ind} = Mk_1 I_0$ определяется электродинамическими параметрами, геометрией пространства взаимодействия группирователя и выходного резонатора. Здесь k_1 – коэффициент относительной первой гармоники сгруппированного ЭП.

Для отбора максимальной выходной мощности от сгруппированного ЭП была проведена оптимизация конструкции выходного резонатора и щели связи путём подбора их геометрии. По результатам расчёта было определено наведённое

напряжение на зазоре резонатора U_{gap} (рисунок 4 а, б) и передаваемая в выходной волновод мощность P_{out} (рисунок 4 в, г).

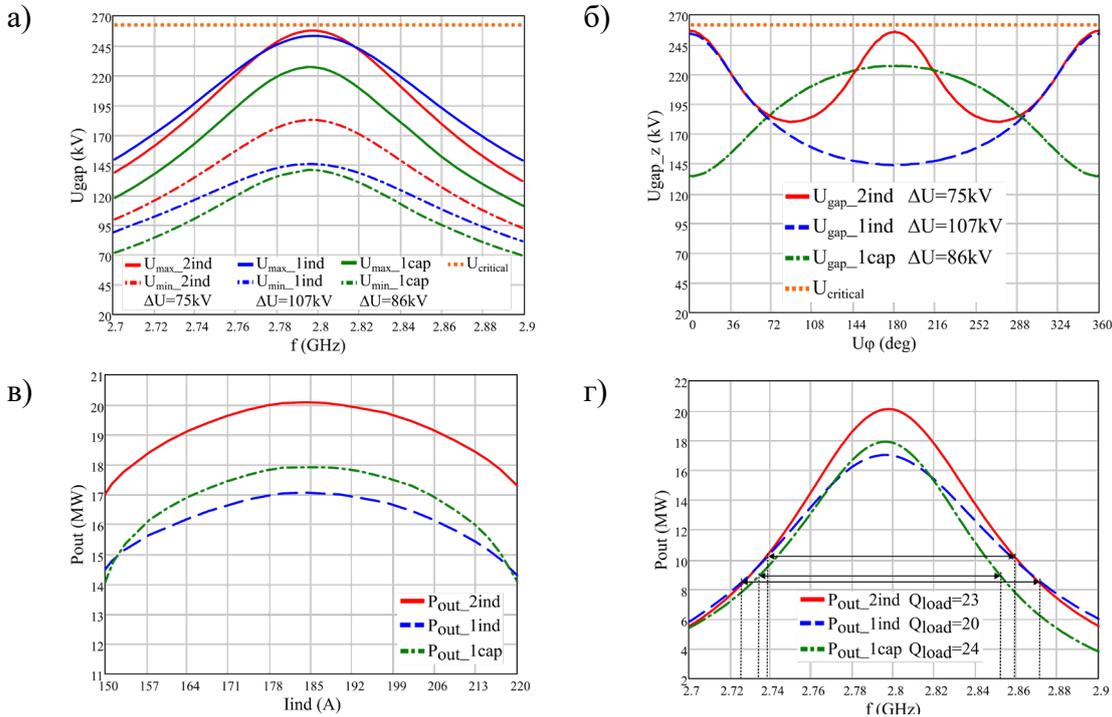


Рисунок 4. Зависимости максимального и минимального напряжения на зазорах рассматриваемых выходных систем в полосе частот (а). Перепад напряжения по зазору на рабочей частоте (б). Зависимости выходной мощности от наведенного на зазоре резонатора тока (в). Частотные зависимости выходной мощности ВС вместе с нагруженной добротностью (г). Сплошная линия – две индуктивные щели связи, пунктир – одна индуктивная, штрих-пунктир – одна емкостная щель связи, точки – напряжение при котором наблюдается эффект возвратных электронов.

Согласно результатам, представленным на рисунке 4, подбор оптимальной геометрии щелей связи конструкций ВС, при одинаковом пространстве взаимодействия, позволил для случая ВС с двумя индуктивными щелями связи получить наибольшую выходную мощность с минимальным перепадом напряжения по зазору. При этом, как видно из рисунка 4 б, амплитуда напряжения при которой возникают возвратные электроны (обозначена коротким пунктиром) не достигается, а уровень выходной мощности при заданном наведённом токе - максимален.

Аналогичный способ вычисления напряжения на зазоре нагруженного резонатора, основанный на использовании формализма Z -матрицы [6], заключается в следующем. Для линейной системы наведённый ток по принципу суперпозиции можно представить в виде суммы N кратных токов. Тогда, нагруженный N парциальными наведёнными токами выходной резонатор можно представить как $(N+1)$ -полюсник описываемый Z -матрицей (рисунок 3 б).

Для ВЧ напряжения U_{wg} в области выходного волновода в нагруженном резонаторе получаем:

$$U_{wg} = \frac{I_{ind}}{N} \sum_{j=2}^N Z_{1j} / \left(1 + \frac{Z_{11}}{Z_{wg}} \right), j = 2, \dots, N, \quad (1)$$

где Z_{ij} – элемент Z -матрицы резонатора, Z_{wg} – волновой импеданс, I_{ind} – суммарный наведенный в резонаторе ток.

Пренебрегая проводимостью ЭП G_b , для ВЧ напряжения U_i в области i -го элемента с наведенным током в нагруженном резонаторе получаем:

$$U_i = \frac{I_{ind}}{N} \left\{ \sum_{j=2}^N Z_{ij} - \left(Z_{i1} \sum_{j=2}^N Z_{1j} \right) \right\} / (Z_{11} + Z_{wg}), \quad i, j = 2, \dots, N. \quad (2)$$

Напряжение в резонаторе в области i -го элемента определяется не только током самого i -го элемента, но и всеми остальными элементами тока. Тогда выходная мощность определяется вкладами всех парциальных наведённых токов:

$$P_{out} = \frac{I_{ind}^2}{2Z_{wg} N^2} \left(\sum_{j=2}^N Z_{1j} \right)^2 / \left(1 + \frac{Z_{11}}{Z_{wg}} \right)^2, \quad j = 2, \dots, N. \quad (3)$$

Результаты, полученные указанными выше методами согласуются. Сравнение выходных параметров конструкций ВС СМК приведено в таблице 2.

Таблица 2. Выходная мощность и КПД конструкций ВС СМК

Тип ВС СМК	Выходная мощность P_{out} ,		КПД η
	МВт		
1 емкостная щель	17.9		48
1 индуктивная щель	17.0		46
2 индуктивные щели	20.1		54
Однородное поле в зазоре (идеализированный случай)	24.1		65

Согласно полученным частотным зависимостям выходной мощности (рисунок 4 г), ВС с двумя индуктивными щелями связи имеет прирост выходной мощности $2 \div 3$ МВт, а по КПД $6 \div 8$ % по сравнению с ВС с одной емкостной или одной индуктивной щелью связи соответственно.

Наличие щелей связи во всех случаях ВС приводит к неоднородности электрического поля в области пространства взаимодействия, что приводит к падению выходной мощности по сравнению с идеализированным случаем – когда перепад напряженности поля на зазоре отсутствует. В идеальном случае максимальная выходная мощность составляет $P_{out\max} = 24.1$ МВт.

4. Заключение

Проведено исследование и сравнение электродинамических и энергетических параметров различных вариантов конструкций ВС СМК S-диапазона частот для оценки возможности работы с выходными мощностями порядка 20 МВт. По результатам теоретического исследования и математического моделирования установлено, что при оптимальном выборе параметров, обеспечивающем баланс между эффективностью и надёжностью, предложенная конструкция ВС СМК позволяет работать с повышенными на $2 \div 3$ МВт выходными мощностями и увеличенным на $6 \div 8$ % КПД по сравнению с традиционными конструкциями.

На предложенную конструкцию ВС СМК с двумя индуктивными щелями связи получен патент на изобретение № 2808235 (приоритет 24.05.23), опубликован 28.11.23, бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 34 2023г.

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. Савин А.Н., Голованов Н.А., Галдецкий А. В. Исследование параметров выходных систем сверхмощных клистронов S-диапазона // 33-я Международная научно-техническая конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Крымико-2023, 10-16 сентября 2023 г., Севастополь. Сборник научных трудов – 2023. - Вып. 5. – С. 11-12.
4. 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 (in Russian).
5. Голованов Н. А., Галдецкий А. В. Особенности учёта неоднородности СВЧ поля в области пространства взаимодействия резонатора многолучевого клистрона. //Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. – 2023. – С. 228-233.
6. Галдецкий А. В. О возбуждении резонаторов многолучевых клистронов электронными пучками // 31-я Международная научно-техническая конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Крымико-2021, 5-11 сентября 2021 г., Севастополь. Сборник научных трудов – 2021. - Вып. 3. – С. 55-56.