

УДК 621.385.624

ИМПУЛЬСНЫЙ 6 МВТ БАК МНОГОЛУЧЕВОЙ КЛИСТРОН

Р. В. Егоров¹, И. А. Гузилов², О. Ю. Масленников²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Ленинские Горы, Россия

²ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов», Москва, 117342, Введенского д.3, к.1, Россия

Статья поступила в редакцию 21 июня 2017 г.

Аннотация. БАК многолучевой клистрон S – диапазона длин волн BT258 был разработан в организации «БТВКП» с поддержкой Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН). Два образца многолучевых клистронов были изготовлены и испытаны в «БТКВП». Максимальная эффективность 64% была получена при уровне выходной мощности 6,4 МВт. Эффективность в 60% для первого БАК многолучевого клистрона была подтверждена динамическими испытаниями в ЦЕРН'е. В статье обсуждается БАК – метод группировки электронного потока и представлено сравнение выходных характеристик первого многолучевого БАК клистрона с существующими классическими клистропами.

Ключевые слова: вакуумная электроника, многолучевой клистрон, БАК – метод.

Abstract. S – band BAC multiple-beam klystron BT258 was developed at VDBT with support of CERN. Two samples of multiple-beam klystrons were fabricated and tested at VDBT. Maximum efficiency of 64% was obtained at an output level of 6,4 MW. The efficiency in the vicinity of 60% for one of multiple beam klystrons was successively confirmed in tests at CERN. BAC – method of electron grouping is discussed and comparison of output parameters of multiple-beam klystron with the existing classical klystrons is given in the article.

Key words: vacuum electronics, multiple-beam klystron, BAC method.

1. Введение

Для разрабатываемых в настоящее время перспективных сверхмощных коллайдеров, таких как Future Circular Collider (FCC) и Compact Linear Collider (CLIC), в качестве основных источников СВЧ-мощности предполагается использовать клистроны. Например, для коллайдера FCC с длиной туннеля около 100 км, проект которого должен быть готов к 2019 г., в качестве основных СВЧ-источников рассматриваются клистроны непрерывного режима с частотой 800 МГц и с выходной мощностью около 1.5 МВт. Клистроны с эффективностью выше 80% - ключевые устройства для будущего поколения крупных ускорителей. Вопрос о КПД таких клистронов является крайне важным. [1]

2. Постановка задачи

С каждым годом возрастают требования к входным и выходным характеристикам клистронов, поэтому Европейский центр ядерных исследований (CERN) стимулирует развитие клистронных технологий. Предприятию ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов» было предложено провести разработку высокоэффективного клистрона S-диапазона (2,9985 ГГц) с СВЧ - мощностью больше, чем 6 МВт. Основные требования к клистрону ВТ258 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры многолучевого клистрона.

Частота, ГГц	2,9985
Пиковая выходная мощность, МВт	>6
Средняя мощность, кВт	30
Напряжение пучка, кВ	<60
Количество пучков	40
Длина импульса, мкс	5
Эффективность, %	>60
Частота повторения импульсов, Гц	300

3. БАК – метод группировки электронного потока

Для получения высокого результата в эффективности необходимо предложить новые способы группировки электронов. Недавно был предложен новый метод группирования электронного потока (БАК – метод) для достижения значительного улучшения эффективности в клистронах [2]. Метод основан на вынужденных колебаниях ядра пучка и позволяет получить высокую эффективность (до 82-85% для нескольких колебательных движений ядра в расчётах) для клистронов на значительно малой длине пространства взаимодействия. Было решено объединить все преимущества передовых технологий (БАК – метод, многолучевой, низковольтный, периодическая магнитная фокусировка на постоянных магнитах) в одном устройстве.

Схема группирователя состоит из девяти кольцевых резонаторов. Рабочая мода симметрична по азимуту и имеет половину длины волны в продольном направлении. Электроны ядра сгустка совершают одно колебание из-за внешних сил в трех БАК – резонаторах, которые размещаются в середине анода, в то время как периферийные электроны монотонно достигают сгустка.

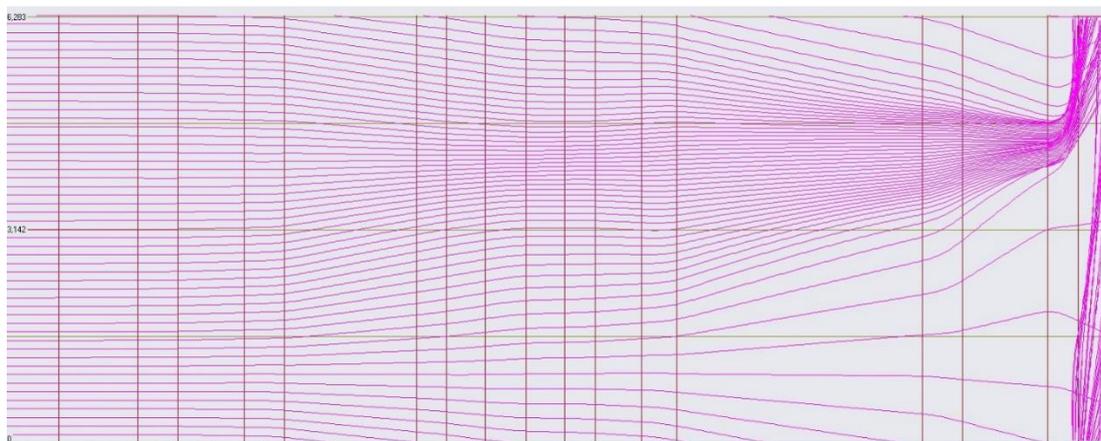


Рис. 1. Фазовые траектории ВАС – клистрона в DEV 5.1.

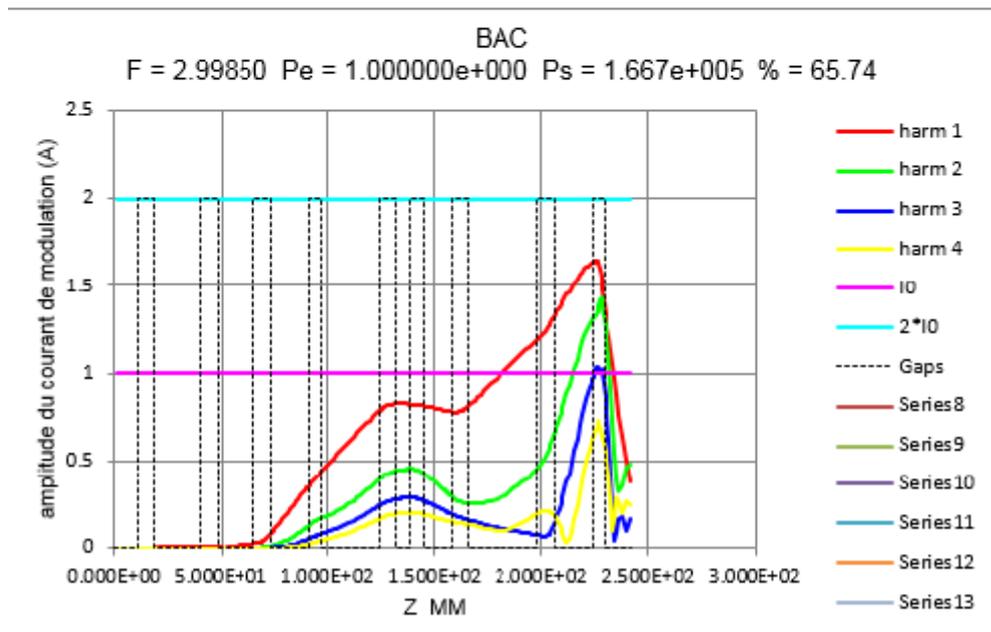
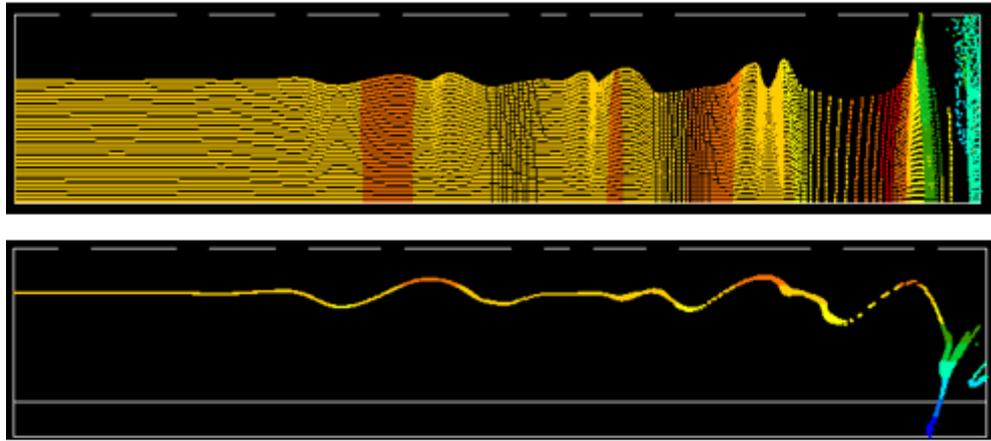


Рис. 2. Расчёт электродинамики ВАС – клистрона в Klys2D.

После оптимизации в одномерной программе DEV 5.1. (рис. 1) и сравнительным расчетам по 1D-коду KlypWin [3] и 2D-коду Klys2D (рис. 2) [4] ожидаемая эффективность находилась в диапазоне 66-77%. Несмотря на такой разброс результатов, все они хорошо предсказывают эффективность выше целевого значения в 60%. Чтобы минимизировать риски разработки и стоимость производства, было решено улучшить технические параметры существующего клистрона КИУ – 147 в части эффективности и энергопотребления. КИУ – 147 находится в производстве в России. Клистрон работает при напряжении 50 кВ, силе тока 290 А с 42% эффективностью. По сравнению с традиционным 6 МВт многолучевым клистроном S-диапазона КИУ -147 было решено уменьшить катодный ток в 1,5 раза (195 А вместо 290

А) за счёт повышения эффективности (в среднем КПД клистрона КИУ-147 составляет 42%).

4. Результаты испытаний

Было изготовлено и испытано два образца. Максимальная эффективность 64 % была достигнута во втором клистроне. Первый клистрон дополнительно испытывался в ЦЕРНе, Женева, Швейцария, и имел эффективность около 60% [5]. Схематическая установка испытаний показана на рис. 3. Рисунок 4 показывает клистрон, установленный на испытательном стенде.

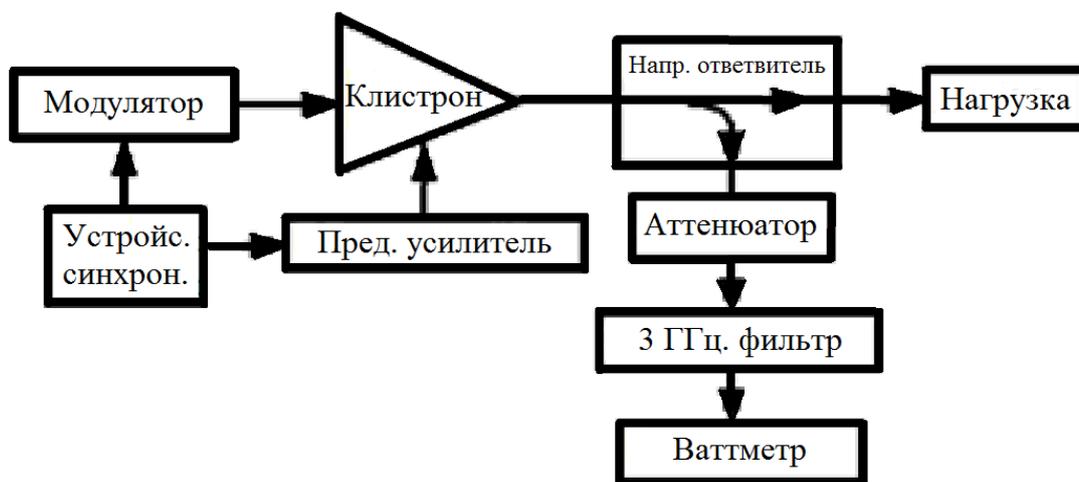


Рис. 3. Схематическая установка испытаний.

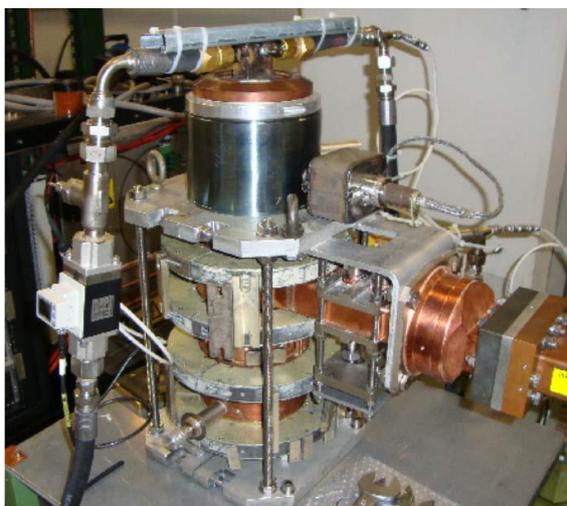


Рис. 4. БАК многолучевой клистрон, установленный на испытательном стенде.

Частотные характеристики клистронов представлены на рис. 5. Импульсная выходная мощность измерялась направленным ответвителем, который был встроен в выходной волновод. Общее измеренное ослабление составляло 80,31 дБ. Первый клистрон был испытан в ЦЕРНе с частотой повторения 110 Гц и длительностью импульса доходящей до 7,5 мкс. Второй клистрон был испытан в ОИЯИ, Россия, Дубна с частотой повторения импульсов 10 Гц и длительностью импульса 3 мкс. Используемые высоковольтные модуляторы имели ограничения на параметры импульсов. Импульсная выходная мощность 6,4 МВт наблюдалась во втором образце для частоты 2,999 ГГц, катодное напряжение при этом составляло 51,7 кВ. Коэффициент усиления изменялся в диапазоне от 45 дБ (для левой стороны полосы частот) до 53 дБ (для правой стороны).

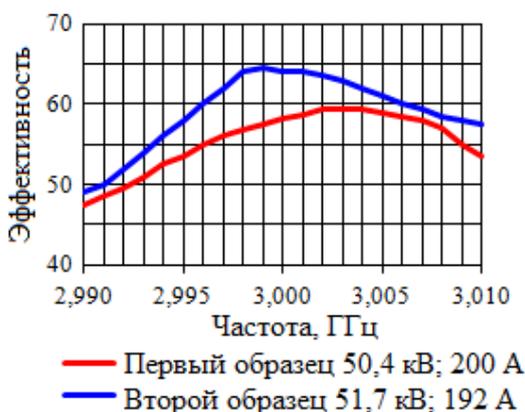
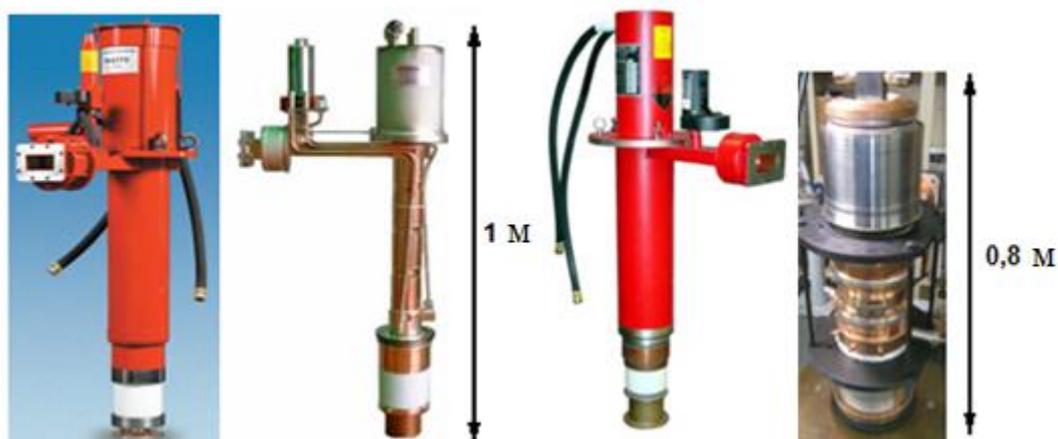


Рис. 5. Частотная характеристика первого и второго клистронов.

5. Сравнение с существующими однолучевыми аналогами

В настоящее время три производителя поставляют 6 МВт однолучевые клистроны, работающие на частоте 2.9985 ГГц [6]. Все клистроны оснащены проводящими фокусирующими соленоидами и разработаны специально для промышленных ускорителей заряженных частиц. Клистроны показаны на рисунке 6. Сравнение характеристик однолучевых клистронов этих поставщиков и разработанного многолучевого клистрона ВТ258 приведено в таблице 2.



TH2173K

E3779

VKS8262

BT258

Рис. 6. Прототипы клистронов CPI, Thales, Toshiba, БТКВП.

Таблица 2. Параметры клистронов.

Клистрон	VKS – 8262	TH 2173K	E3779	«BT258»
Производитель	CPI	Thales	Toshiba	БТКВП
Страна	США	Франция	Япония	Россия
Частота, ГГц	2,9985	2,9985	2,998	2,999
Пиковая выходная мощность, МВт	6	5	6	7
КПД, %	45	50	42	64
Средняя выходная мощность, кВт	36	36	6	30
Пиковая входная мощность, Вт	200	40	75	125
Усиление, дБ	45	51	49	46,7
Пиковое напряжение, кВ	135	130	145	<52
Пиковый ток, А	109	90	105	190
Количество пучков	1	1	1	40
Длина импульса, мксек	17	17	2,5	17
Масса, кг	200	160	240	95
Длина, мм	1000	975	1000	800

При этом следует подчеркнуть преимущества разработанного многолучевого клистрона «BT258»:

- эффективность клистрона существенно выше эффективности аналогов;
- низкое рабочее напряжение, ниже 60 кВ (без масляного бака для высоковольтных компонентов);
- микроперванс на луч составляет 0,4;
- применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющие фокусирующий соленоид, что позволяет уменьшить массу всей системы, а также избежать энергопотребления магнитной системой;
- самая маленькая длина из представленных клистронов;
- низкий уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора;
- возможно применение клистрона в мобильных установках, так как он может работать на воздухе без применения масляной изоляции в источнике питания.

6. Заключение

Впервые в мире экспериментально показано, что новая технология группировки (БАК – метод) может значительно повысить эффективность клистронных усилителей. В ОИЯИ и ЦЕРН были проведены динамические испытания высокоэффективных БАК многолучевых клистронов, которые показали усиление СВЧ с выходной мощностью 7 МВт и эффективностью более 60%. Новый клистрон BT258 сочетает в себе такие функции, как низкое напряжение, малую массу, низкое энергопотребление, низкий уровень рентгеновского излучения. Внедрение результатов позволит создать новое поколение клистронов, превосходящих мировые аналоги.

Литература

1. Baikov, A. Yu., Marrelli, C., and Syrathev, I., "Toward high-power klystrons with RF power conversion efficiencies on the order of 90%", IEEE. Trans. Elec. Dev., 62(10), pp. 3406-3412, 2015.
2. I. Guzilov, "BAC Method of Increasing the Efficiency in Klystrons," IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC2014), Russia, Saint Petersburg, June 29-July 4, 2014.
3. Baikov, A. Yu., Grushina, O. A., and Strikhanov, M. N., "Simulations of conditions for the maximal efficiency of decimeter-wave klystrons", Technical Physics, 59(3), pp. 421-427, 2014.
4. R. Marchesin, Q. Vuillemin, Thales Electron Devices, private communication, 2016.
5. I. Guzilov, R. Egorov, O. Maslennikov, G. Mcmonagle, I. Syrathev, B. Woolley "Commercial Prototype of High Efficiency S-band Pulsed BAC MBK" IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC2016), Korea, Seoul, October 18-20, 2016.
6. I. Guzilov, O. Maslennikov, R. Egorov, I. Syrathev, V. Kobets, A. Sumbaev. Comparison of 6 MW S-band Pulsed BAC MBK with the Existing SBKs. 18th International Vacuum Electronics Conference, p. 68, London, April 24-26, 2017.

Ссылка на статью:

Р.В.Егоров, И.А.Гузилов, О.Ю.Масленников. Импульсный 6 МВт БАК многолучевой клистрон. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/3/text.pdf>