

УДК 621.385.624

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХ БАК – КОЛЕБАНИЙ В КЛИСТРОНЕ С ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

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

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, 119991, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет

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

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2018 г.

Аннотация. Обсуждается возможность создания клистрона для ускорителя с эффективностью выше 80% с помощью двух колебаний ядра БАК – метода группировки электронного потока. Корректность идеи группировки подтверждена успешными испытаниями первых экспериментальных образцов многолучевых БАК – клистронов S – диапазона длин волн.

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

Abstract. The possibility of L – band klystron’s creation for accelerator with efficiency higher than 80% by means of two core oscillations of BAC – method of electron grouping is discussed. The conditions for the formation of a convergent bunch in the BAC – klystron are also discussed in this paper. Correctness of grouping idea was confirmed by successful tests of first experimental samples of multiple-beam klystrons. The experimental S – band BAC - klystrons with an output power level of 6 ÷ 7 MW have a maximum efficiency of 66%, which allows to use the proposed BAC – method for creating powerful klystrons with high efficiency. The proposed new method of the electron beam grouping is also employed for single-beam klystron designs. Using a system with two BAC – oscillations in the electrodynamic system makes it possible to significantly increase the resultant efficiency of the klystron. This is confirmed by the results of the electrodynamic system optimization of a 13 – cavities (including 2 group of 3 BAC – cavities) single – beam klystron with two BAC – oscillations, which can be used in accelerator technology. The efficiency of such a klystron can reach 82% at a reasonable length of the anode.

Key words: vacuum electronics, klystron, BAC method.

1. Введение

С каждым годом возрастают требования к входным и выходным характеристикам клистронов. Последние разработки направлены в сторону повышения уровня выходной мощности и эффективности. Клистроны с эффективностью выше 80% - ключевые устройства для будущего поколения крупных ускорителей.

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 разгруппировки 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.

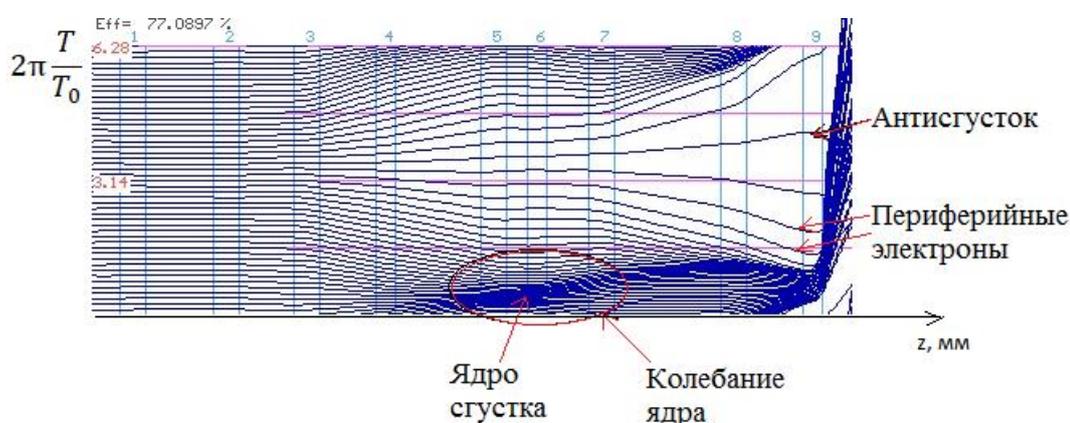


Рис. 1. Фазовые траектории электронов при группировке БАК – методом.

Метод основан на вынужденных колебаниях ядра пучка, то есть электроны ядра сгустка совершают колебательные движения, приближаясь к центру сгустка и удаляясь от него (рис. 1). Это необходимо, чтобы ядро сгустка не было разрушено во время сбора периферийных электронов. В одном таком колебательном движении принимают участие три резонатора.

3. Результаты испытаний первых БАК - клистронов

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 $6 \div 7$ МВт.

Максимальное экспериментально полученное значение КПД – 66 % 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 2 показывает клистрон, установленный на испытательном стенде.



Рис. 2. Первый образец многолучевого БАК-клистрона.

Первый клистрон был испытан в ЦЕРН'е с частотой повторения 110 Гц и длительностью импульса, достигающей до 7,5 мкс [2]. 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).

В результате проведенных испытаний экспериментально доказана возможность значительного повышения КПД при одновременном уменьшении габаритов клистрона благодаря применению нового метода группирования – БАК-метода [3-5].

4. Два БАК – колебания ядра для клистрона с высокой эффективностью

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

По результатам успешных испытаний первых БАК – клистронов было предложено применить БАК – метод к существующему однолучевому клистрону, который используется в ускорителях частиц. Однолучевой клистрон работает на частоте 800 МГц (L – band) при силе тока 12,6 А и напряжении пучка 133,55 кВ (микроперванс пучка составляет 0,26 мкА/В^{3/2}). Оптимизация проводилась в одномерном программном комплексе DEV 5.1 [6].

Было предложено использовать два БАК – колебания для получения максимальной эффективности при разумных габаритах анодного блока. Основной задачей первого БАК – колебания является частичное формирование сгуска с целью дальнейшей разгруппировки во второй секции БАК – резонаторов.

Оптимизированный клистрон состоит из 13 однозачорных резонаторов, включая две группы БАК – резонаторов по 3 штуки в каждой. Фазовые траектории электронов этого клистронного усилителя представлены на рисунке 3. Зазоры резонаторов (сетки) на рисунке фазовых траекторий обозначены парными линиями.

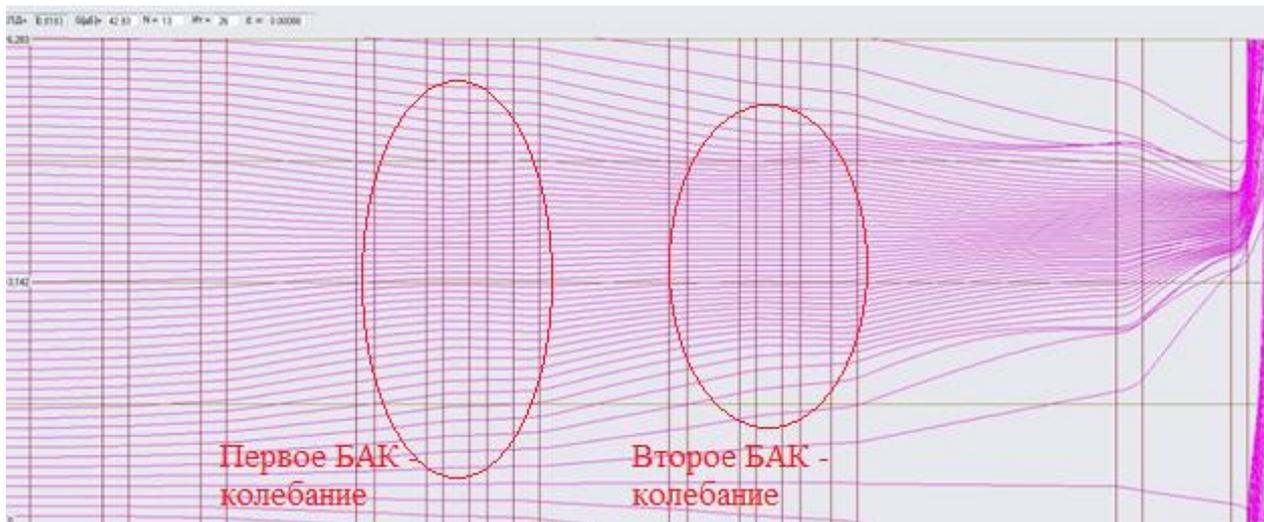


Рис. 3. Фазовые траектории электронов в оптимизированном клистроне с двумя БАК – колебаниями.

Первая группа БАК – резонаторов – это резонаторы под номерами 4, 5, 6, 4 и 6 резонаторы настроены на вторую гармонику основного сигнала. Вторая группа БАК – резонаторов – это резонаторы с порядковыми номерами 8, 9, 10 (8 и 10 резонаторы – резонаторы второй гармоники). Разгруппирующими резонаторами являются 5 и 9. Настроены эти резонаторы на частоту существенно более низкую, чем частота входного сигнала. Расстояние между 11 и 12 резонаторами выбирается значительно большим, чем длины труб дрейфа между другими резонаторами для того, что позволить всем электронам собраться в основной сгусток.

По результатам оптимизации получена эффективность 82%. Изменяемыми параметрами были длины труб дрейфа, частоты всех резонаторов, уровень входного сигнала, характеристическое сопротивление и нагруженная добротность выходного резонатора. Показано, что в конечном «антисгустке» находятся частицы в фазах 0,5, 2, 4,6. График зависимости скоростей электронов в единицах v_{z0} от фазы влёта в выходной резонатор представлен на рисунке 4. Периферийные электроны имеют скорости $0,9 v_{z0}$ и $1,05 v_{z0}$. Скорости основного сгустка сосредоточены в диапазоне $0,93 v_{z0} \div 1,03 v_{z0}$, где v_{z0} – скорость, полученная ускоряющим напряжением.



Рис. 4. Зависимость скоростей электронов от фазы при влёте в выходной резонатор.

Заметим, что после прохождения разгруппирующих резонаторов, в этом расчёте 5 и 9 резонаторы (пара сеток резонатора показана на рисунке одной линией – центром зазора резонатора), амплитуда конвекционного тока первой гармоники перестаёт расти, выходит в насыщение (рис. 5). Электроны частично сгруппировались, а после этого встретились с противоположной фазой высокочастотного поля разгруппирующего резонатора, при этом произошло выравнивание скоростей. Максимальное значение амплитуды конвекционного тока первой гармоники в выходном резонаторе достигает значения $1,8 \div 1,82 I_0$.

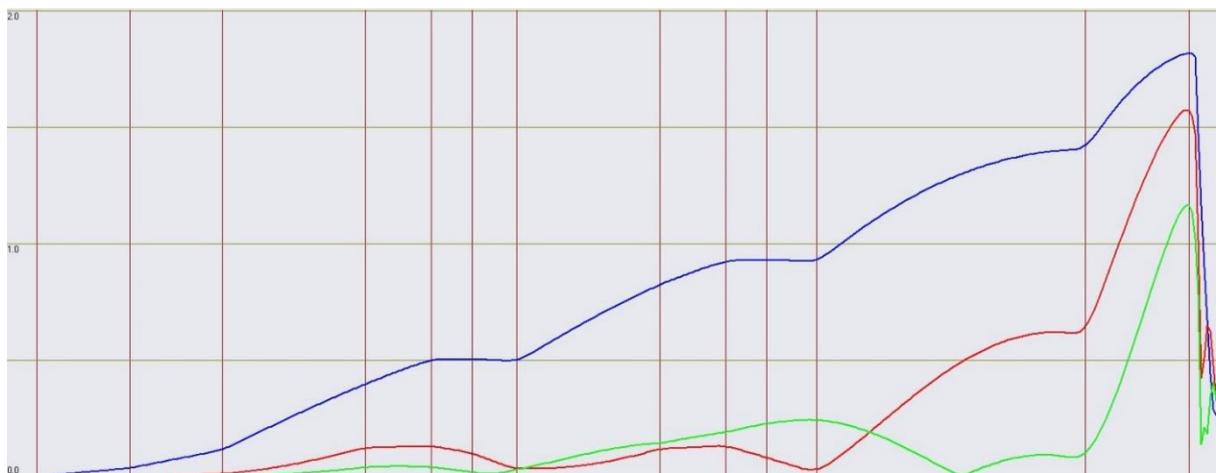


Рис. 5. Распределение конвекционного тока в оптимизированном клистроне с двумя БАК – колебаниями).

Распределение высокочастотного напряжения в зазорах резонаторов вдоль оси прибора при использовании группировки с двумя БАК – колебаниями показано на рисунке 6. Амплитуды первой гармоники наведенного высокочастотного напряжения в 4, 6, 8, 10 резонаторах отсутствуют (точками обозначены номера резонаторов), поскольку эти резонаторы – резонаторы, настроенные на вторую гармонику основного сигнала. Наведенное напряжение в выходном резонаторе находится на уровне $1,18 U_0$, где U_0 – ускоряющее напряжение.

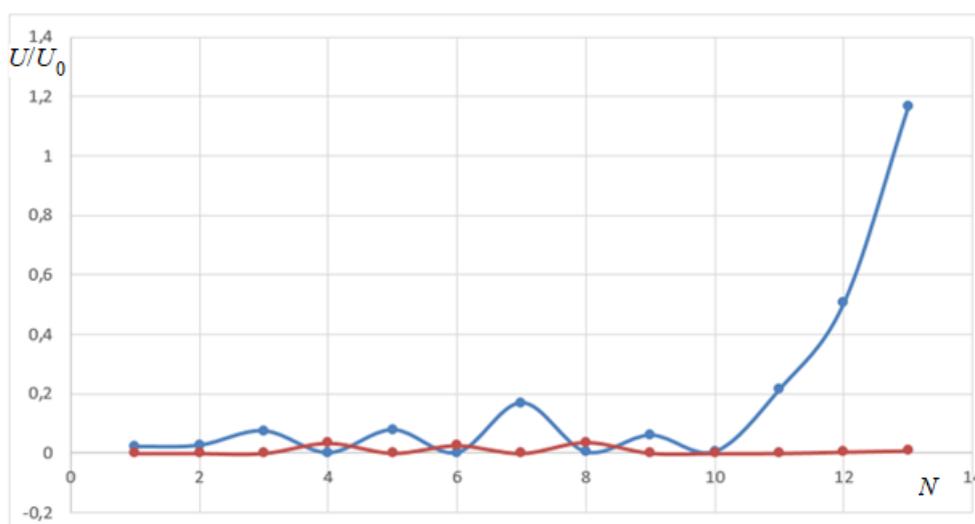


Рис. 6. График зависимости наведенных напряжений от номера резонатора (синяя линия – первая гармоника, красная линия – вторая гармоника наведенного напряжения).

Проведём оценку КПД клистрона в первом приближении выражением:

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} = \frac{U_1^2}{2\rho Q_H I_0 U_0}$$

, где P_0 – мощность пучка, U_1 – амплитуда первой гармоники наведенного напряжения в выходном резонаторе, ρ – характеристическое или волновое сопротивление выходного резонатора, которое берется на расстояние кулоновского взаимодействия от оси канала, Q_H – нагруженная добротность выходного резонатора. Значения последних величин берутся из трёхмерного

программного комплекса HFSS Ansys [7] при моделировании геометрии выходного резонатора с выходным волноводным трактом.

$$\eta = \frac{U_1^2}{2\rho Q_n I_0 U_0} = \frac{1,18 \cdot 1,18 \cdot U_0}{2 \cdot 140 \cdot 63 \cdot I_0} = 0,84$$

Оценка показывает эффективность 84%. Отметим, что режим, близкий к максимально возможной оптимизированной эффективности, является неустойчивым, так как при небольшом изменении каких-либо параметров (расстройки частот резонаторов, длины труб дрейфа, зазоры и т.д.) или режима питания клистрона (входная мощность, рабочее напряжение, сила тока) электроны, имеющие очень малые скорости, могут быть заторможены СВЧ – полем резонатора, и начнут двигаться в противоположном направлении с ускорением, отбирая энергию высокочастотного поля резонатора. При проведении расчётов необходимо избегать отражений этих электронов, поскольку они начинают вносить отрицательный вклад в общую эффективность.

5. Заключение

Результаты испытаний первых БАК – клистронов подтверждают корректность новой идеи группировки. Экспериментальные БАК – клистроны S – диапазона длин волн с уровнем выходной мощности 6 ÷ 7 МВт имеют максимальную эффективность на уровне 66%, что позволяет использовать предложенный БАК – метод для создания мощных клистронов с высоким КПД.

Предложенный новый метод группировки электронного потока применяется и для однолучевых конструкций клистронов. Использование системы с двумя БАК – колебаниями в группирователе даёт возможность заметно повысить результирующую эффективность клистрона. Это подтверждается результатами оптимизации электродинамической системы однолучевого клистрона L – диапазона длин волн с двумя БАК – колебаниями, который может быть использован в ускорительной технике. КПД такого клистрона может достигать 82%.

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. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6891996/>
2. 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.
3. 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.
4. Р. В. Егоров, И. А. Гузилов, О. Ю. Масленников. Импульсный 6 МВт БАК многолучевой клистрон. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал), 2017, № 7, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/3/text.pdf>
5. 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, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/12/text.pdf>
6. 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.
7. ANSYS HFSS (High Frequency Structure Simulator). 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless Design [электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>

Для цитирования:

Р. В. Егоров, И. А. Гузилов, О. Ю. Масленников, В. Л. Саввин. О возможности применения двух БАК – колебаний в клистроне с высокой эффективностью. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/15/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.15