

Разработка и экспериментальные исследования импульсного усилительного клистрона S-диапазона импульсной мощностью 5 МВт

Г.М Матиенко, В.И Оконенко., И.С Кузнецов, В.М. Саблин, Д.А. Калашников

АО «НПП «Торий»

Аннотация: в работе представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований импульсного клистрона КИУ-287 S-диапазона длин волн с выходной мощностью 5 МВт. Разработка прибора осуществлялась в рамках задачи импортозамещения зарубежных клистронов Thales TH 2173 F и CPI VKS-8262 F, широко применяемых в медицинском оборудовании и комплексах стерилизации. Предложены объяснения отклонений результатов испытаний от теоретических расчётов. Выбраны направления дальнейшей модернизации конструкции.

Ключевые слова: Клистрон, высокая импульсная мощность СВЧ.

1. Введение

В условиях прекращения поставок и сервисного обслуживания зарубежных клистронов предприятиями иностранных производителей возникла необходимость создания отечественного аналога для медицинских установок и систем стерилизации. Отсутствие приборов ставит под угрозу стабильную эксплуатацию оборудования, критически важного для медицинской отрасли и отрасли стерилизации.

Перед АО «НПП «Торий» была поставлена задача разработки импульсного усилительного клистрона, способного заменить зарубежные аналоги. В 2023 – 2025 г. в рамках государственной субсидии по Постановлению Правительства Российской Федерации от 24.07.2021 № 1252 (соглашение от 3.10.2022 №020-11-2022-975) предприятием были разработаны и изготовлены опытные образцы клистрона КИУ-287 с импульсной мощностью 5 МВт.

Особенностью проекта стало отсутствие на момент начала разработки стенда динамических испытаний для приборов данного класса, что потребовало параллельного создания испытательной инфраструктуры.

Стоит отметить, что основным направлением деятельности АО «НПП «Торий» являются разработка мощных малогабаритных многолучевых клистронов, и опыт проектирования мощных однолучевых клистронов отсутствовал. Необходимо было учитывать релятивистские эффекты при напряжениях 125 кВ и выше, а также неравномерность траекторий электронного пучка вдоль электродинамической системы.

2. Особенности разработки и сравнение результатов трёхмерного моделирования с экспериментальными исследованиями.

2.1. Особенности разработки.

Разработка клистрона проводилась без применения реверс – инжиниринга. По известным габаритам клистрона была создана собственная резонаторная система. В отличие от зарубежных аналогов подобных клистронов, где согласно опубликованным данным [1-2] применялись тороидальные резонаторы, в разработке использованы призматические резонаторы с отработанной системой настройки,

используемой на предприятии.

Продольное сечение прибора представлено на (рис.1).

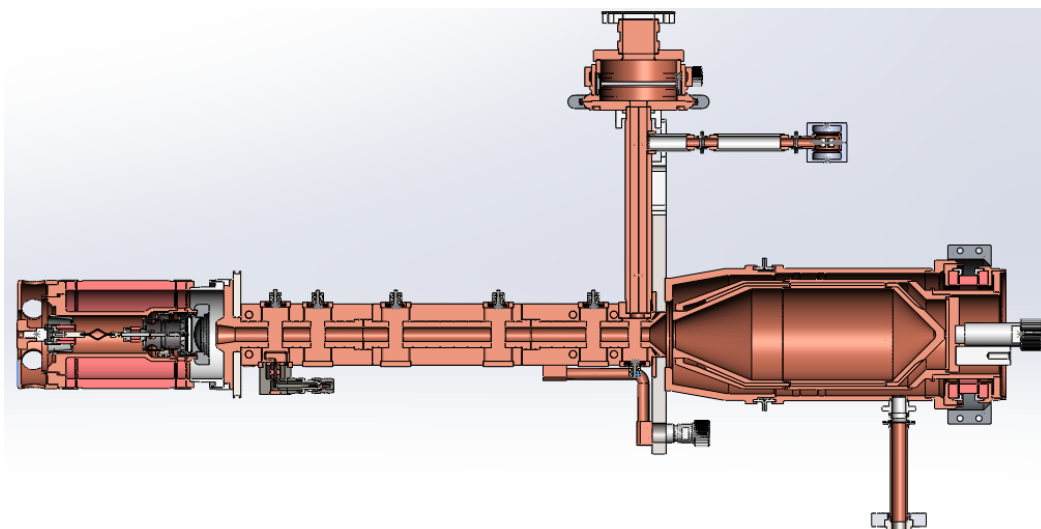


Рис. 1. Продольное сечение КИУ-287

Для проведения испытаний и настройки изделия был создан стенд динамических испытаний (рис.2), включающий в себя:

- соленоид фокусирующей системы;
- модулятор высоковольтного питания 125 кВ с собственной системой управления;
- выходной СВЧ-тракт;
- элементы входного СВЧ-тракта для возбуждения клистрона;
- система охлаждения.



Рис. 2. СДИ прибора КИУ-287, включающий в себя модулятор, соленоид фокусирующей системы, выходной СВЧ-тракт и систему охлаждения

2.2. Экспериментальные исследования и сравнение с результатами трёхмерного моделирования.

Было проведено моделирование прибора в трёхмерной электродинамической программе. Зависимость сигнала выходного порта от времени представлена на (рис.3).

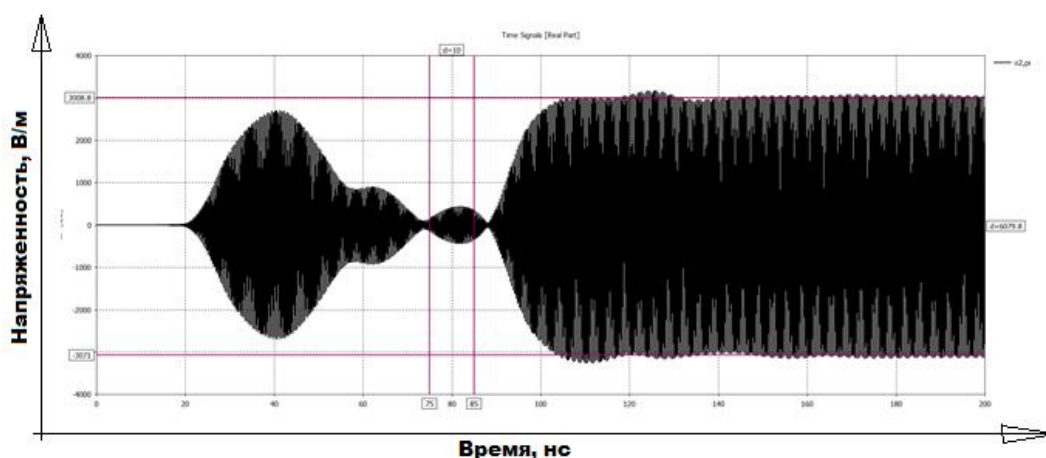


Рис. 3. Выходной сигнал при 30 Вт входной мощности

Моделирование показало токопрохождение в динамическом режиме на уровне 96%. Основная область токоосаждения локализована в предколлекторной части выходного резонатора. Предполагалось, что данная нагрузка пучка не окажет существенного влияния на характеристики прибора с учётом рассчитанной системы охлаждения. Однако эксперимент показал, что при высоком значении магнитного поля и недостаточном заполнении выходного резонатора с учётом динамической фокусировки мощность оказалась ниже расчётной. В связи с этим потребовалась корректировка тока соленоида. Экспериментальная зависимость выходной мощности от тока соленоида представлена на (рис.4).

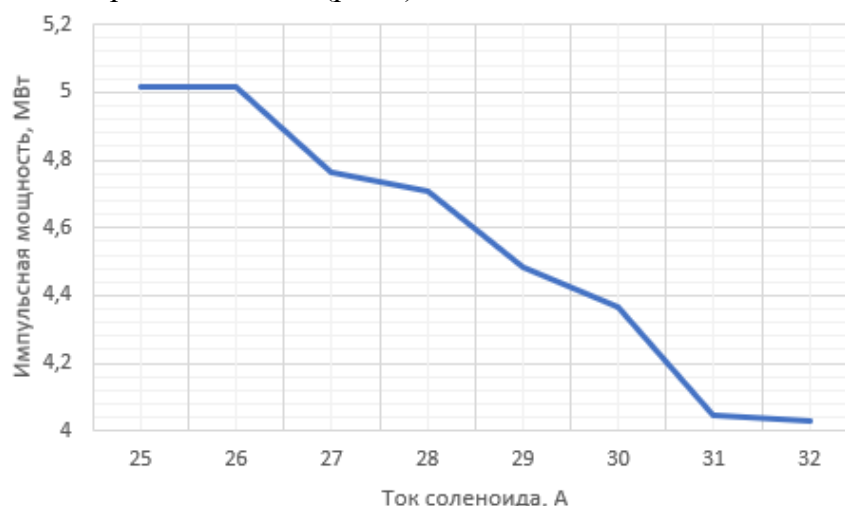


Рис. 4. Зависимость импульсной мощности от тока соленоида при $U_k = 125$ кВ и $Q = 460$

Дальнейшее снижение тока соленоида оказалось невозможным вследствие увеличения токоосаждения, роста температуры прибора, усиления газоотделения и нестабильности работы. Интенсивный нагрев подтверждается измерениями температуры фланца, значение которой составило около 90 °С.

При увеличении частоты посылок наблюдалось уменьшение тока катода (рис.5), предположительно связанное с травлением катода, а также дополнительный нагрев

вследствие роста средней мощности.

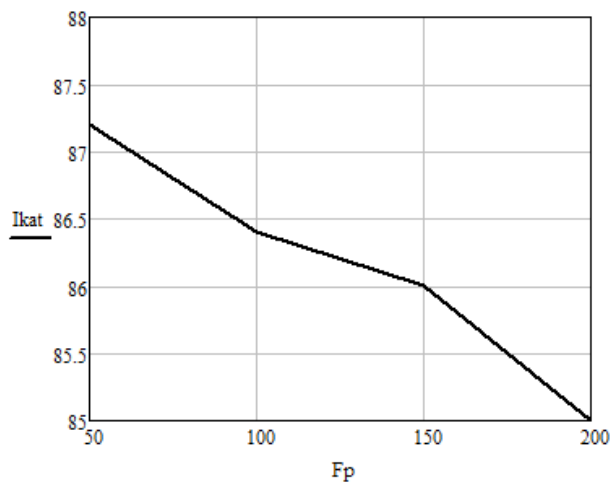


Рис. 5. Уменьшение тока с ростом частоты посылок (с уменьшением скважности).

Предположительно, в связи с уходом геометрических параметров последнего и предпоследнего резонатора, повышенным газоотделением и возможным образованием ионных сгустков, с уменьшением скважности происходило уменьшение КПД и смещение оптимальной входной мощности.

Экспериментальная зависимость выходной мощности от входного сигнала в сравнении с моделированием представлена на (рис.6).

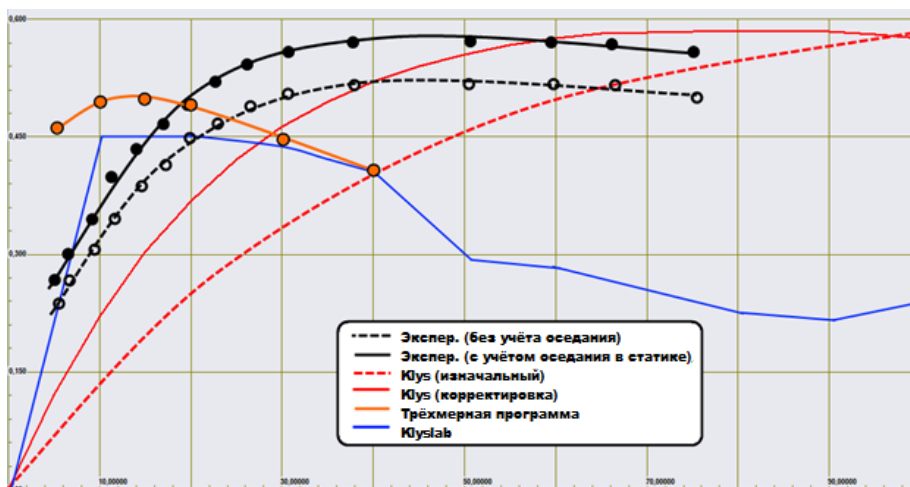


Рис. 6. Сравнение с результатами эксперимента (напряжение 125кВ, ток 86,4 А)

В статическом режиме токопрохождение составило 89%, однако при таком значении токопрохождения ожидаемый КПД должен был бы превышать теоретические ограничения КПД при данном микропервансе, что позволяет предположить локализацию области токоосаждения за зазором выходного резонатора. Поэтому мы можем предположить, что токооседание не влияет на КПД и корректнее будет рассматривать пунктирный график на (рис. 6).

Амплитудно-частотная характеристика представлена на (рис.7.) Отмечено резкое увеличение КПД в области частот около 2866 МГц, это может быть следствием как изменения геометрических параметров резонаторов, так и неточности измерений вне полосы пропускания циркулятора.

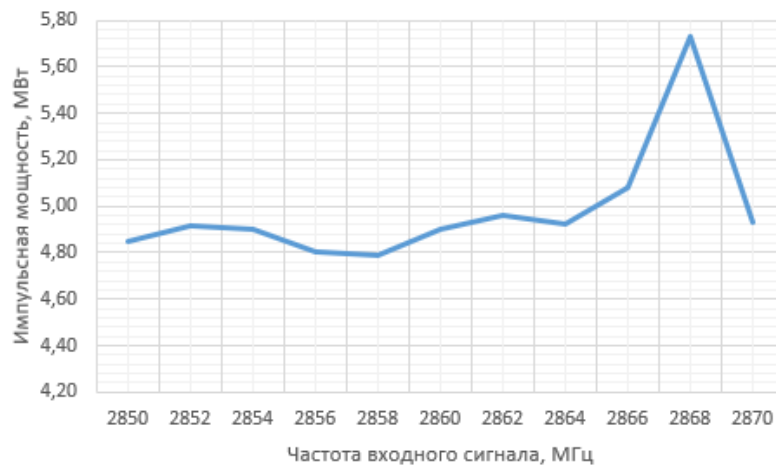


Рис. 7. АЧХ прибора КИУ – 287

Отклонение экспериментальных результатов от расчётов составило:

- 2% по КПД и 30 Вт по оптимальной входной мощности относительно трёхмерного моделирования;
- до 8% по КПД по сравнению с расчётами в программе Klys.

3. Заключение.

В работе представлены результаты разработки и экспериментальные исследования импульсного усилительного клистрона КИУ-287.

Показано, что несмотря на высокую степень совпадения расчётных и экспериментальных данных, выявлены расхождения, обусловленные влиянием магнитного поля на степень заполнения пролётного канала электронным потоком, и, как следствие, уровнем взаимодействия пучка с выходным резонатором и процессами токоосаждения. Поэтому в дальнейшем необходимо решить проблемы интенсивного выделения тепла в предколлекторной области и, как следствие, влияния газоотделения на стабильность эмиссии катода. Уменьшение степени заполнения пучком области выходного резонатора снижает токоосаждение и повышает стабильность работы изделия, но также приводит к снижению КПД.

В качестве направления дальнейшей модернизации предложено введение дополнительного охлаждения в предколлекторной части выходного резонатора, что позволит снизить нагрев, уменьшить газоотделение, стабилизировать ток катода и повысить эффективность прибора.

Полученные результаты подтверждают возможность создания отечественного клистрона, сопоставимого по характеристикам с зарубежными аналогами, и формируют основу для дальнейшего совершенствования конструкции.

Список литературы

1. Kant D. et al. Computer-aided design of the RF-cavity for a high-power S-band klystron // International Journal of Electronics. – 2012. – Т. 99. – №. 8. – С. 1155-1164.
2. Lee T. G. et al. The design and performance of a 150-MW klystron at S band // IEEE transactions on plasma science. – 2007. – Т. 13. – №. 6. – С. 545-552.
3. Zhang Z. et al. Development of an S-band 22-kW-average-power-klystron with 7.14% relative bandwidth // IEEE transactions on electron devices. – 2011. – Т. 58. – №. 8. – С. 2789-2795.