

## РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

**Физические причины ограничения эффективности мощных многолучевых клистронов**Р. В. Егоров,<sup>1,а</sup> В. Л. Саввин,<sup>1</sup> Б. В. Прокофьев,<sup>2,б</sup> А. В. Коннов<sup>2</sup><sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*<sup>2</sup> *Научно-производственное предприятие «Торий» (АО НПП «Торий»).*

Поступила в редакцию 27.04.2020, после доработки 10.07.2020, принята к публикации 15.07.2020.

Обсуждается необходимость трехмерного моделирования движения многолучевого электронного потока в мощных многолучевых клистронов для реализации высоких значений КПД (70% и выше). Рассчитанный ранее в рамках одномерной и двумерной моделей только для одного парциального пучка КПД многолучевых клистронов оказывается больше экспериментально измеренного, как правило, на 10–15% абсолютной величины. Увеличение числа парциальных пучков и поперечно-развитая конфигурация кольцевых резонаторов («сверхразмерность» резонатора), как правило, приводят к увеличению неоднородности распределения поля СВЧ по каналам кольцевого резонатора и порождают различие фаз СВЧ полей (фазовые набег).

В статье показано, что отбор энергии даже от идентичных электронных сгустков многолучевого потока зависит от расположения парциального пролетного канала относительно вывода энергии. Известно, что применение ВАС-метода группирования электронов позволяет повысить КПД клистронов. Представленные в настоящей статье результаты 3D моделирования взаимодействия многолучевого электронного потока в выходном кольцевом резонаторе ВАС-клистрона с выходной импульсной мощностью 6 МВт позволили количественно оценить влияние фазовых набегов волн. Показано, что различие фаз СВЧ-полей в выходном резонаторе существенно снижает эффективность взаимодействия и, соответственно, КПД многолучевых клистронов. Таким образом, фазовое запаздывание волн, возбуждаемых в разных пролетных каналах зазора «сверхразмерного» кольцевого выходного резонатора, является одной из физических причин ограничения эффективности многолучевых клистронов.

*Ключевые слова:* многолучевой электронный поток, многолучевой клистрон, кольцевой резонатор, ВАС-клистрон.

УДК: 537.8, 537.5. PACS: 84.40.Fe.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время мощные высокоэффективные импульсные многолучевые клистроны (МЛК), в которых электронный поток состоит из нескольких парциальных пучков, широко востребованы в самых различных областях науки и техники, включая «энергоёмкие промышленные СВЧ-технологии, а также целый ряд технологий СВЧ-энергетики» [1]. МЛК позволяют получить на порядок большую мощность СВЧ по сравнению с однолучевыми клистроном при сравнимых значениях рабочего напряжения. В существующих конструкциях МЛК количество парциальных пучков составляет от нескольких единиц до нескольких десятков. По значению КПД МЛК существенно превосходят однолучевые клистроны по причине более оптимального (меньшего) значения первеанса парциального пучка. Можно также отметить, что МЛК значительно превосходят однолучевые клистроны по полосе рабочих частот.

Основным применением мощных МЛК являются ускорители, в которых МЛК используются в качестве источников питания ускорительных секций. Достигнутый на сегодняшний день КПД мощных импульсных МЛК (около 45–50% в S — диапазоне длин волн, 65% — в L — диапазоне) крайне важно повысить для реализации будущего поколения

линейных ускорителей—суперколлайдеров с энергией частиц несколько десятков тераэлектронвольт. Но тем не менее повышение КПД МЛК и на сегодня остается одной из самых актуальных задач [2, 3].

Настоящая статья посвящена выявлению причин ограничения КПД мощных импульсных МЛК. В МЛК, как и в однолучевых клистронов, в входном резонаторе создается скоростная модуляция электронов. Эта модуляция порождает расслоение пучка по плотности и формирование сгустков. Сформированные сгустки тормозятся электромагнитным полем в выходном резонаторе клистрона. Одновременно эти два механизма порождают ограничения на эффективность энергообмена в выходном резонаторе клистрона. Первый из них приводит к формированию многоскоростного электронного потока, а второй — к неустойчивости самих сгустков из-за сильно возрастающих кулоновских полей.

Ранее были предложены различные методы группирования электронного пучка, которые в той или иной степени ослабляют негативные последствия сил пространственного заряда: метод осцилляций ядра (СОМ — Core Oscillation Method) [4] или метод включения в группирователь клистрона резонаторов второй и третьей гармоник [5]. Так, резонаторы второй и/или третьей гармоник разбивают эти сгустки соответственно на два и/или три подсгустка, в каждом из которых ослаблены последствия кулоновского расталкивания, и которые затем сводят в один сгусток в выходном резонаторе клистрона.

<sup>а</sup> E-mail: [mystUni@mail.ru](mailto:mystUni@mail.ru)

<sup>б</sup> E-mail: [bpoktor@mail.ru](mailto:bpoktor@mail.ru)



Рис. 1. ВАС-МЛК на испытательном стенде в ОИЯИ (г. Дубна)

Еще одним методом уменьшения последствий расталкивающих кулоновских сил и одновременно разброса скоростей электронов является реализованный в настоящее время ВАС (Bunching, Alignment, Collecting) — метод группировки электронов в клистерах [6, 7]. Важно отметить, что МЛК с ВАС-группирователями существенно более компактны по сравнению с другими типами МЛК [8].

На предприятии ООО «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов» были изготовлены два 40-лучевых ВАС-клистрона с кольцевыми резонаторами [6, 7, 9] с уровнем выходной импульсной мощности 6 МВт, прошедшие испытания (рис. 1) в 2016–2017 годах в ОИЯИ (г. Дубна) и в ЦЕРН (г. Женева, Швейцария) [10, 11].

Измеренный КПД 40-лучевого ВАС-клистрона составил 64% (рабочая частота 2.9985 ГГц, напряжение катода 51.7 кВ, ток катода 192 А), что на 15–20% выше по сравнению с прототипом и зарубежными однолучевыми аналогами [12–14].

Переход от одного пучка к нескольким парциальным пучкам с меньшим значением парциального первеанса, распространяющимся в разных каналах, позволяет ослабить кулоновское расталкивание. Вместе с тем наличие нескольких парциальных пучков означает возможность неодинаковости взаимодействия разных пучков с СВЧ-полями и, соответственно, снижения КПД МЛК.

В настоящей работе подробно рассмотрены механизмы ограничения КПД МЛК, связанные с неоднородностью СВЧ-полей, взаимодействующих с парциальными пучками.

### 1. НЕОБХОДИМОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ В ТРЕХМЕРНЫХ ПРОГРАММАХ

Объект исследования настоящей работы — изучение процессов взаимодействия электронного потока с СВЧ-полями многолучевого выходного кольцевого резонатора (КР) (рис. 2). Для анализа процессов

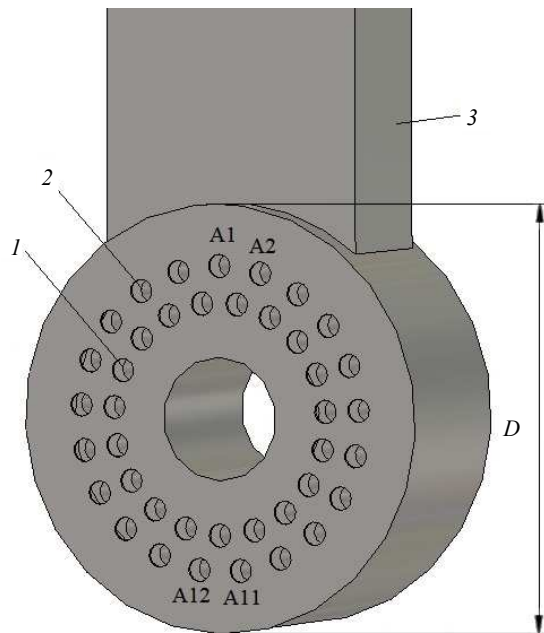


Рис. 2. Выходной КР МЛК с 40 каналами: 1 — внутренний ряд каналов (19 каналов), 2 — внешний ряд каналов (21 канал), 3 — выходной волновод, A1, A2, ..., A11, A12 — каналы внешнего ряда, (каналы нумеруются от щели связи по азимуту),  $D$  — диаметр резонатора

энергообмена в выходном КР была выбрана конструкция экспериментального многолучевого ВАС-клистрона с выходной импульсной мощностью 6 МВт. Выходной КР включает 2 ряда пролетных каналов (19 каналов во внутреннем ряду + 21 канал во внешнем ряду) [15]. Пролетные каналы внешнего ряда A1, A2, ..., A11, A12 нумеруются по азимуту от щели связи. СВЧ-мощность выводится в выходной волновод прямоугольного сечения  $72 \times 34$  мм через щель связи, расположенную в цилиндрической стенке КР (рис. 2).

Современные КР, в отличие от тороидальных резонаторов, нашли широкое применение в мощных МЛК с числом парциальных пучков существенно больше 10 и являются развитием первоначально предложенной М. Бойдом [16] линейной конструкции резонатора многолучевых приборов, замкнутой в кольцо.

В многолучевых КР появляются дополнительные факторы, ограничивающие КПД МЛК. Так, существенное увеличение диаметра  $D$  области взаимодействия является причиной неоднородного радиального и азимутального распределения высокочастотных полей при наличии вывода энергии, что приводит, в свою очередь, к различиям как в форме сгустков, так и в скоростях электронов парциальных пучков на оси различных пролетных каналов в одном резонаторе.

Корректно провести исследование динамики парциальных электронных пучков в электромагнитных полях КР представляется возможным только при использовании современных методов трехмерного моделирования в самосогласованном приближении [17].

Среди основных причин необходимости трехмерного рассмотрения следует отметить следующие.

1. В одномерном и двумерном приближениях расчет проводится только для одного парциально-го пучка. Соответственно одномерные и двумерные модели не учитывают передачу энергии между парциальными пучками в поперечно-развитых электродинамических структурах, характерные размеры которых сравнимы с длиной волны («сверхразмерные» структуры). Рассчитанный таким образом КПД МЛК оказывается больше измеренного, как правило, на 10–15% по абсолютной величине.

Между тем в рассматриваемом случае (рис. 2) диаметр  $D$  КР МЛК превышает длину волны в свободном пространстве. По этой причине в КР частоты высших видов колебаний расположены в непосредственной близости ( $\Delta f = f_n - f_0 < 0.1 \cdot f_0$ , где  $f_n$  — резонансная частота ближайшего к рабочему высшему виду колебаний,  $f_0$  — частота рабочего вида колебаний) к частоте основного вида колебаний. Близость посторонних видов колебаний к рабочей частоте порождает взаимодействие электронов с этими видами колебаний и всегда означает недостаточную интенсивность процессов передачи энергии между различными частями электродинамической структуры, т. е. слабую внутреннюю энергетическую связанность. Каждый пучок отдает фиксированную величину мощности, и указанная слабая энергетическая связанность порождает отличие амплитуд и фаз СВЧ-полей в различных частях электродинамической структуры. Как следствие, группировка электронов в различных каналах МЛК развивается по-разному, тем самым в одномерных и двумерных моделях игнорируются факты различий группирования, а также отбора энергии. Торможение электронных сгустков различных парциальных пучков в выходном резонаторе существенно зависит от амплитуд и фаз СВЧ-поля в зазоре взаимодействия в области соответствующего канала.

2. В одномерных и двумерных программах рассматривается приближение «замороженного» в магнитном поле центра симметрии пучка, а в одномерной модели и его радиуса, т. е. действительные траектории электронов не вычисляются в принципе.

3. Целесообразность поиска путей улучшения характеристик (выходная мощность, КПД, усиление) ВАС-МЛК с выходной импульсной мощностью 6 МВт, ранее разработанного по одномерной программе.

Для решения задачи был выбран метод Particle-In-Cell («частица в ячейке»), используемый для моделирования динамики заряженных частиц в 3D электромагнитных полях. Метод позволяет выполнить расчет траекторий заряженных частиц в заданных электромагнитных полях и в самосогласованных полях СВЧ с учетом всех возбуждаемых видов колебаний и с учетом влияния сил пространственного заряда, релятивистских эффектов, вторичной электронной эмиссии.

Закон (1) и уравнение движения (2) релятивистской динамики заряженных частиц в использованной трехмерной модели [18]:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{1}{m_0\gamma(p)}\mathbf{p}, \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{q}{m_0\gamma(p)}[\mathbf{p} \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)], \quad (2)$$

где  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{p}$  — положение и импульс частицы с массой покоя  $m_0$  и зарядом  $q$ ,  $\gamma(p) = \sqrt{1 + p^2/(m_0^2c^2)}$  — фактор Лоренца ( $c$  — скорость света в вакууме);  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$  — решения уравнений Максвелла.

Метод «частица в ячейке» — явный метод второго порядка численного интегрирования дифференциальных уравнений.

Уравнения схемы метода «частица в ячейке» имеют следующий вид (3)–(7):

$$\mathbf{r}_{k+1/2} = \mathbf{r}_k + \frac{\Delta t}{2} \frac{\mathbf{p}_k}{m_0\gamma(p_k)}, \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{p}_k + \frac{\Delta tq}{2}\mathbf{E}_{k+1/2}, \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{p}} = \exp\left(\frac{\Delta tq}{m_0\gamma(\hat{p})}\mathbf{B}_{k+1/2}\right)\hat{\mathbf{p}}, \quad (5)$$

$$\mathbf{p}_{k+1} = \tilde{\mathbf{p}} + \frac{\Delta tq}{2}\mathbf{E}_{k+1/2}, \quad (6)$$

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{r}_{k+1/2} + \frac{\Delta t}{2} \frac{\mathbf{p}_{k+1}}{m_0\gamma(p_{k+1})}, \quad (7)$$

где  $\Delta t$  ( $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ ) — временной шаг обновления переменных, индекс  $k$  относится к предыдущему временному шагу,  $k + 1$  — к обновленным величинам следующего временного шага, электромагнитные поля  $\mathbf{E}_{k+1/2} = \mathbf{E}(\mathbf{r}_{k+1/2}, t_{k+1/2})$ ,  $\mathbf{B}_{k+1/2} = \mathbf{B}(\mathbf{r}_{k+1/2}, t_{k+1/2})$  рассчитываются в узлах сетки по схеме с перешагиванием. Для обеспечения стабильности решения на временной и пространственной шагах накладываются следующие условия:  $\Delta t \leq 0.1\omega_{pe}^{-1}$ ,  $|\Delta\mathbf{r}| \leq c\Delta t$  ( $\omega_{pe}$  — электронная плазменная частота колебаний).

## 2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГООБМЕНА В ВЫХОДНОМ КР МЛК

Исследования процессов взаимодействия электронного сгустка с полем СВЧ выходного резонатора в приближении идеализированного сгустка проводились на физическом факультете МГУ с 1970-х годов [19, 20]. В частности, использовались модели равномерно заряженных моноскоростных сгустков цилиндрической формы в однолучевом клистроне [20].

Для численного 3D-моделирования в настоящей работе использована идеализированная модель идентично сгруппированных парциальных пучков. В зазор выходного многолучевого КР по всем пролетным каналам периодически влетают одинаковые сгустки электронов цилиндрической формы с гауссовым продольным распределением плотности тока в одно и то же время с равными скоростями.

Аналогичная форма сгустков использовалась при моделировании идеализированного двухазорного резонатора МЛК с десятью парциальными пучками [21]. Анализ фазовых траекторий электронов в канале МЛК по одномерным и двумерным программам показал, что гауссово продольное распределение плотности заряда в сгустке более близко к действительности, чем равномерное распределение.



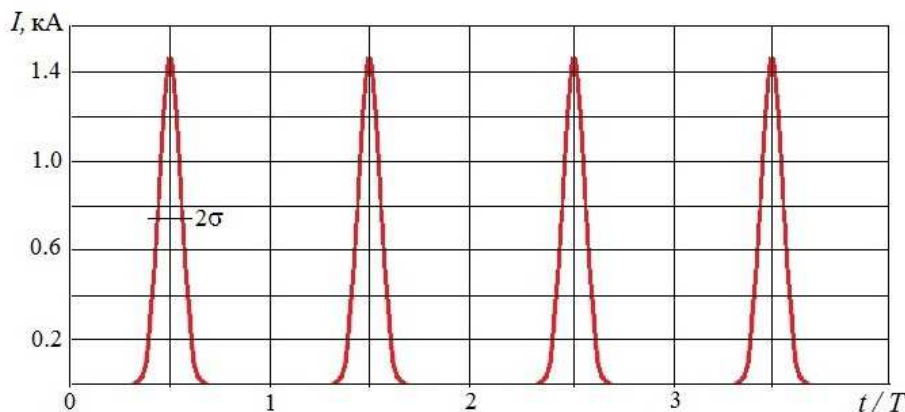


Рис. 3. Зависимость от времени мгновенного тока 40 электронных сгустков, поступающих в выходной КР:  $T$  — период СВЧ поля,  $2\sigma$  — длительность ядра сгустка

Анализируемая электродинамическая 3D-модель выходного многолучевого КР полностью соответствует конструкции выходного КР ранее разработанного ВАС—МЛК с выходной импульсной мощностью 6 МВт [10–14]. СВЧ-мощность выводится через щель связи на цилиндрической поверхности КР (рис. 2) в волновод прямоугольного сечения. Значения параметров модели выходного КР исследуемого МЛК и параметры пучков, которые использовались при 3D-моделировании и расчете, представлены в таблице.

Фокусирующее магнитное поле в модели предполагалось однородным. Задавалось бриллюэновское состояние электронного потока. В этом состоянии энергия азимутального движения крайнего по радиусу электрона равна «провисанию потенциала» от края пучка к оси, умноженному на заряд электрона. Эффекты радиального расслоения парциального электронного пучка не рассматривались.

В настоящей статье используются понятия «холодного» поля и «горячего» поля. Под «холодным» полем понимаются СВЧ-поля, возбужденные в КР гармо-

ническим генератором, подключенным со стороны выходного волновода в отсутствие многолучевого электронного потока. Под «горячим» полем понимаются СВЧ-поля, возбужденные в КР упомянутыми идеализированными сгустками.

На первом этапе моделирования было проведено выравнивание распределения амплитуд «холодных» электрических полей рабочего вида колебаний в КР по каналам, рассчитано характеристическое сопротивление в каналах КР и подобрана оптимальная резонансная частота КР рабочего вида. Выровненные по каналам КР значения характеристического сопротивления СВЧ-полей рабочего вида  $TM_{010}$  лежат в интервале 3.4–3.5 Ом. Расчетная собственная добротность рабочего вида колебаний составляет 5000, нагруженная добротность находится в диапазоне 80–100.

На втором этапе было подобрано распределение тока электронных сгустков на влете (расстояние  $2R_t$  от входной плоскости зазора) в КР: эффективная фазовая длительность, амплитуда тока сгустка и частота следования сгустков (рис. 3). Выбраны следующие значения параметров: длительность ядра сгустка  $\sigma$  (ширина на уровне половины амплитуды) составила величину 0.68 радиан ( $0.22\pi$ ), а максимальное значение тока сгустка составило 1470/40 А.

Для сравнения: в одномерных программах DEV 5.1 [22], KLYS 4.5 [23], которые использовались при разработке первых ВАС-МЛК, временная длительность сгустка составляет 0.79 радиан ( $0.25\pi$ ), что на 16% больше, чем в рассматриваемой трехмерной модели. КПД ВАС-клистрона, рассчитанного по одномерной модели DEV 5.1, составил 72.9%.

Время выхода в стационарный режим амплитуды «горячего» СВЧ-поля на фланце вывода энергии в режиме расчета нестационарного взаимодействия парциальных электронных пучков и СВЧ-полей выходного КР составляет приблизительно 30 нс ( $\sim Q_L/f_0$ , где  $Q_L$  — нагруженная добротность выходного КР). Это время соответствует 90 периодам колебаний высокочастотного поля при значении рабочей добротности выходного КР, равном 80–100.

По результатам оптимизации частоты рабочего вида колебаний  $TM_{010}$  (по критерию КПД), характеристического сопротивления по каналам, «холодной»

Таблица. Основные параметры пучков и численной модели КР

Параметр	Единица измерения	Значение
Частота следования сгустков, $f_0$	ГГц	3.000
Суммарный ток, $I_0$	А	1470
Количество пучков, $N_b$		40
Напряжение пучков, $U_0$	кВ	52
Фокусирующее магнитное поле, $B_z$	Гс	1400
Время расчета, $t_{calc}$	нс	20–60
Диаметр резонатора, $D$	мм	114
Радиус канала, $R_t$	мм	3.25
Коэффициент заполнения канала		0.6
Длина зазора, $L_g$	мм	6
Общее число крупных частиц		> 400 000
Количество ячеек сетки разбиения		~4 000 000

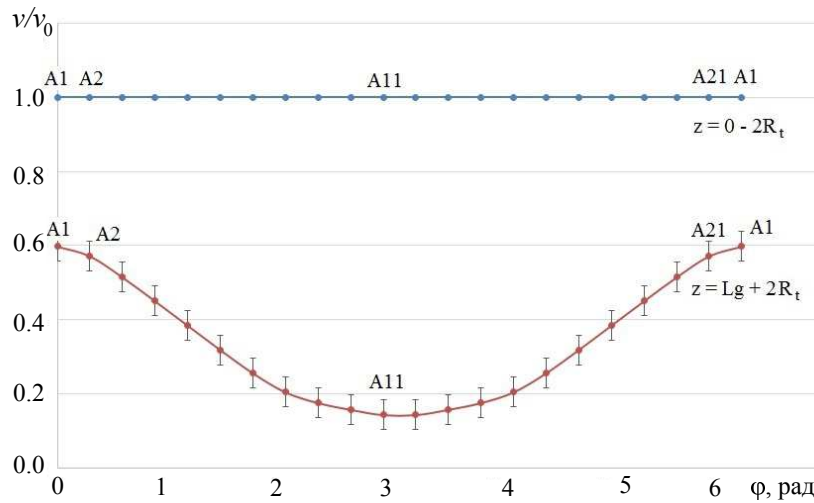


Рис. 4. Зависимость усредненной относительной скорости электронов сгустка от азимутального угла канала внешнего кольца до торможения в выходном КР МЛК (кривая  $z = 0 - 2R_t$ ) и после торможения (кривая  $z = L_g + 2R_t$ )

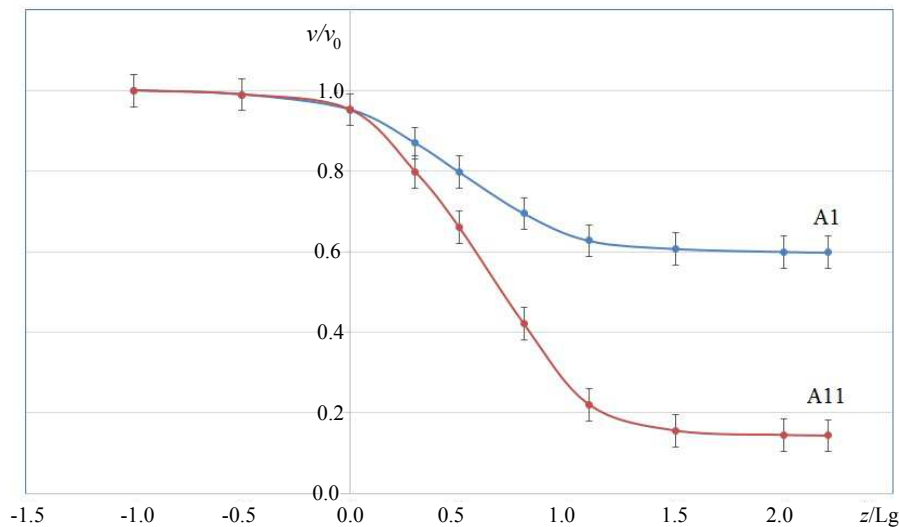


Рис. 5. Зависимость усредненных относительных скоростей электронов сгустка от продольной координаты  $z/L_g$  в азимутально противоположных каналах A1 и A11 выходного КР МЛК

нагруженной добротности выходного КР, фокусирующего магнитного поля и длительности ядра гауссова сгустка была рассчитана зависимость от времени выходной СВЧ-мощности на фланце волновода. Рассчитанная оптимизированная выходная мощность составила 7.33 МВт, что соответствует эффективности энергоотбора 70.5%.

После численного интегрирования уравнений движения вычислялись средние значения энергии заторможенных сгустков, соответствующие разным каналам как на выходе из зазора, так и в пределах зазора. Средние значения энергии вычислялись для заданного значения  $z$  путем усреднения по всем электронам сгустка с временным номером  $N - 3$  и  $N - 2$ , где  $N$  — общее число сгустков временной последовательности. Отдельно контролировался факт нахождения усредняемого электрона в «своем» временном периоде. Также контролировался факт незначительного (менее 0.1%) отличия сгустков с номерами  $N - 3$  и  $N - 2$  в части вычисляемого среднего значения, что соответствовало установившемуся режиму. В ином случае проводился новый расчет при большем значении  $N$ .

В ходе проведения расчетов по исходным данным (таблица) было выявлено неравномерное торможение электронных сгустков в различных пролетных каналах выходного КР. Щель связи выходного КР с волноводной системой вносит неравномерность в распределение амплитуд и фаз СВЧ-полей КР ВАС-МЛК. Это заметно по разбросу скоростей электронов, которые прошли торможение в СВЧ-полях выходного КР.

На рис. 4 представлены относительные скорости, соответствующие указанной выше средней энергии электронов (усредненная скорость) в зависимости от азимутального угла каналов в КР до ( $z = 0 - 2R_t$ ) и после ( $z = L_g + 2R_t$ ) прохождения зазора выходного резонатора (входная плоскость зазора  $z = 0$ , выходная плоскость зазора  $z = L_g$ , где  $L_g$  — длина емкостного зазора выходного КР). Начальные продольные скорости всех электронов на влете в зазор резонатора одинаковы и равны с учетом «провисания потенциала»  $v_0 = 1.26 \cdot 10^8$  м/с.

На выходе из зазора канала A1 (см. рис. 2) относительное значение усредненной скорости электронов сгустка составляет около 0.6, в то время,

как в пролетном канале A11 и ближайших к нему каналах (рис. 4) относительные усредненные скорости сгустков лежат в диапазоне от 0.15 до 0.2. Соответствующие максимальное и минимальное значения скоростей электронов по каналам КР на выходе из зазора  $z = L_g + 2R_t$  отличаются в 3–4 раза (рис. 4).

Электроны сгустков в каналах, противоположных щели связи, подвергаются воздействию более сильных СВЧ-полей и иначе отдают свою энергию СВЧ-полю, чем электроны со стороны щели связи резонатора с волноводом. Зависимость усредненной скорости электронов сгустка от продольной координаты (различные сечения зазора КР) в азимутально противоположных каналах A1 и A11 выходного КР МЛК (рис. 2) представлена на рис. 5. Верхняя кривая соответствует сгусткам электронов в пролетном канале A1, прилегающем к щели связи с выходным волноводным трактом, нижняя кривая — электронам в пролетном канале A11, противоположном щели связи.

Причиной неравномерного отбора энергии парциальных пучков является неоднородное «горячее» распределение СВЧ-поля в разных пролетных каналах зазора выходного КР. Увеличение числа парциальных пучков и увеличение диаметра расположения пролетных каналов КР влечет фазовое запаздывание относительно друг друга парциальных волн, образовавшихся при торможении в пролетных каналах. Таким образом, в «горячем» режиме имеет место уменьшение амплитуды результирующего тормозящего СВЧ-поля в прилегающих к щели связи каналах и, соответственно, неравномерное торможение электронных сгустков в разных пролетных каналах зазора КР.

Результаты проведенных исследований показывают необходимость выравнивания «горячих» полей КР, особенно по фазам. Таким образом, к существенным физическим ограничениям КПД МЛК следует отнести фазовые набег СВЧ-полей, возбуждаемых в зазорах разных пролетных каналов «сверхразмерного» КР. Способы уменьшения разброса фаз СВЧ-полей в выходном КР МЛК будут рассмотрены в дальнейшем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Несмотря на то, что характеристическое сопротивление рабочего вида колебаний в зазоре выходного «холодного» КР рассматриваемого МЛК, было выровнено с высокой степенью точности, в динамическом режиме распределение «горячих» СВЧ-полей, наведенных идентичными электронными сгустками, оказалось чрезвычайно неравномерным. Это, в свою очередь, привело к неравномерному торможению электронных сгустков в разных пролетных каналах.

2. Неравномерность «горячих» полей существенно определяется поперечными размерами КР МЛК и величиной связи с внешними устройствами.

3. Трехмерное моделирование процессов энергообмена в выходном КР многолучевого ВАС-клистрона с выходной импульсной мощностью 6 МВт показало, что усредненные относительные скорости электронов сгустка после торможения варьируются в диапазоне значений 0.2–0.6 в различных парциальных каналах.

4. На основе трехмерного моделирования движения электронных пучков показано, что различие фаз «горячего» поля СВЧ существенно влияет на эффективность взаимодействия и, следовательно, на КПД МЛК. Таким образом, к существенным физическим ограничениям эффективности МЛК следует отнести разброс фаз СВЧ-полей, возбуждаемых в зазорах разных пролетных каналов «сверхразмерного» КР.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Гузилову Игорю Анатольевичу и Герашенко Олегу Владимировичу за обстоятельное обсуждение материалов статьи и сделанные замечания, способствовавшие ее значительному улучшению.

Работа поддержана грантом Научной школы «Фундаментальные и прикладные исследования в области цифровых квантовых технологий, фотоники и микроэлектроники».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика. М.: Наука, 2003.
2. Канаевец В. И. и др. Мощные многорезонаторные клистроны с высоким КПД / Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1976. с. 34–44.
3. Baikov A. Yu., Marrelli C., Syratcev I. // IEEE Trans. Elec. Dev. 2015. **62**, № 10. P. 3406.
4. Constable D. A., Burt G., Baikov A. Y. et al. // High Efficiency Klystrons Using the COM Bunching Technique. Proceedings of IPAC2017. Copenhagen, Denmark, 2017.
5. Hill V., Marrelli C., Constable D., Lingwood C. // Particle-in-Cell Simulation of the Third Harmonic Cavity F-Tube Klystron. 17th International Vacuum Electronics Conference, Monterey, CA, USA, April 19–21, 2016.
6. Guzilov I. A. // L and S-band high-efficiency multi beam klystron development. ВАС-method of increasing efficiency. CLIC workshop, Geneva, CERN, 3–7 February, 2014.
7. Guzilov I. A. // ВАС method of increasing the efficiency in klystrons / 2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC), pp. 1–2, St. Petersburg, Russia, 30 June – 4 July, 2014.
8. Гузилов И. А., Масленников О. Ю. Патент RU2654537. Способ формирования сгустков высокой плотности энергии в электронном потоке и пролетный клистрон, 2017.
9. Егоров П. В., Гузилов И. А., Масленников О. Ю., Саввин В. Л. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 9.
10. Guzilov I., Egorov R., Maslennikov O. et al. // Commercial Prototype of High Efficiency S-band Pulsed ВАС MBK. Proceeding of 11th International Vacuum Electron Sources Conference, pp. 44–45, Seoul, Korea, October 18–20, 2016.
11. Егоров П. В., Гузилов И. А., Масленников О. Ю. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. № 7.
12. Guzilov I., Maslennikov O., Egorov R. et al. // Comparison of 6 MW S-band Pulsed ВАС MBK with the Existing SBKs. 18th International Vacuum Electronics Conference, pp. 68–69, London, April 24–26, 2017.
13. Егоров П. В., Гузилов И. А., Масленников О. Ю., Саввин В. Л. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. № 10.
14. Егоров П. В., Гузилов И. А., Масленников О. Ю., Саввин В. Л. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2019. № 1. С. 36. (Egorov R. V., Guzilov I. A., Maslennikov O. Yu.,

- Savvin V. L. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2019. **74**, N 1, P. 38.)
15. Фрейдович И. А., Воробьев М. Ю., Кокорев Н. А. // *Радиотехника и Электроника*, 1999. **44**, № 8. С. 1013.
  16. Boyd M. K. et al. // *IRE Trans.* 1962. **ED-9**, N 3. P. 297.
  17. Михеев Д. А., Коннов А. В., Саввин В. Л. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2016. **80**, № 2. С. 229.
  18. Yang He, Yajuan Sun, Ruili Zhang et al. // *Journal of Computational Physics.* 2016. **327**, May.
  19. Васильев Е. И., Канавец В. И., Лопухин В. М. // *Радиотехника и Электроника.* 1970. **6**. С. 1189.
  20. Битовец В. В., Васильев Е. И., Канавец В. И., Лопухин В. М. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 1970, № 6. С. 618.
  21. Tsarev V. A., Muchkaev V. Y. // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2019. **47**, № 1. P. 214.
  22. Konnov A. V., Malykhin A. V. Frequency-domain code Dev. 5.0 for analysis of coupled cavity traveling wave tubes, klystrons and their hybrids / IVEC 2005, Noordwijk, Netherlands, pp. 195–198.
  23. Malykhin A. V., Yakushkin E. P., Konnov A. V. Validation of klystrons development code — KLYS 4.5 / Proceedings of IV International Vacuum Electronics Conference IVEC 2003, Seoul, Korea, 2003.

## The Physical Limitations of the Efficiency of High Power Multibeam Klystrons

R. V. Egorov<sup>1,a</sup>, V. L. Savvin<sup>1</sup>, B. V. Prokofiev<sup>2,b</sup>, A. V. Konnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

<sup>2</sup>*R&P Corporation «Toriy». Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>mystUni@mail.ru, <sup>b</sup>bproktor@mail.ru.*

Three-dimensional modeling of the motion of a multibeam electron flow in high power multibeam klystrons for high values of the efficiency (70% and higher) is necessary. The value of the efficiency calculated earlier in terms of the one-dimensional and two-dimensional models only for one partial beam is higher than that experimentally measured, usually by 10–15% of the absolute value. An increase in the number of partial beams and a transversely developed configuration of ring cavities (an «oversized» cavity), as a rule, lead to an increase in the inhomogeneity of the microwave field distribution along the drift tubes of the ring cavity and generate a phase difference of microwave fields (phase incursions).

It is shown here that energy extraction even from identical electron bunches of a multibeam flow depends on the location of the partial drift tube relative to the energy output. The use of the BAC method of electron grouping can increase the efficiency of klystrons. The results of 3D modeling of the interaction of a multibeam electron flow in the output ring cavity of a BAC-klystron with an output pulse power of 6 MW have made it possible to estimate quantitatively the influence of the phase incursions of the waves. It has been shown that the phase difference of the microwave fields in the output cavity significantly reduces the interaction efficiency and, consequently, the efficiency of multibeam klystrons. Thus, the phase delay of the waves excited in different drift tubes of the gap of an «oversized» output ring cavity is one of the physical reasons for limitation of the efficiency of multibeam klystrons.

*Keywords:* multibeam electron flow, multibeam klystron, ring cavity, BAC-klystron.

PACS: 84.40.Fe.

*Received 27 April 2020.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2020. **75**, No. 5. Pp. 451–458.

### Сведения об авторах

1. Егоров Роман Владимирович — аспирант; e-mail: [mystUni@mail.ru](mailto:mystUni@mail.ru).
2. Саввин Владимир Леонидович — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: [vladimir.savvin@mail.ru](mailto:vladimir.savvin@mail.ru).
3. Прокофьев Борис Владимирович — доктор техн. наук, нач. лаборатории; e-mail: [bproktor@mail.ru](mailto:bproktor@mail.ru).
4. Коннов Александр Викторович — канд. физ.-мат. наук, нач. лаборатории; e-mail: [konnov.alexander@mail.ru](mailto:konnov.alexander@mail.ru).