

БАК-клистроны — новое поколение клистронов в вакуумной электронике

Р. В. Егоров,^{1,а} И. А. Гузилов,² О. Ю. Масленников,² В. Л. Саввин¹

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

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

Поступила в редакцию 15.06.2018, после доработки 05.07.2018, принята к публикации 12.07.2018.

Два образца БАК многолучевых клистронов БТ258 S-диапазона длин волн были разработаны, изготовлены и испытаны в организации «БТВКП» при поддержке Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН). Максимальная эффективность 66% была получена при уровне выходной мощности 6.6 МВт. Эффективность в 60% для первого БАК многолучевого клистроны была подтверждена динамическими испытаниями в ЦЕРН. В статье обсуждается БАК — метод группировки электронного потока, представлено сравнение выходных характеристик первого многолучевого БАК-клистроны с существующими зарубежными однолучевыми аналогами. Обсуждается возможность повышения выходной мощности многолучевых клистронов с БАК-методом группировки электронного потока до уровня 10 и 20 МВт.

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

УДК: 537.8. PACS: 84.40.Fe.

ВВЕДЕНИЕ

Мощные высокоэффективные клистроны в настоящее время находят широкое применение в самых различных областях научных исследований и техники [1, 2]. Одно из самых востребованных приложений клистронов в качестве источников СВЧ-мощности для будущего поколения крупных ускорительных комплексов [3] требует существенного увеличения эффективности клистронов до 80%.

С каждым годом возрастают требования к входным и выходным характеристикам клистронов [4, 5]. Для повышения эффективности клистронов и их эксплуатационных качеств в последних разработках применяют целый спектр различных инновационных решений, среди которых применение магнитных систем с периодической фокусировкой на постоянных магнитах (PPM-фокусировка), заменяющих фокусирующий соленоид, и использование отдельных катодных узлов для многолучевой технологии построения электронно-оптической системы клистроны [6].

Наряду с повышением эффективности и выходной мощности важное значение для новых разработок имеет уровень высокого напряжения, подаваемого на катод клистроны [7]. Снижение катодного напряжения уменьшает размеры изоляторов и вес клистронов, устраняет необходимость использования объемных масляных баков для погружения импульсных трансформаторов, питаемых модуляторами. Для получения требуемой выходной мощности при низком катодном напряжении необходимо увеличивать силу тока в многолучевой конструкции. Такой выбор позволяет уменьшить потребление энергии, габариты, вес и стоимость клистроны.

1. БАК-МЕТОД ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Для получения высокого результата в эффективности необходимо использовать новые способы группировки электронов [8, 9]. Недавно был предложен новый метод группирования электронного потока — БАК-метод (*bunching, alignment, collecting*, ВАС) для достижения значительного улучшения эффективности в клистроны [10]. Суть метода состоит в том, что плотность

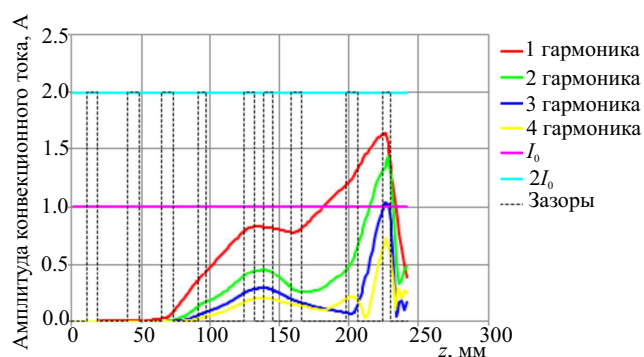


Рис. 1. Распределение амплитуды конвекционного тока вдоль электродинамической системы БАК-клистроны

конечного сгустка увеличивается с помощью его разгруппировки и сбора периферийных (крайних) электронов электрическими полями дополнительных резонаторов как первой, так и второй гармоник. 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).

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

Схема группирователя состоит из девяти кольцевых резонаторов. Рабочая мода резонаторов 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.

^а E-mail: mystUni@mail.ru

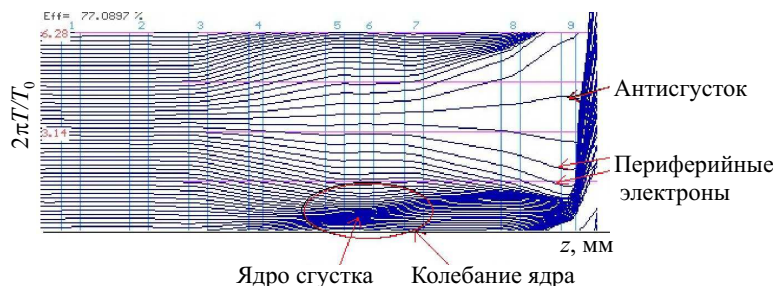


Рис. 2. Фазовые траектории ВАС-клистрона DEV 5.1

На рис. 2 представлены фазовые траектории группировки электронного потока в многолучевом клистроне, работающем на частоте 3 ГГц (S-диапазон) с выходной мощностью 6 МВт. Фазовые траектории рассчитывались в одномерном программном комплексе DEV 5.1 [11, 12].

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.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПЕРВЫХ БАК-КЛИСТРОНОВ

При разработке нового клистрона с условным названием БТ258 использованы указанные выше инновационные решения и в первую очередь БАК-метод группировки пучка электронов [13].

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%-й эффективностью. С этой целью схема группирователя прототипа была модифицирована и в нее были добавлены дополнительные резонаторы для реализации процесса БАК-группировки [14].

Максимальная эффективность — 66% — была достигнута во втором клистроне. Первый клистрон дополнительно испытывался в ЦЕРН (Женева, Швейцария) и имел эффективность около 60% [15, 16].

Импульсная выходная мощность измерялась направленным ответвителем, который был встроен в выходной волновод. Общее измеренное ослабление составляло 80.31 дБ. Первый клистрон был испытан в ЦЕРН 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. Использованные высоковольтные модуляторы имели

ограничения на параметры импульсов. Импульсная выходная мощность 6.6 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 частотной характеристики) до 53 дБ (для правой стороны частотной характеристики).

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.

Разработанные и протестированные БАК-клистроны с уровнем выходной мощности 6 МВт подтверждают корректность новой идеи группировки. В результате проведенных испытаний экспериментально доказана возможность значительного повышения КПД при одновременном уменьшении габаритов клистрона благодаря применению нового метода группирования — БАК-метода.

3. СРАВНЕНИЕ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ОДНОЛУЧЕВЫМИ АНАЛОГАМИ

В настоящее время три производителя (CPI (США), Thales (Франция), Toshiba (Япония)) поставляют 6 МВт однолучевые клистроны, работающие на частоте 2.9985 ГГц [16]. Все клистроны оснащены проводящими фокусирующими соленоидами и разработаны специально для промышленных ускорителей заряженных частиц. Клистроны показаны на рис. 3. Сравнение характеристик однолучевых клистронов этих поставщиков и разработанного многолучевого клистрона БТ258 приведено в таблице.

При этом следует подчеркнуть преимущества разработанного многолучевого клистрона «БТ258»:

— эффективность клистрона существенно выше эффективности аналогов;



Рис. 3. Прототипы клистронов CPI, Thales, Toshiba, БТКВП

Таблица. 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	66
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, мкс	17	17	2.5	17
Масса, кг	200	160	240	95
Длина, мм	1000	975	1000	800

- низкое рабочее напряжение, ниже 60 кВ (без масляного бака для высоковольтных компонентов);
- микроперванс на луч составляет 0.4;
- применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющих фокусирующий соленоид, что позволяет уменьшить массу всей системы, а также избежать энергопотребления магнитной системой;
- низкий уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора;
- возможность применения клистронов в мобильных установках, так как он может работать на воздухе без применения масляной изоляции в источнике питания.

4. УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ БАК-КЛИСТРОНОВ

Увеличение выходной мощности клистронов всегда было актуальной задачей современной СВЧ-электроники. С этой целью были изучены возможности реализации разработанной конструкции БАК-клистронов для повышения выходной мощности до уровня 10 МВт и более [17].

При расчете фазовых траекторий электронного пучка в БАК-клистроне с выходной мощностью 10 МВт напряжение пучка сохраняется на уровне 60 кВ. Мощность клистронов возрастает за счет увеличения тока пучка. Клистрон с выходной мощностью 10 МВт рассчитан на силу тока 300 А и напряжение 58 кВ. Для этого клистронов сохраняется прежняя электронно-оптическая система, он может быть сделан без существенного изменения конструкции. Оптимизированная расчетная эффективность для десятигигаваттного БАК-клистронов может достигать 73.68%, что несколько превышает уровень расчетной эффективности для разработанного клистронов с выходной мощностью 7 МВт.

Клистронов 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 электронно-оптической 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 клистронов будет немного превышать 10 А. Оптимизированная расчетная эффективность для двадцатигигаваттного БАК-клистронов может достигать 71.35%, при этом коэффициент усиления будет составлять 55 дБ. Таким образом, токопрохождение является сдерживающим фактором на пути получения мощности 25–30 МВт в клистронов S-диапазона с катодным напряжением до 60 кВ. Тем не менее экспериментальная эффективность клистронов с такой выходной мощностью может составить 60%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в мире разработаны в БТКВП и протестированы в ОИЯИ и ЦЕРН БАК-клистронов с уровнем выходной мощности 7 МВт и максимальной эффективностью 66%. Результаты экспериментальных испытаний подтверждают корректность новой идеи группировки, позволяющей значительно повысить эффективность существующих клистронов. Новый клистрон BT258 сочетает в себе такие параметры, как низкое напряжение, малую массу, низкое энергопотребление, низкий уровень рентгеновского излучения.

Проведенные исследования показали, что уровень выходной мощности разработанного БАК-клистронов может быть повышен до 10 МВт без существенного изменения конструкции. Выходная мощность 20 МВт вполне достижима. Расчетная эффективность модифицированных БАК-клистронов с выходной мощностью 10–20 МВт составляет порядка 70%. Обоснованность расчетов подтверждена результатами испытаний клистронов. Их внедрение позволит создать новое поколение мощных многолучевых клистронов, превосходящих мировые аналоги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yaogen Ding, Bin Shen, Shaomi Shi et al. // IEEE Transaction on Electron Devices. 2005. 52, N 5. P. 889.
2. Nusinovich G. S., Levush B., Abe D. A Review of the Development of Multiple-Beam Klystrons and TWTs, 2003.
3. Baikov A. Yu., Marrelli C., Syratchev I. // IEEE. Trans. Elec. Dev. 2015. 62, N 10. P. 3406.
4. Сандалов А. Н. Нелинейные явления при усилении электромагнитных волн интенсивными электронными потоками в многолучевых микроволновых усилителях. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Московский государственный университет, Москва, 2006.
5. Korolyov A. N., Gelvich E. A., Zhary Y. V. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. 32, N 3. P. 1109.
6. Frejdovich L. A., Nevsky P. V., Sakharov V. P. et al. Application of the Multi-Beam Klystrons with Reverse Permanent Magnet Focusing System in RF System of the Compact Electron Accelerators. 2006 International Vacuum Electronics Conference (IVEC2006). April 2006. Monterey, California, USA. P. 307.
7. David K. Abe, Joe X. Qiu, Levush B. et al. Experimental Demonstration of MBK2, an Eight-Beam, Five-cavity Multiple-Beam Klystron. 2008 International Vacuum Electronics Conference (IVEC2008). April 2008. Monterey, California, USA. P. 423.

8. *Baikov A. Y., Grushina O. A., Strikhanov M. N.* // Technical Physics. 2014. **59**, N 3. P. 421.
9. *Jensen A., Fazio M., Haase A.* et al. Retrofitting the 5045 klystron for higher efficiency[C]. Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2015. IEEE International. IEEE, 2015:1–2
10. *Guzilov I.* BAC Method of Increasing the Efficiency in Klystrons. IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC2014). Russia, Saint Petersburg, June 29–July 4, 2014.
11. *Konnov A. V., 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. P. 195.
12. *Konnov A. V., Malykhin A. V., Petenkova V. V.* et al. Analysis with Code Dev. 5.0 of Output Characteristics of Coupled Cavity TWT with Below-Cutoff Sections and with Direct and Inverse Bands Sequence. IVEC/IVESC 2006. Monterey CA, USA. P. 291.
13. *Guzilov I., Egorov R., Maslennikov O.* et al. Commercial Prototype of High Efficiency S-band Pulsed BAC MBK. IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC2016), Korea, Seoul. October 18–20, 2016.
14. *Гузилов И. А., Масленников О. Ю., Кобец В. В.* и др. **Испытания высокоэффективного импульсного многолучевого БАК–клизотрона 10-сантиметрового диапазона. Сообщение ОИЯИ.** 2017. P9-2017-78 (421.799).
15. *Guzilov I., Maslennikov O., Egorov R.* et al. 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.
16. *Егоров Р. В., Гузилов И. А., Масленников О. Ю.* // **Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].** № 7. 2017.
17. *Егоров Р. В., Гузилов И. А., Масленников О. Ю.* и др. // **Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].** № 10. 2017.

BAC–Klystrons: A New Generation of Klystrons in Vacuum Electronics

R. V. Egorov^{1,a}, I. A. Guzilov², O. Y. Maslennikov², V. L. Savvin¹

¹*Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

²*JSC «Vacuum device's basic technologies». Moscow 117342, Russia.*

E-mail: ^amystUni@mail.ru.

Two samples of S-band BAC multiple-beam BT258 klystrons were developed, fabricated, and tested at DBT with the support of CERN. A maximum efficiency of 66% was obtained at an output level of 6.6 MW. The 60% efficiency for one of multiple beam klystrons was successively confirmed in dynamic tests at CERN. The BAC method of electron grouping is discussed and the output parameters of multiple-beam BAC-klystron are compared with the existing single beam klystrons. The possibility of increasing the output power by the BAC method of electron grouping of S-band multiple-beam klystron at an output power level of 10 and 20 MW is discussed.

Keywords: vacuum electronics, multiple-beam klystron, BAC method.

PACS: 84.40.Fe.

Received: 15 June 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2019. **74**, No. 1. Pp. 38–42.

Сведения об авторах

1. Егоров Роман Владимирович — аспирант; e-mail: mystUni@mail.ru.
2. Гузилов Игорь Анатольевич — канд. физ.-мат. наук; e-mail: iag@bk.ru.
3. Масленников Олег Юрьевич — доктор техн. наук; e-mail: maslennikov_o@mail.ru.
4. Саввин Владимир Леонидович — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: vladimir.savvin@mail.ru.