

УДК 621.385.624

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ БАК – КЛИСТРОНОВ

Р. В. Егоров¹, И. А. Гузилов², О. Ю. Масленников², В. Л. Саввин¹

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

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

Статья поступила в редакцию 18 октября 2017 г.

Аннотация. Обсуждается возможность повышения выходной мощности многолучевых клистронов с БАК – методом группировки электронного потока до уровня 10 и 20 МВт. Два образца многолучевых БАК-клистронов S – диапазона длин были изготовлены и испытаны. Максимальная эффективность 64% была получена при уровне выходной мощности 6,4 МВт.

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

Abstract. Possibility of increasing output power by ВАС – method of electron grouping of S – band multiple-beam klystron at output power level of 10, 20 MW is discussed. Two samples of multiple-beam S – band klystrons «BT258» were fabricated and tested. Maximum efficiency of 64% at an output level of 6,4 MW was obtained.

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

1. Введение

С каждым годом возрастают требования к входным и выходным характеристикам клистронов. Клистроны с эффективностью выше 80% - ключевые устройства для будущего поколения крупных ускорителей. Последние разработки направлены в сторону повышения уровня выходной мощности, а также в сторону уменьшения действующего напряжения, чтобы избежать масляных баков для высоковольтных компонентов. Для получения требуемой выходной мощности при низком катодном напряжении необходимо увеличивать силу тока. Одним из возможных решений является применение многолучевой технологии.

2. БАК – метод группировки электронного потока

Для получения высокого результата в эффективности необходимо использовать новые способы группировки электронов. Недавно был предложен новый метод группирования электронного потока - БАК – метод («bunching, alignment, collecting»), для достижения значительного улучшения эффективности в клистронах [1]. Суть метода состоит в том, что плотность конечного сгустка увеличивается с помощью его разгруппировок и сбора периферийных (крайних) электронов электрическими полями дополнительных резонаторов как первой, так и второй гармоники. Во время разгруппировки сгустка замедленные электроны попадают в ускоряющую фазу высокочастотного поля резонатора, а ускоренные электроны сгустка встречают замедляющую фазу высокочастотного поля. При этом принудительно уменьшается амплитуда конвекционного тока разгруппирующими резонаторами. Метод основан на вынужденных колебаниях ядра пучка, то есть электроны ядра сгустка совершают колебательные движения, приближаясь к центру сгустка и удаляясь от него. Это необходимо, чтобы ядро сгустка не было разрушено во время сбора периферийных электронов. В одном таком колебательном движении принимают участие три резонатора. БАК – метод позволяет получить высокую эффективность (до 82-85% в расчётах для

нескольких колебательных движений ядра) для клистронов на значительно малой длине пространства взаимодействия.

В данной работе рассмотрены схемы группирования в БАК – клистронах с одним колебательным движением, которое происходит в трёх резонаторах середины анодного блока. Схема группирователя состоит из девяти кольцевых резонаторов. Рабочая мода симметрична по азимуту и имеет половину длины волны в продольном направлении.

На рисунках 1 и 2 представлены фазовые траектории группировки электронного потока в многолучевых клистронах, работающих на частоте 3 ГГц (S – диапазон) с выходной мощностью 4 МВт и 6 МВт соответственно. Фазовые траектории рассчитывались в одномерном программном комплексе DEV 5.1 [2].

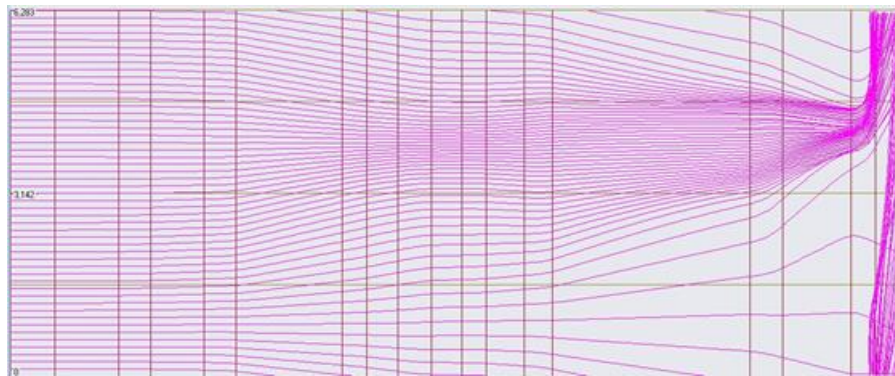


Рис. 1. Фазовые траектории БАК – клистрона с выходной мощностью 4 МВт (расчётный КПД - 73,3%, ток пучка - 150 А, напряжение – 45 кВ).

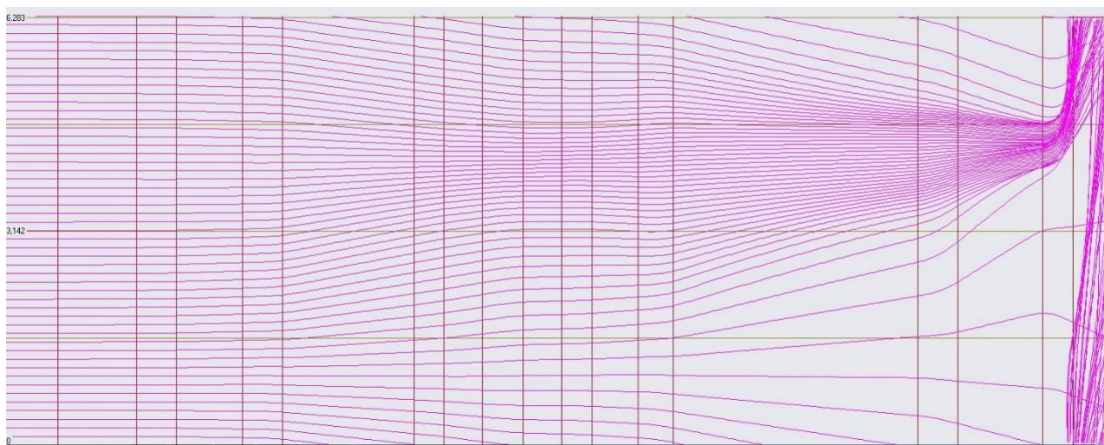


Рис. 2. Фазовые траектории БАК – клистрона с выходной мощностью 6 МВт (расчётный КПД - 72,3%, ток пучка - 195 А, напряжение – 52 кВ).

Проведенные расчеты с использованием одномерной программы DEV 5.1 показали, что после оптимизации процесса группировки по БАК методу с одним колебанием ядра сгустка ожидаемая эффективность клистрона находится на уровне 72%. Следует отметить, что в процессе оптимизации необходимо контролировать поперечный размер электронного пучка, его пульсации и токооседание по результатам дополнительных расчетов в трехмерных программах электронной оптики.

Результаты испытаний

С целью экспериментальной проверки метода БАК-группировки на предприятии ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов» были изготовлены и испытаны два образца клистрона с уровнем выходной мощности 6 МВт. 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. С этой целью схема группирователя прототипа была модифицирована и в нее были добавлены дополнительные резонаторы для реализации процесса БАК-группировки.

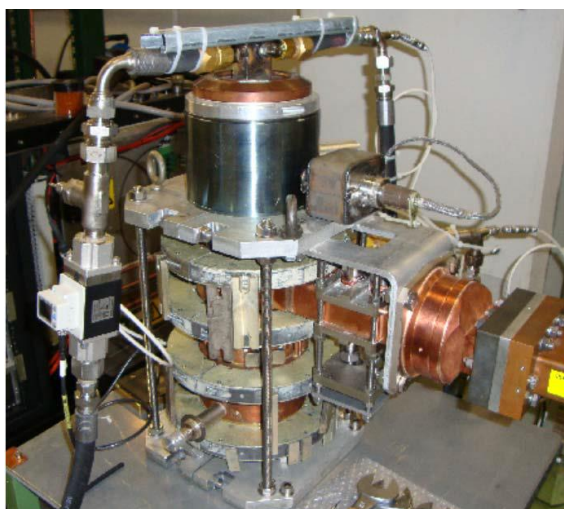


Рис. 3. Первый образец многолучевого БАК-клистрона, установленный на испытательном стенде ОИЯИ, Дубна.

Максимальное экспериментально полученное значение КПД - 64% было достигнуто на втором образце клистрона и в полтора раза превысило КПД прототипа. Первый образец клистрона показал несколько меньшую эффективность (около 60%), что было вызвано рядом технологических трудностей, возникших в процессе сборки образца. Рисунок 3 показывает клистрон, установленный на испытательном стенде.

Зависимость эффективности от частоты первого и второго клистронов представлена на рис. 4. Первый клистрон был испытан в ЦЕРН'е с частотой повторения 110 Гц и длительностью импульса, достигающей до 7,5 мкс [3]. Второй клистрон был испытан в ОИЯИ, Дубна с частотой повторения импульсов 10 Гц и длительностью импульса 3 мкс. 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).

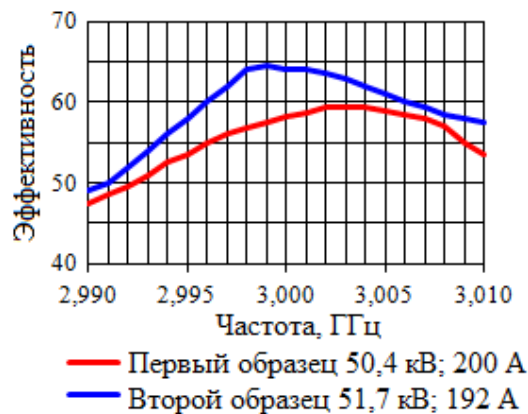


Рис. 4. График зависимости КПД первого и второго клистронов от частоты.

В результате проведенных испытаний экспериментально доказана возможность значительного повышения КПД при одновременном уменьшении габаритов клистрона благодаря применению нового метода группирования — БАК-метода.

При этом следует подчеркнуть преимущества разработанного многолучевого клистрона «ВТ258»:

- эффективность клистрона существенно выше эффективности аналогов;
- низкое рабочее напряжение, ниже 60 кВ;
- применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющие фокусирующий соленоид, что позволяет уменьшить массу всей системы, а также избежать энергопотребления магнитной системой;
- низкий уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора;
- возможность применения клистрона в мобильных установках, так как он может работать на воздухе без применения масляной изоляции в источнике питания [4,5].

Результаты эксперимента подтверждают результаты оптимизации. Таким образом, практически показана осуществимость идеи БАК – метода, позволяющего создавать мощные клистроны с высоким КПД.

3. Увеличение выходной мощности БАК-клистронов

Увеличение выходной мощности клистронов всегда являлось актуальной задачей современной СВЧ электроники. С этой целью были изучены возможности реализации разработанной конструкции БАК-клистрона для повышения выходной мощности до уровня 10 МВт и более.

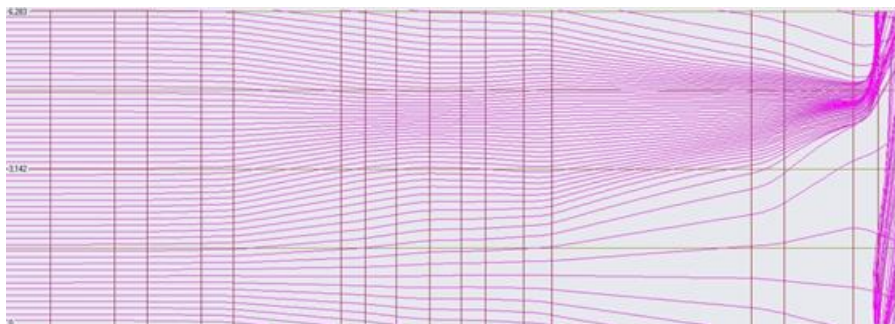


Рис. 5. Фазовые траектории БАК – клистрона с выходной мощностью 10 МВт (расчётный КПД 73,68%, сила тока – 300 А, напряжение пучка 58 кВ).

На рисунке 5 изображены фазовые траектории электронного пучка в БАК-клистроне с выходной мощностью 10 МВт. Напряжение пучка сохраняется на уровне 60 кВ. Мощность клистрона возрастает за счёт увеличения тока пучка. Клистрон с выходной мощностью 10 МВт рассчитан на силу тока 300 А и напряжение 58 кВ. Для этого клистрона сохраняется прежняя

электронно-оптическая система, он может быть сделан без существенного изменения конструкции. Оптимизированная расчётная эффективность для 10 МВт-ного БАК-клистрона может достигать 73,68%.

Клистрону с уровнем выходной мощности 20 МВт потребуется напряжение 60 кВ и сила тока 550 А. Для сохранения физически реализуемого значения плотности тока электронов, эмитированных с поверхности катода, необходимо увеличивать количество пучков и внести изменения как в конструкцию электронной пушки, так и в конструкцию всего устройства. По нашим оценкам клистрон с выходной мощностью 20 МВт должен иметь 54 пучка. Сила тока парциального пучка в каждом канале такого клистрона будет немного превышать 10 А. Оптимизированная расчётная эффективность для 20 МВт-ного БАК-клистрона может достигать – 71,35%, при этом коэффициент усиления будет составлять 55 дБ. Фазовые траектории для БАК-клистрона с выходной мощностью 20 МВт показаны на рисунке 6.

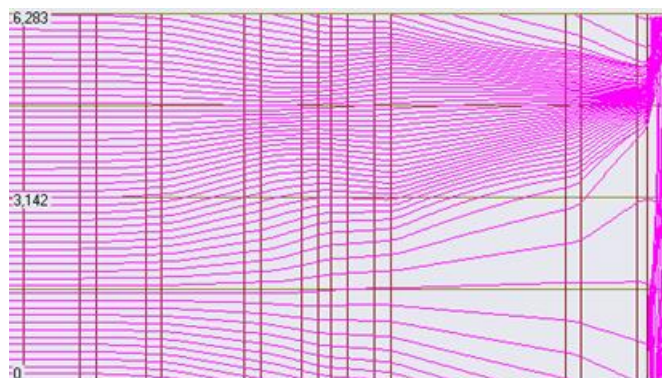


Рис. 6. Фазовые траектории БАК- клистрона с мощностью 20 МВт (расчётный КПД - 71,35%, ток – 550 А, напряжение 60 кВ, число парциальных пучков - 54).

Таким образом, токопрохождение является сдерживающим фактором на пути получения мощности 25 ÷ 30 МВт в клистронах S – диапазона с катодным напряжением до 60 кВ. Тем не менее, расчётная эффективность клистронов с такой выходной мощностью может составить 60%. Разработанные и протестированные БАК-клистроны с уровнем выходной мощности 6 МВт подтверждают корректность новой идеи группировки.

4. Заключение

Впервые в мире разработаны и протестированы БАК – клистроны с уровнем выходной мощности 6,4 МВт и максимальной эффективностью 64%. Результаты испытаний подтверждают корректность новой идеи группировки. Клистрон с уровнем выходной мощности 10 МВт может быть спроектирован без изменения конструкции. Выходная мощность 20 МВт вполне достижима. Расчётная эффективность модифицированных БАК – клистронов с выходной мощностью 10 - 20 МВт составляет 72%. Обоснованность расчётов подтверждена результатами испытаний клистронов. Их внедрение позволит создать новое поколение мощных многолучевых клистронов, превосходящих мировые аналоги.

Литература

1. I. Guzilov, “BAC Method of Increasing the Efficiency in Klystrons,” IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC2014), Russia, Saint Petersburg, June 29-July 4, 2014. (<http://ieeexplore.ieee.org/document/6891996/>)
2. Konnov A.V. and Malykhin A.V. Frequency-domain code Dev. 5.1 for analysis of coupled cavity traveling wave tubes, klystrons and their hybrids, IVEC 2005, Noordwijk, Netherlands, pp. 195-198.
3. I. Guzilov, R. Egorov, O. Maslennikov, G. Mcmonagle, I.Syratchev, B. Woolley “Commercial Prototype of High Efficiency S-band Pulsed BAC MBK” IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC2016), Korea, Seoul, October 18-20, 2016.
4. I.Guzilov, O.Maslennikov, R.Egorov, I.Syratchev, 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.
5. 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>

Ссылка на статью:

Р. В. Егоров, И. А. Гузилов, О. Ю. Масленников, В. Л. Саввин. О возможности повышения выходной мощности БАК – клистронов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/12/text.pdf>