

**И.А. Фрейдович, А.К. Балабанов, П.И. Акимов, Д.А. Комаров,
А.В. Коннов, Г.В. Мельничук, П.В. Невский, А.П. Никитин,
Б.В. Прокофьев, Е.П. Якушкин**

ФГУП «Научно-производственное предприятие «Торий»

Перспективы развития многолучевых клистронов

Рассмотрены основные тенденции развития многолучевых клистронов в России и за рубежом. Представлены технические характеристики клистронов и заложенные в них конструктивные решения. На основе анализа современного развития данного направления оцениваются перспективы дальнейшего развития многолучевых клистронов.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, пролетные каналы, резонатор, фокусирующая система

1. Введение.

Эффективным методом устранения недостатков, присущих однолучевым клистронам, а именно узкополосности, относительно низкого КПД, высокого напряжения катода, больших габаритов и массы, явилось создание многолучевых клистронов (МЛК).

Первые МЛК были многоствольными. Термин «ствол» обозначает одно- или многолучевую пролетную трубу, электронные лучи которой взаимодействуют с одной полуволной СВЧ электрического поля в резонаторе, работающем на высшем виде колебаний. Первеанс отдельных лучей в МЛК обычно невелик $0.3 - 1.0 \text{ мкА/В}^{3/2}$, но за счет большого количества лучей, суммарный электронный поток имеет большой, до нескольких десятков $\text{мкА/В}^{3/2}$, первеанс и низкое сопротивление. В результате, удается снизить катодное напряжение в 2 – 5 раз, по сравнению с однолучевыми аналогами, что влечет за собой уменьшение габаритов и массы клистронов, а также источников их электропитания. Индивидуальные низкопервеансные лучи лучше группируются и более эффективно отдают энергию в выходном резонаторе, что на 10 – 20% повышает КПД клистронов [1].

Однако, многоствольные конструкции не увеличивали широкополосность клистронов, поскольку снижение сопротивления суммарного электронного потока, при увеличении числа лучей, сопровождалось пропорциональным уменьшением шунтового сопротивления резонатора, работающего на высшем виде колебаний, при увеличении числа емкостных выступов.

Самое важное преимущество МЛК - расширение рабочей полосы, осуществлено в МЛК с компактным расположением лучей, в резонаторах которых несколько лучей взаимодействуют с полем одной полуволны электрического СВЧ поля. В таких резонаторах с увеличением числа лучей характеристическое сопротивление уменьшается медленнее, чем сопротивление суммарного электронного потока, что и обеспечивает возможность расширения рабочей полосы [2].

2. Технический уровень МЛК, достигнутый в России. В нашей стране, начиная с 60-х годов, были созданы несколько десятков различных моделей МЛК, предназначенных для использования в радиолокационной технике, ускорителях, передатчиках космической и тропосферной связи, телевидении, установках РЭБ и других видах оборонной и гражданской аппаратуры. Существенные преимущества МЛК позволили им успешно конкурировать с другими ЭВП, в частности, ЛБВ, магнетронами и однолучевыми клистроном. Характеристики МЛК представлены на таблицах 1,2,3.

Следует отметить ряд конструктивных особенностей МЛК российской разработки.

1. Большинство широкополосных и узкополосных МЛК, применяемых в мобильной и бортовой аппаратуре, используют пакетированные (являющиеся принадлежностью конструкции клистрона) реверсные фокусирующие системы на постоянных кольцевых магнитах (МРФС) [3]. Поле в таких системах несколько раз изменяет полярность (реверс). Практика показывает, что МЛК с МРФС имеют массу в 5 – 10 раз меньшую, чем масса однолучевых аналогов с фокусирующими электромагнитами или однополярными ФС на постоянных магнитах (ПМ МФС). С другой стороны, фокусировка электронных лучей в ПМ МФС, недостаточно устойчива и средние мощности импульсных клистронов с МРФС не превышают 25 кВт (см. таблицы 1, 2).

2. Во всех МЛК, за исключением клистрона КИУ-40 (см. таблицу 2), используются магнитно-экранированные многолучевые электронные пушки со сферическими оксидными импрегнированными катодами и общими для всех лучей катодно-подогревательными узлами (см. рис. 1). Надо отметить высокую плотность тока с катодов 7 – 12 А/см² в импульсных МЛК **L**, **S** и **X** диапазонов, и до 30 А/см² в **K**-диапазоне. Поэтому долговечность МЛК обычно не превышает 5 – 8 тысяч часов.



Рисунок 1

3. Клистроны **L**-диапазона используют традиционные тороидальные резонаторы. В ряде широкополосных клистронов этого диапазона применены двухззорные резонаторы, работающие на π -виде колебаний (см. таблицу 1), что позволяет существенно укоротить длину пространства взаимодействия.

4. В клистронов **S**-диапазона используются тороидальные, или, в наиболее мощных импульсных приборах, кольцевые резонаторы, работающие на виде колебаний E_{010} , [4] (см. таблицы 1, 2). Кольцевые резонаторы позволяют обеспечить радиальную равномерность СВЧ поля в зазорах взаимодействия большой поперечной площади. Для увеличения характеристического сопротивления, выходные активные резонаторы широкополосных клистронов выполняются двухззорными, на 2π -виде колебаний (см. таблицу 1).

5. В широкополосных клистронов **X** и **K**-диапазонов (см. таблицу 1), применяются тороидальные или призматические резонаторы, работающие на видах H_{101} и/или H_{102} . Выходные активные резонаторы двухззорные, на 2π -виде колебаний. В **X**-диапазоне применяются также многоствольные конструкции для увеличения мощности и уменьшения плотности тока с катода. При этом, в каждом стволе используются многолучевые пролетные трубы. **Важно отметить, что в начале 90-х годов была разработана конструкция двуствольного МЛК X-диапазона, работающего на двух видах колебаний, что позволило практически удвоить полосу частот.**

6. Практически во всех перечисленных широкополосных МЛК (таблица 1) для выравнивания и расширения АЧХ используются входные и выходные фильтровые системы, представляющие собой цепочку из активного и нескольких пассивных резонаторов.

На рисунках 2,3 представлены узкополосные клистроны с МРФС (см. таблицы 2,3).

Таблица 1. Импульсные широкополосные МЛК

Диапазон (длины волн, см.)	L (77 – 19)	S (19 – 6)	X (6 – 2.8)	K (2.8 – 0.8)
Относит. ширина рабочей полосы, %	6 - 16	5.4 – 7.1	4.8 – 6	0.1 - 1
Катодное напряжение, кВ	8 - 50	20 - 55	10 - 17	2 - 3
Суммарный первеанс, мкА/В ^{3/2}	7 - 18	6.4 - 18	10 - 22	3.6 – 5
Выходная импульсная мощность, кВт	10 - 4000	200 – 2000	20 – 240	0.2 – 1
Выходная средняя мощность, кВт	3 - 27	5 – 27	2 – 6	0.1 – 0.3
КПД, %	25 - 45	25 - 40	20 - 40	20 - 35
Коэффициент усиления, дБ	30 - 45	35 – 55	35 - 45	30 - 35
Количество стволов	1	1	1 - 4	1
Количество лучей	30 - 37	6 – 30	19 – 28	18
Способ фокусировки	МРФС	МРФС, соленоид	ПМ МФС, МРФС	ПМ МФС
Масса клистрона с ФС, кг	40 - 100	35 – 80, 260	15 - 35	0.4 – 1.5

Таблица 2 Импульсные клистроны для ускорителей

Марка клистрона	КИУ-40	КИУ-111	КИУ-168	КИУ-147	КИУ-147А
Частота, МГц	991	2450	2856	2450	2856
Катодное напряжение, кВ	65	50	52	50	52
Суммарный первеанс, мкА/В ^{3/2}	10	22	24	22	24
Выходная импульсная мощность, МВт	4.7	5	6	5	6
Выходная средняя мощность, кВт	70	5	6	25	25
КПД, %	45	40	45	45	45
Коэффициент усиления, дБ	40	50	50	50	50
Количество стволов	1	1	1	1	1
Количество лучей	6	40	40	40	40
Способ фокусировки	Соленоид	МРФС	МРФС	МРФС	МРФС
Масса клистрона с ФС, кг	350	85	85	90	90

Таблица 3. Клістроны для ускорителей непрерывного режима работы.

Марка клистрона	КУ-400	КУ-399	КУ-399А
Частота, МГц	505.8	2450	2450
Катодное напряжение, кВ	20	10	15
Суммарный первеанс, мкА/В ^{3/2}	1.8	4.5	2.8
Выходная мощность, кВт	65	25	50
КПД, %	60	55	65
Коэффициент усиления, дБ	43	40	42
Количество стволов	1	1	1
Количество лучей	6	18	18
Способ фокусировки	Соленоид	МРФС	МРФС
Масса клистрона с ФС	230	35	45



Рисунок 2



Рисунок 3

3. Многолучевые клистроны за рубежом. В последние годы 20 века значительно активизировались разработки МЛК за рубежом. Работы ведутся как в области создания широкополосных МЛК, например, клистрон S –диапазона для модернизации РЛС AN/SPY-1 системы AEGIS, так и в области узкополосных МЛК для ускорителей.

Конструкции зарубежных широкополосных клистронов не несут в себе качественных отличий от российских аналогов. Однако в разработке узкополосных сверхмощных клистронов ведущими зарубежными фирмами достигнуты значительные

успехи, что связано с проектами линейного электрон – позитронного коллайдера TESLA (Германия), а также Международного электрон-позитронного линейного коллайдера, использующими сверхпроводящие ускорительные технологии. Создание этих ускорителей обеспечивает рынок сбыта клистронов в количестве тысяч штук, что и послужило толчком к их ускоренной разработке тремя ведущими зарубежными фирмами CPI, клистрон VKL-8301 рис. 4а; Thales, клистрон TH 1801, рис. 4b; Toshiba, клистрон E3736, рис 4с. [5].

К клистронам предъявляются следующие основные требования:

Частота	1.3 ГГц;
Импульсная выходная мощность, не менее	10 МВт;
Средняя выходная мощность, не менее	150 кВт;
Длительность импульса	1.5 мс;
Напряжение луча, не более	120кВ;
КПД, не менее	65 %;
Усиление в насыщении, не менее	47 дБ;
Долговечность, не менее	100000 ч.

Выполнение совокупности вышеприведенных требований возможно только в многолучевой конструкции. Высокий уровень средней мощности достигается использованием электронных пушек с магнитным сопровождением парциальных пучков. Разработка таких пушек требует формирования в катодной области аксиально-симметричного магнитного поля со сходящимися магнитными силовыми линиями, причем в многолучевой пушке поле должно быть симметричным относительно оси каждого луча. В однолучевом клистроне, когда ось луча совпадает с осью фокусирующего соленоида, решение этой задачи не представляет трудности. Однако, в многолучевых клистронов, где оси лучей не совпадают с осью соленоида, обеспечение симметричности магнитного поля в катодных областях явилось сложной задачей, которую разработчики каждой из фирм решили различными путями. При этом, клистрон TH 1801 имеет плотность тока с катодов 5 А/см^2 , а VKL-8301 и E3736 не более 2.5 А/см^2 , что обеспечивает значительную долговечность.



Рисунок 4

Таким образом, можно заключить, что если в 80 – 90-х годах прошлого века у российских предприятий был безусловный приоритет в области МЛК, то в начале двадцатого века ситуация изменилась, по крайней мере в области сверхмощных МЛК.

4. Основные направления дальнейшего развития МЛК проистекают из общих тенденций развития ЭВП СВЧ.

4.1 Переход в область высоких частот, в частности, в миллиметровый диапазон.

Эта тенденция связана, во-первых, с развитием твердотельных источников СВЧ излучения и их успешной конкуренцией с электровакуумными приборами в низкочастотной области СВЧ диапазона. Во-вторых, развитие цифровых методов обработки сигнала снижает требования к уровню мощности передатчиков, а повышение частоты сигнала повышает эффективность ряда применений радиолокационной и связной аппаратуры и улучшает ее массогабаритные характеристики.

Как следует из таблицы 1, в случае мощных МЛК, этот переход к высоким частотам может быть осуществлен путем создания многоствольных конструкций с резонаторами, работающими на высших видах колебаний. При этом, расширение полосы частот может достигаться путем создания многоствольных клистронов, работающих на нескольких видах колебаний [6].

Еще одним способом расширения полосы частот МЛК является использование многозазорных резонаторов. До сих пор, в МЛК использовались выходные активные резонаторы с числом зазоров не более 2. Однако, проведенные оценки показывают, что в области высоких частот, в К-диапазоне, возможно использование выходных активных резонаторов с большим числом зазоров.

На предприятии ФГУП «НПП «Торий» в настоящее время проводятся две НИОКР, направленные на создание широкополосных многолучевых клистронов, работающих в Ка (8 мм) диапазоне. Их характеристики представлены в таблице 4. В обоих клистронах, используются призматические резонаторы, работающие на виде колебаний H_{102} . В клистроне «Форма-М» в каждом стволе по одному лучу, в клистроне «Атолл» каждая из двух пролетных труб имеет по 18 пролетных каналов диаметром 0.3 мм. На входе и выходе каждого из клистронов установлены двухзвенные фильтровые системы, включающие активный резонатор и по одному пассивному, работающему также на виде колебаний H_{102} .

Таблица 4.

Название клистрона	Форма-М	Атолл	Бекас
Диапазон	Ка	Ка	Х
Относительная полоса частот, %	1.5	0.9	-
Катодное напряжение, кВ	10	2	43
Суммарный первеанс, мкА/В ^{3/2}	1.5	10	14
Выходная импульсная мощность, кВт	5	0.2	2500
Выходная средняя мощность, кВт	0.3	0.07	10

КПД, %	35	15	50
Коэффициент усиления, дБ	40	30	50
Количество стволов	2	2	1
Количество лучей	2	36	26
Способ фокусировки	ПМ ФМС	ПМ ФМС	МРФС
Масса клистрона с ФС, кг	24	0.9	45

На рис. 5 представлена 3D модель фильтровой системы клистрона «Атолл». Оба клистрона работают на одном виде колебаний, но их конструкция предполагает принципиальную возможность работы на двух видах колебаний H_{102} и H_{101} . При этом, полоса частот клистронов может быть удвоена без существенных переделок. На рис. 6 представлена фотография клистрона «Форма» с магнитной системой.

Тенденция увеличения рабочих частот касается не только широкополосных МЛК, но и узкополосных мощных клистронов, предназначенных для питания ускорителей. Применение пакетированных МЛК, представленных в таблице 2, не обеспечивает требований аппаратуры современных мобильных инспекционно-досмотровых комплексов по компактности и весу. Поэтому ФГУП «НПП «Торий» проводит проработку конструкции

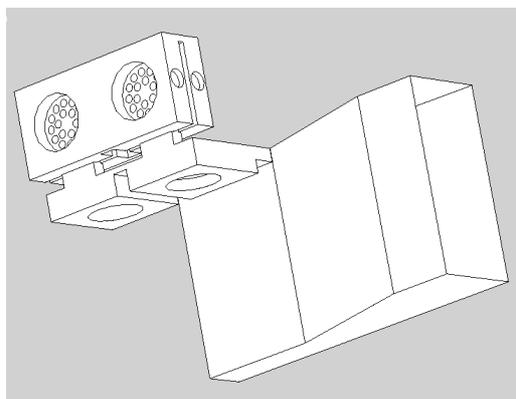


Рисунок 5



Рисунок 6

МЛК «Бекас», работающего на частоте 5712 МГц с характеристиками, представленными в таблице 4. Отличительной особенностью этого клистрона является использование кольцевых резонаторов, работающих на высшем виде колебаний E_{020} , что обеспечивает равномерность поля в зазорах взаимодействия и приемле-

мую плотность тока с катодов, в пределах 9 A/cm^2 . На рис. 7 представлен общий эскиз резонатора с видом колебаний E_{020} .

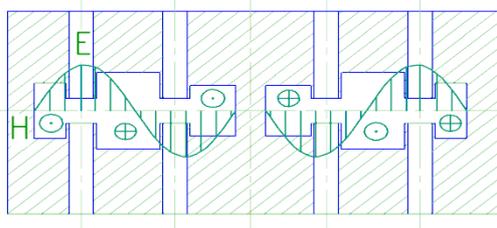


Рисунок 7

4.2 Создание мощных МЛК с магнитным сопровождением лучей в области пушки. В настоящее время, в России не выпускаются клистроны с выходной средней мощностью свыше 60 – 80 кВт. Между тем, такие клистроны необходимы для питания мощных ускорителей электронов и протонов, используемых в промышленности, медицине и фундаментальных исследованиях.

Оптимальной для создания подобных клистронов является конструкция МЛК с магнитным сопровождением луча в области пушки, то есть близкая к клистронам, рассмотренным в разделе 3. Создание подобных конструкций представляется вполне осуществимым для Российских предприятий.

5. Разработка современных методов трехмерного математического моделирования является важнейшим условием эффективного проведения разработок многолучевых

клизтронов. Учитывая отставание России в этой области, совершенно необходимым является создание современных отечественных 3D программ расчета электронно-оптических, электродинамических систем и тепловых процессов. В этом смысле необходимо отметить отечественные программы [7,8].

Для успешного моделирования сложных многоствольных МЛК, работающих на нескольких видах колебаний, представляется необходимой разработка программы взаимодействия неидентичных электронных лучей с полем разветвленных резонансных структур. Такие программы могли бы учитывать амплитудную и фазовую неоднородность полей, воздействующих на различные лучи МЛК. В настоящее время развитие этого направления сдерживается необходимостью самосогласованного PIC моделирования 2D-3D взаимодействия электронных лучей с полями электродинамической системы, что для современных вычислительных средств, представляется непростой задачей. Совершенствование дискретных методов моделирования на основе эквивалентных схем с максимальным количеством степеней свободы [9,10] позволяет разделить электродинамическую задачу и задачу расчета взаимодействия и снять принципиальные сложности с расчетом полей в каналах МЛК. Последнее в сочетании с методами параллельных вычислений является основой создания программ самосогласованного расчета МЛК, обеспечивающих погрешность расчета КПД не хуже 5%.

Библиографический список

1. Palmer R. Introduction to Cluster Klystrons / R. Palmer // – Proc. of the International Workshop on Pulsed RF Power Sources For Linear Colliders. – RF93. – Dubna, Protvino. – Russia. – July 5-9. – 1993.
2. Борисов Л.М. / Мощные многолучевые электровакуумные усилители СВЧ / Л.М. Борисов, Э.А. Гельвич, Е.В. Жарый, А.Д. Закурдаев, Ю.А. Ковалев, Е.А. Котюргин, Г.В. Курилов, М.И. Лопин, А.С. Победоносцев, В.И. Пугнин, Б.В. Сазонов // – Электронная техника. – Сер. 1. – СВЧ-техника. – 1993. – Вып. 1(455).
3. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский // – Сов. Радио. – Москва. – 1966.
4. Freydovich I.A. /Application of the Multi-Beam Klystrons with Reverse Permanent Magnet Focusing System in RF Systems of the Compact Electron Accelerators / I.A. Freydovich, P.V. Nevsky, M.Y. Vorobyev et all // – IVEC/IVESC 2006. – April 25-27. – 2006. – p. 307 – 309.
5. Chin. Development of Toshiba L-Band Multy-Beam Klystron for Europen XFEL Project/ Chin et all// – Particle Accelerator Conference. – PAC-2005 Proceedings. – May 16-20. – 2005. pp. 3153-3155.
6. Пасманник В.И. Системы связанных контуров / В.И. Пасманник // – ФМ. – Москва. – 2005.
7. Prokofiev B.V. Optimization of the Broadband Asymmetrical Waveguide Windows / B.V. Prokofiev // – Tenth Int. Vacuum Electronics Conf. IVEC 2009. – April 28-30. – 2009. – Rome, Italy. – p. 409,410.
8. Григорьев А.Д. Моделирование антенн сотовых телефонов методом векторных конечных элементов / А.Д. Григорьев, Р.В. Салимов, Р.И. Тихонов // – Радиотехника и электроника. – 2012. – т. 57. – № 3. – с. 261-270.
9. Konnov A.V. Extended interaction multiple beam klystron simulation with DEV 5.0 code / A.V. Konnov // – Tenth Int. Vacuum Electronics Conf. IVEC 2009. – April 28-30. – 2009. Rome, Italy. – p. 363.
10. Фрейдович И.А. Расчет амплитудно-частотных характеристик кольцевых резонаторов / И. А. Фрейдович, М.Ю. Воробьев, Н.А. Кокорев // – Радиотехника и электроника. – 1999. – Том 44. – №8. – с.1013-1021.