

К-959

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ

На правах рукописи

КУЧЕРОВ
Геннадий Васильевич

**РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ
ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ЭЛТ И ИХ ОПТИМИЗАЦИЯ**

Специальность — 05.12.08 — электронная техника и приборы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
(Диссертация написана на русском языке)

ДУБНА — 1975

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ

На правах рукописи

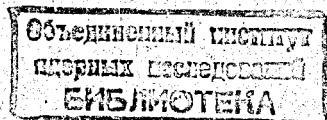
КУЧЕРОВ
Геннадия Васильевич

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ЭЛТ И ИХ ОПТИМИЗАЦИЯ

Специальность - 05.12.08 - электронная
техника и приборы

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Дубна
1975

Работа выполнялась в КБ Львовского ордена Трудового Красного Знамени завода кинескопов и в Институте физики высоких энергий (г. Серпухов).

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук

Б. А. УТОЧКИН

кандидат технических наук

В. В. ЦЫГАНЕНКО

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

С. Я. ЯВОР

кандидат технических наук

В. Н. ШКУНДЕНКОВ

Ведущее предприятие - указано в решении Ученого совета.

Автореферат разослан "22" ноября 1975 года.

Защита диссертации состоится "23" декабря 1975 года, в 15⁰⁰ часов на заседании Ученого совета Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ, г. Дубна, Московской области.

О диссертации можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

Т. П. Пузынина Т. П. ПУЗЫНИНА

Актуальность проблемы. Электроннолучевые приборы различного назначения (прецизионные электроннолучевые трубки (ЭЛТ) с высокой разрешающей способностью, кинескопы для цветного и черно-белого телевидения, осциллографические ЭЛТ, электронные растровые и просвечивающие микроскопы и др.) находят широкое применение во многих областях науки и техники, затрагивающих вопросы передачи, преобразования, хранения и воспроизведения информации. Возросшие требования к выходным параметрам этих приборов и появление быстродействующих электронно-вычислительных машин (ЭВМ) с большим объемом оперативной памяти выдвигают на повестку дня проблему создания эффективных методов и алгоритмов расчета и анализа отдельных элементов и прибора в целом, дающих возможность проводить конструирование приборов с заданными выходными характеристиками.

Цель работы. Исследование основных закономерностей влияния геометрических параметров и электрических режимов работы элементов электронно-оптических систем (систем формирования и фокусировки) на выходные параметры ЭЛТ и выработка на этой основе практических рекомендаций по конструированию ЭОС; разработка методики оптимального конструирования ЭОС, обеспечивающей заданные параметры изображения; разработка алгоритмов и комплекса программ анализа осесимметричных ЭОС применительно к ЭВМ "БЭСМ-6"; применение полученных результатов при разработке и оптимизации конкретных ЭЛТ.

Краткое содержание диссертации. Диссертация состоит из пяти глав, содержит 141 страницу, включая 47 рисунков, 9 таблиц, библиографии - 93 наименования.

В первой главе приведен краткий обзор литературы и дается общая постановка задачи. Краткий обзор литературы посвящен методам расчета электростатических полей, абберрационных, токовых и

электронно-оптических характеристик элементов ЭОС, а также вопросу оценки информационной способности ЭЛТ и проблеме выбора оптимальной конструкции диафрагмированной ЭОС. Показано, что:

- существующие методы и алгоритмы расчета электростатических полей не обеспечивают необходимую точность определения потенциала в прикатодной области системы формирования;

- известные методы определения абберационных характеристик, в большинстве своем, основанные на использовании осевого распределения потенциала и его производных не позволяют проводить количественный анализ систем формирования и фокусировки, применяемых в реальных ЭЛТ;

- перспективными являются методы расчета абберационных характеристик, основанные на траекторном анализе;

- известное выражение для распределения плотности тока, в произвольном сечении пучка определяется сложной интегральной зависимостью и реализуется лишь с применением ЭВМ;

- актуальной является проблема оптимального конструирования ЭОС, обеспечивающей получение заданного размера изображения при максимально возможном токе луча.

С учетом вышесказанного основными задачами представляемой диссертационной работы являются:

1. Усовершенствование метода интегральных уравнений для расчета осесимметричных электростатических полей с повышенной точностью.

2. Разработка метода и алгоритма расчета абберационных характеристик осесимметричных ЭОС, основанного на траекторном анализе.

3. Исследование свойств систем формирования триодного и тетродного типов, а также некоторых типов фокусирующих систем.

4. Разработка методики оптимального конструирования ЭОС с заданными параметрами изображения.

5. Разработка комплекса программ расчета и анализа токовых и электронно-оптических характеристик осесимметричных ЭОС применительно к ЭВМ "БЭСМ-6".

6. Применение разработанных методов и алгоритмов при расчете и конструировании ЭОС конкретных ЭЛТ.

7. Оптимизация оптической схемы узла ЭЛТ сканирующего автомата ИФВЭ.

В главе II показано, что необходимость вычисления электростатического поля с большой точностью обязана с преодолением специфических вычислительных трудностей, возникающих при расчете электронно-оптических характеристик ЭОС и одной из которых является, так называемая, "проблема старта" электронов. Эта проблема возникает из-за того, что на поверхности электродов (в том числе и на катоде) граничные условия удовлетворяются с определенной погрешностью, величина которой, в лучшем случае, соизмерима с диапазоном изменения начальных энергий термоэлектронов. В этом случае корректное интегрирование уравнений движения, содержащих в правых частях производные потенциала, проблематично, а полученные при этом результаты позволяют судить лишь об отгибании пучка, в то время как его внутренняя структура имеет зачастую неверный характер. Между тем, имеется возможность точного удовлетворения граничных условий на катоде с помощью известного принципа зеркального отображения. Применение этого принципа в представляемой работе позволило точно удовлетворить граничные условия на поверхности катода и вблизи его, а также повысить точность решения полевой задачи во всей области, причем повышение точности достигается путем незначительного усложнения алгоритма.

Эффективность изложенного подхода иллюстрируется на примере расчета системы формирования триодного типа.

Достигнутая высокая точность при решении полевой задачи позволила подойти к вопросу определения абберрационных характеристик непосредственно из расчета и анализа траекторий в реальных полях. Для фокусирующих систем такой подход был впервые обоснован в работе [1]. Однако, при анализе характеристик ЭОС метод, предложенный в указанной работе, не оправдывает себя из-за большого количества коэффициентов, подлежащих определению и затрудняющих исследование свойств ЭОС. Поэтому предлагается уравнение траектории в пространстве изображения ЭОС $r_e(z, h)$ с учетом коэффициентов разложения 3-го порядка представить в виде

$$r_e(z, h) = (z_r - z) f(h) [1 + D_1 f^2(h)] + D_2 f^3(h) \quad (1)$$

где $f(h) = \frac{h}{fM} \sqrt{\frac{V_1}{V_2}}$ - угол наклона параксиальной траектории электрона, вылетающего из катода на расстоянии h от оси, в пространстве изображения; f - фокусное расстояние системы формирования; M - увеличение фокусирующей линзы; V_1, V_2 - потенциалы в пространстве объекта и изображения соответственно; z_r - место положения плоскости гауссова изображения, определяемое из параксиальной траектории; D_1 - коэффициент сферической абберрации ЭОС; D_2 - коэффициент абберрации 3-го порядка, характеризующий отклонение угла наклона реальной траектории от своего параксиального значения. Уравнение траектории на выходе отдельных элементов ЭОС представляется в виде, аналогичном (1), через коэффициенты B_1, B_2 для системы формирования и C_1^1, C_1^2 для фокусирующей системы. Установлена связь между коэффициентами B_1, B_2, C_1^1, C_1^2 и коэффициентами разложения, предложенными в [1], причем

$$D_1 = B_2 M^4 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{3/2} + C_1^2$$
$$D_2 = B_2 M^2 \frac{V_2}{V_1} + C_1^1 - B_2 \frac{M^3}{f_1} \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

где f_1 - фокусное расстояние фокусирующей системы.

Полученное выражение (1) позволило проводить анализ и исследование характеристик осесимметричных ЭОС с учетом свойств как системы формирования, так и фокусирующей системы.

Среди электронно-оптических характеристик ЭОС наиболее важное место занимает распределение плотности тока в произвольном сечении пучка, выражение для которого получено в работе [2]. Это выражение описывается сложной интегральной зависимостью с рядом особенностей. В реферируемой работе разработан алгоритм численного решения этого выражения с помощью ЭВМ. Помимо этого, для диафрагмированной ЭОС получено (с использованием основных положений теоремы моментов) приближенное аналитическое выражение для распределения плотности тока в произвольном сечении пучка, которое в пространстве изображения ЭОС описывается следующим образом

$$j(z, r) = \frac{I_A}{4\pi \sigma^2(z)} \exp \left[- \left(\frac{r}{\sigma(z)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\sigma^2(z) = \sigma_0^2(z) + f^2(h_{эф}) \left\{ \frac{1}{2} (z_r - z)^2 + \frac{2}{3} (z_r - z) f^2(h_{эф}) [D_1 (z_r - z) + D_2] + \frac{1}{4} f^4(h_{эф}) [D_1 (z_r - z) + D_2]^2 \right\} \quad (4)$$

здесь $\sigma(z)$ - усредненный радиус пучка, определенный на уровне e^{-1} от максимальной плотности тока в пучке; I_A - ток луча; $h_{эф}$ - эффективный радиус рабочей поверхности катода; $\sigma_0(z)$ - радиус пучка термоэлектронов в плоскости Z , определенный на уровне e^{-1} от значения его максимальной интенсивности

$$\rho_0(z) = M f \frac{z_0 - z}{z_0 - z_r} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{V_1}} \quad (5)$$

где Z'_0 - положение плоскости "мнимого" изображения катода;

ϵ_0 - наиболее вероятная начальная энергия термоэлектронов.

Выражение (4) позволяет определить место положения плоскости Z_{opt} , в которой усредненный радиус пучка принимает минимальное значение

$$Z_{opt} = Z_r + \frac{2}{3} f^2(h_{эф}) D_3 \frac{1 + \frac{3}{2} f^2(h_{эф}) D_{31}}{1 + \frac{4}{3} f^2(h_{эф}) D_{31}} \quad (6)$$

$$\sigma^2(Z_{opt}) = \left[\frac{1}{8} f^3(h_{эф}) D_3 \right]^2 \left[9 - 8 \frac{[1 + \frac{3}{2} f^2(h_{эф}) D_{31}]^2}{1 + \frac{4}{3} f^2(h_{эф}) D_{31}} \right] + \beta_0^2(Z_{opt}) \quad (7)$$

Основным критерием качества изображения (информационной способности) ЭЛТ в настоящее время принято считать ее контрастно-частотную характеристику. В заключительной части второй главы изложен алгоритм расчета выходных характеристик ЭЛТ, основанный на применении КЧХ. В результате анализа КЧХ вблизи плоскости гауссова изображения диафрагмированной ЭОС при пренебрежении коэффициентами аберрации B_2 и B_3 , системы формирования, а также коэффициентом аберрации C_3^5 фокусирующей системы получены выражения для места положения плоскости оптимальной фокусировки Z_{opt} и размера изображения в ней r_{cs} .

$$Z_{opt} = Z_r + 0.6 C_3^5 f^2(h_{эф}) \quad (8)$$

$$r_{cs} = \sqrt{(Mr_0)^2 + \left[\frac{C_3^5}{2\pi} f^3(h_{эф}) \right]^2} \quad (9)$$

Выражения (8), (9) практически совпадают с аналогичными соотношениями (6), (7), что позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов и о целесообразности их использования в инженерной практике конструирования электроннолучевых приборов.

В главе III приведены результаты исследования электронно-оптических характеристик систем формирования триодного и тетродного типов в зависимости от геометрических и электрических параметров. Результаты численных расчетов характеристик представлены в виде графиков и таблиц. Анализ полученных результатов показал, что в триодных системах формирования размер объекта с изменением управляющего напряжения достигает минимума, а затем возрастает. Такой характер изменения размера объекта подтверждается результатами экспериментальных исследований, приведенными в работе [3]. Следует отметить, что при постоянном значении геометрического параметра $\frac{d_1+h}{R}$ (d_1 - расстояние катод-модулятор; h, R - толщина и радиус отверстия модулятора соответственно) размер объекта уменьшается с увеличением расстояния модулятор-анод d_2 и соответственно изменяется зависимость размера объекта от управляющего напряжения. Исследована зависимость параметра $\bar{\beta}$ ($\bar{\beta} = I_0 / (I_0 \alpha_0^2)$, где $\alpha_0 = h_{эф} / f$ - угол расхождения пучка на выходе диафрагмированной системы формирования) от управляющего напряжения и геометрических размеров триодных и тетродных систем формирования. Для триодных систем формирования при больших значениях $(d_1+h)/R$ и d_2/R , что присуще высокопотенциальным системам, зависимость $\bar{\beta}$ от управляющего напряжения имеет аномальный характер. Этот объясняется аномальный характер зависимости тока луча от управляющего напряжения для высокопотенциальных ЭОС с диафрагмированием пучка. Для низкопотенциальных триодных систем формирования ($V_1 \leq 3$ кВ) и для тетродных систем формирования (как низко-, так и высокопотенциальных) такой аномалии не наблюдается, причем параметр $\bar{\beta}$ для этих систем возрастает как с увеличением управляющего напряжения, так и с ростом V_1 . Показано, что одновременно

с ростом \sqrt{V} происходит увеличение размера объекта, причем эта зависимость носит однозначный характер и присуща как триодным, так и тетродным системам формирования. Иными словами, увеличение тока луча за счет изменения геометрии и режимов работы систем формирования неизбежно приводит к увеличению размера объекта. Показано, что для обеспечения малого размера объекта при фиксированном V_1 целесообразно использовать триодную систему формирования, хотя при этом величина тока луча меньше, чем в тетродной системе.

Приведены результаты исследования характеристик бипотенциальной фокусирующей системы с резистивной спиралью между электродами.

Проведен сравнительный анализ двух прецизионных ЭЛТ, в первой из которых используется высокопотенциальная система формирования совместно с магнитной бронированной линзой, а во второй применена низкопотенциальная система формирования в совокупности с бипотенциальной фокусирующей системой с резистивной спиралью между электродами. Приведенные результаты демонстрируют перспективность ЭЛТ с низкопотенциальной системой формирования и фокусирующей системой, выполненной в виде резистивного покрытия на внутренней поверхности горловины трубки. Применение такой ЭЛТ в сканирующем автомате уменьшает требования к источникам питания и узлам управления трубкой, что приводит к упрощению конструкции и увеличению надежности его работы.

Проведен анализ систем формирования тетродного типа и двух конструктивных схем одиночных электростатических линз, применяемых в кинескопах черно-белого и цветного телевидения. Показано, что при расчете характеристик элементов телевизионных ЭЛТ необходимо учитывать коэффициенты абберации B_3 и B_{31} для системы формирования,

а также коэффициент абберации C_{31}^s для фокусирующей системы, т.к. пренебрежение этими коэффициентами для указанных ЭЛТ приводит к ошибкам, которые соизмеримы с величиной определяемых параметров. Применение результатов численного анализа систем формирования и фокусировки при разработке ЭОС показано на примере усовершенствований конструкции ЭОС для крупногабаритных черно-белых кинескопов 50ЛК1Б, 61ЛК1Б, 67ЛК1Б. Результаты анализа применены также при разработке ЭОС малогабаритного цветного кинескопа 25ЛК1Ц и малогабаритного черно-белого кинескопа 16ЛК3Б, предназначенного для работы в условиях повышенной освещенности. Приведены конструктивные схемы разработанных ЭОС.

В главе IV получено уравнение оптимизации диафрагмированной ЭОС, т.е. условие формирования электронного пучка с заданным размером изображения на экране ЭЛТ при максимально возможном токе луча для заданной системы формирования. В общем случае это уравнение имеет вид

$$M_0 r_1^2 + \frac{\partial C_3}{\partial M} [r_2^2 - (M_0 r_1)^2] = 0 \quad (10)$$

здесь r_1 и r_2 - размер объекта и изображения соответственно; C_3 - коэффициент сферической абберации фокусирующей системы ($C_3 = C_3^s (V_1/V_2)^{3/2} / M_0^3$); M_0 - увеличение линзы, при котором выполняется условие оптимизации. Максимальная апертура пучка α_0 на входе в фокусирующую систему, при которой обеспечивается достижение заданного r_2 , определяется выражением

$$\alpha_0 = \left(\frac{29r_2}{C_3} \right)^{1/3} [r_2^2 - (M_0 r_1)^2]^{1/6} \quad (11)$$

Для решения уравнения (10) необходимо знать зависимость коэффициента C_3 от M для конкретно используемой фокусирующей системы. В связи с тем, что в электроннолучевых приборах различных

типов (в том числе и в прецизионных ЭЛТ с высокой разрешающей способностью) широко используется магнитная бронированная линза, для которой известна аналитическая зависимость коэффициента C_3 от M [4], в данной главе получено уравнение оптимизации для этого частного случая

$$M_0^2 [2(1+M_0)^2 \frac{S}{\ell} q(x) + 3M_0^2 + M_0] - \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 [(1+M_0)^2 \frac{S}{\ell} q(x) + 2M_0^2] = 0 \quad (12)$$

здесь ℓ - расстояние от объекта до изображения; S - ширина немагнитного зазора линзы; $q(x) = 0.26x - 0.25$; $x = D/S$; D - диаметр канала линзы.

Результаты расчетов M_0 и α_0 в зависимости от r_2/r_1 в широком диапазоне изменения геометрических параметров линзы $S, \ell, q(x)$ приведены в виде графиков и таблиц.

Рассмотрен вопрос достижения требуемого тока луча при заданном размере изображения r_2 путем изменения геометрии системы формирования и ее электрического режима работы. На основании анализа численных результатов исследования показано, что значительного увеличения тока луча можно достичь в случае применения систем формирования, создающих на входе в линзу квазипараллельный пучок. Однако, применение таких систем формирования влечет за собой необходимость достижения малых значений увеличения линзы (для сохранения размера изображения) и приводит к увеличению угла схождения пучка у экрана. Это существенно ограничивает сферу применения таких систем в приборах, где требуется обеспечение равномерной разрешающей способности по рабочему полю экрана.

При использовании конкретной ЭЛТ с магнитной фокусирующей системой в различного рода аппаратуре конструктивные параметры трубки заданы и не подлежат изменению в процессе эксплуатации.

В этих условиях оптимизация оптической схемы ЭЛТ с точки зрения достижения минимального размера изображения $r_{2\text{онт}}$ связана с выбором оптимального места положения магнитной фокусирующей системы при фиксированных параметрах r_1, α_0, ℓ . Получено уравнение оптимизации для этого случая

$$r_1^2 - C_3^2 \left(\frac{\alpha_0^3}{2\pi}\right) \frac{(M_0+1)^2 \frac{S}{\ell} q(x) + 2M_0^2}{M_0^2 (M_0+1) [(M_0+1)^2 \frac{S}{\ell} q(x) + M_0]} = 0 \quad (13)$$

Приведены результаты численного исследования величин M_0 и $r_{2\text{онт}}$ для магнитных бронированных линз с параметрами $D = 40$ мм; $S = 8$ мм и $S = 16$ мм при разных значениях параметров ℓ, r_1, α_0 .

Проведена экспериментальная проверка уравнения (13) с помощью специально изготовленного макета ЭЛТ с триодной системой формирования, которую можно было перемещать внутри оболочки. Расхождение результатов расчета и эксперимента не превышает 10%, что доказывает справедливость полученного уравнения оптимизации.

Полученные в данной главе результаты использованы для оптической схемы прецизионной ЭЛТ сканирующего автомата ИФВЗ, что привело к существенному улучшению качества фокусировки по всему полю экрана ЭЛТ.

В главе У описан разработанный автором комплекс программ, обеспечивающий расчет электростатического поля, траекторий, токовых и электронно-оптических характеристик осесимметричных систем формирования, фокусировки и ЭОС в целом. Алгоритм, положенный в основу комплекса, описан в главе 2. В качестве входного языка комплекса выбран алгоритмический язык ФОРТРАН-ОИЯИ. Комплекс разработан и отлажен для ЭВМ "БЭСМ-6", использующей в качестве операционной системы мониторинг систему "Дубна" и диспетчер типа АД71 - АД73.

Дана структура и блок-схемы рассматриваемого комплекса, приведено описание его работы. Дана подробная инструкция по заданию исходной информации,

В процессе работы комплекса на АЦПУ выдаются результаты расчета токовых, электронно-оптических и выходных характеристик систем формирования, фокусировки и ЗОС в целом.

Основные результаты и выводы работы

1. Усовершенствован алгоритм расчета осесимметричных электростатических полей, основанный на применении метода интегральных уравнений.

2. Разработан метод и алгоритм расчета абберрационных характеристик систем формирования, фокусировки и ЗОС, основанный на траекторном анализе.

3. Разработан алгоритм оценки качества изображения ЭЛТ и ее отдельных элементов, основанный на применении КЧХ.

4. Разработанные алгоритмы реализованы в виде комплекса программ анализа осесимметричных ЗОС для ЭВМ "БЭСМ-6", который позволяет проводить расчет токовых и электронно-оптических характеристик ЗОС и ее элементов.

5. С помощью разработанного комплекса программ проведен численный анализ характеристик СФ триодного и тетродного типов в зависимости от их геометрических параметров и электрических режимов работы. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными зависимостями и показали хорошее совпадение.

6. Исследованы свойства бипотенциальной фокусирующей системы с резистивной спиралью между электродами и двух конструктивных схем одиночных электростатических линз.

7. Показана перспективность использования в прецизионных ЭЛТ для сканирующих автоматов ЗОС с низкопотенциальной СФ и фокусирующей системой, выполненной в виде резистивного вакуумного покрытия на внутренней поверхности горловины трубки.

8. Получено уравнение оптимизации ЗОС, позволяющее проводить анализ и выбор конструкции ЭЛТ, обеспечивающих формирование на экране электронного изображения заданного размера при максимально возможном токе луча.

9. Получено аналитическое выражение уравнения оптимизации для частного случая применения в ЭЛТ фокусирующей системы типа магнитной бронированной линзы. Проведена экспериментальная проверка этого уравнения на макете ЭЛТ с подвижной СФ. Результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем согласии.

10. Даны рекомендации по оптимизации оптической схемы прецизионной ЭЛТ сканирующего автомата ИФВЗ.

11. Разработанные методы и алгоритмы применены при создании ЗОС:

- крупногабаритных кинескопов 50-67 ЛК1Б;
- малогабаритного цветного кинескопа 25ЛК1Ц;
- малогабаритного черно-белого кинескопа 16ЛК3Б.

Результаты работы докладывались на IV и V Всесоюзных конференциях по электроннолучевым и фотоэлектрическим приборам (Ленинград, 1971 г. и Паневежис, 1973 г.); II и III Украинских республиканских конференциях по электронной оптике и ее применениям (Харьков, 1971 г. и 1974 г.); I и II отраслевых семинарах по машинному проектированию узлов электроннолучевых приборов (Львов, 1971 г. и 1972 г.); V Всесоюзном семинаре по методам расчета электронно-оптических систем (Москва, 1974 г.).

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Коифман Д.И., Кучеров Г.В., Цыганенко В.В. Исследование фокусирующих свойств осесимметричных электростатических систем. Труды II Украинской Республиканской конференции по электронной оптике и ее применениям, Харьков, 1971, стр.129.
2. Бобровский И.А., Коифман Д.И., Кучеров Г.В., Лачавили Р.А., Рабин Б.М., Цыганенко В.В. Исследование ЗОС, формирующих электронные пучки с малым сечением. Труды II Украинской Республиканской конференции по электронной оптике и ее применениям, Харьков, стр.131, 1971.
3. Цыганенко В.В., Кучеров Г.В. Оценка качества аксиально-симметричных фокусирующих систем. Радиотехника и электроника, т.ХУШ, № 5, стр.1085, 1973.
4. Кучеров Г.В., Уточкин Б.А., Цыганенко В.В. Применение метода контрастно-частотных характеристик к анализу электроннолучевых трубок. Радиотехника и электроника, т.ХІХ, № 2, стр.458, 1974г.
5. Кучеров Г.В., Лачавили Р.А., Рабин Б.М., Уточкин Б.А., Цыганенко В.В. О выборе оптимального режима работы прецизионной ЭЛТ. Препринт ИФВЭ, СПК 74-17, Серпухов, 1974.
6. Кучеров Г.В., Цыганенко В.В. Алгоритм расчета оптических характеристик ЗОС. Труды III Украинской Республиканской конференции по электронной оптике и ее применениям, Харьков, стр.34, 1974.
7. Кучеров Г.В., Лачавили Р.А., Цыганенко В.В. Использование симметрии и антисимметрии при расчете ЗОС. Труды III Украинской Республиканской конференции по электронной оптике и ее применениям, Харьков, стр.84, 1974.
8. Кучеров Г.В., Лачавили Р.А., Цыганенко В.В. Применение зеркального отображения к расчету катодных линз. Тезисы докладов V Всесоюзного семинара по методам расчета ЗОС, Москва, стр.94, 1974.

9. Антиповская А.А., Коифман Д.И., Кучеров Г.В., Лачавили Р.А., Цыганенко В.В. Расчет осесимметричных электростатических полей численными методами на ЭВМ "БЭСМ-6". Тезисы докладов V Всесоюзного семинара по методам расчета ЗОС, Москва, стр.113, 1974.

Литература

1. Verster J. L. *Phil. Res. Rept.*, v.18, № 6, p.465, 1963.
2. Уточкин Б.А., Цыганенко В.В. Препринт ИФВЭ, СПК 73-33, Серпухов, 1973.
3. Moss H. *Narrow Angle Electron Guns and Cathode Ray Tubes*, Academic Press, New-York, 1968.
4. Дер-Шварц Г.В. Радиотехника и электроника, т.ХVI, № 7, стр.1305, 1971.