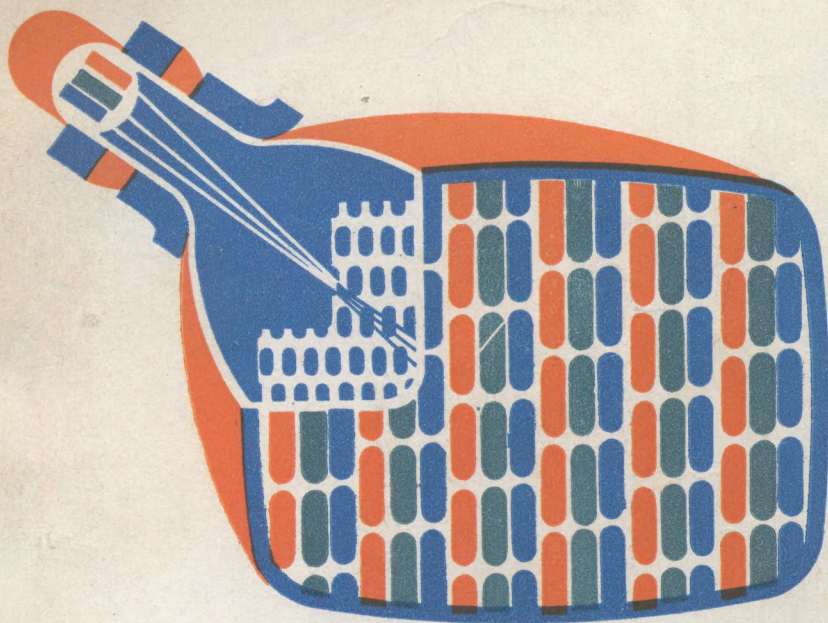


А.П. Ангафоров

ЦВЕТНЫЕ КИНЕСКОПЫ

А.П. Ангафоров

# ЦВЕТНЫЕ КИНЕСКОПЫ



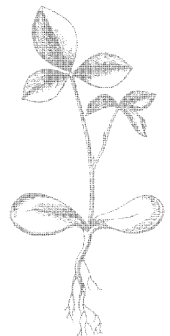
«РАДИО И СВЯЗЬ»

А.П. Ангафоров

# ЦВЕТНЫЕ КИНЕСКОПЫ



МОСКВА  
«РАДИО И СВЯЗЬ»  
1986



Scan AAW

ББК 32.851.1  
А 64  
УДК 621.385.832.2

**Ангафоров А. П.**

А 64 Цветные кинескопы. — М.: Радио и связь, 1986. — 128 с., ил.

Рассмотрены основные принципы проектирования и разработки электронно-лучевых трубок для цветного телевидения. Особое внимание уделено кинескопам с линейным расположением прожекторов и самосведением лучей, системам отклонения лучей. Даются теория и методы расчета корректирующей линзы, применяемой при нанесении люминофоров, алгоритмы и программы для проектирования и расчета на ЭВМ.

Для инженерно-технического персонала, занимающегося проектированием, разработкой и изготовлением электронно-лучевых приборов.

А 2402020000-039  
046(01)-86

ББК 32.851.1

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. В. Новаковский

**Редакция литературы по радиотехнике**

Производственно-техническое издание

АНДРЕЙ ПЕТРОВИЧ АНГАФОРОВ

**ЦВЕТНЫЕ КИНЕСКОПЫ**

Заведующий редакцией В. Л. Стерлигов

Редактор А. Т. Романовский

Художественный редактор Т. В. Бусарова

Обложка художника В. В. Третьякова

Технический редактор И. Л. Ткаченко

Корректор Г. Г. Казакова

**ИБ № 1044**

Сдано в набор 17.07.85

Подписано в печать 02.11.85

Т-20282

Формат 60×90/16

Бумага типогр. № 3

Гарнитура литературная

Печать высокая Усл. печ. л. 8,0

Усл. кр.-отт. 8,375

Уч.-изд. л. 8,75

Тираж 33 000 экз.

Изд. № 20873

Зак. № 88

Цена 45 к.

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Московская типография № 5 ВГО «Союзучетиздат»

101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

© Издательство «Радио и связь», 1986

Цветные кинескопы продолжают оставаться наиболее сложными и дорогостоящими изделиями, выпускаемыми электронной промышленностью для массового потребления. Дальнейшее развитие цветного телевидения в нашей стране зависит от того, насколько успешно будут решены проблемы, связанные с повышением качества и снижением стоимости цветных кинескопов.

На фоне бурного прогресса современной электроники медлительность эволюции цветных кинескопов особенно заметна. Со времени издания в 1971 г. первой книги [1] в этой области не было крупных открытий. Наиболее заметным достижением можно считать появление новой разновидности трехлучевых кинескопов, где используются щелевая маска, штриховой экран и линейное расположение электронных прожекторов. Этот тип кинескопа стал вытеснять кинескопы с точечным экраном и треугольным расположением прожекторов, которые долгое время преобладали как в нашей стране, так и за рубежом. К ним относится используемый до сих пор в стационарных приемниках кинескоп 61ЛК3Ц, сравнительно неплохо освоенный в массовом производстве. Появились публикации, посвященные вопросам технологии [2, 3] и конструирования [4] кинескопов этого типа. Кинескопы со щелевой маской освещены мало, в основном в популярной литературе [5].

В настоящее время стало очевидным, что для значительного совершенствования цветных кинескопов недостаточно только улучшения существующей технологии. Необходимы широкие научные исследования, обеспечивающие прочный фундамент для проектирования и разработки разных типов цветных кинескопов.

Настоящая книга посвящена наиболее важным из поставленных ранее задач [1, с. 220], связанных с теоретическими основами проектирования и разработки цветных кинескопов, а именно: особенностям воспроизведения изображений на трехцветных дискретных экранах точечного или штрихового типа; вопросам отклонения и сведения электронных лучей; расчету корректирующих линз для нанесения экранов.

Эта проблематика определила расположение материала по главам, первая глава является обзорной и содержит сведения о кинескопах на основе публикаций, изданных после 1971 г.

Создание научной основы проектирования и разработки цветных кинескопов является делом новым и нелегким. Проектирование и разработка кинескопов тесно взаимосвязаны — проектирование (выполняемое «на бумаге» и на ЭВМ) дополняется разработкой макетов приборов, что позволяет провести эксперименты для уточнения исходных данных проектирования. Этот цикл может повторяться несколько раз. Многое зависит, как всегда, от опыта и интуиции. Новизна проблематики привела к тому, что в книге представлены скорее первые попытки, чем окончательные решения.

Отзывы о книге просим направлять в издательство «Радио и связь» (101000, Москва, Почтамт, а/я 693).

Начало регулярного вещания цветных телевизионных программ, связанное со знаменательной датой — 50-летием Великой Октябрьской социалистической революции, выдвинуло ряд новых проблем перед отечественной наукой и техникой. Одной из основных является проблема разработки и массового выпуска цветных кинескопов, обеспечивающих достаточно высокое качество изображения при сравнительно умеренной стоимости приемных устройств. Эта задача еще более актуальна и в настоящее время, когда почти все программы центрального телевидения стали цветными.

На начальном этапе освоения цветного телевидения (ЦТ) в нашей стране и за рубежом основные усилия при разработке цветных кинескопов были направлены на решение технологических вопросов, так как необходимо было в короткие сроки создать начальный парк приемников. Возникающие при этом трудности, требующие обстоятельных исследований, приходилось решать эмпирически, что далеко не всегда приводило к желаемым результатам. Например, при разработке и изготовлении кинескопов типа 61ЛК3Ц для нанесения экрана использовались упрощенные корректирующие линзы плоско-вогнутого типа, что снижало допуск по чистоте цвета и поэтому повышало возможность брака. Последнее обстоятельство приводило к тому, что кинескопы этого типа отличались высокой стоимостью и сложностью в эксплуатации. Все это заметно тормозило развитие ЦТ. В связи с ростом покупательной способности в нашей стране спрос на цветные телевизоры в последние годы стал заметно возрастать, что требует разработки и выпуска новых цветных кинескопов разных типов и размеров.

Вопросы теории, необходимые для проектирования и разработки цветных кинескопов, в отечественной и зарубежной литературе освещены мало. Большинство публикаций носит популярный описательный характер или посвящено узким технологическим вопросам. Все это еще больше затрудняет создание теоретической базы для освоения новых типов кинескопов, хотя современный уровень развития вычислительной техники позволяет решать многие задачи, ранее казавшиеся трудноразрешимыми. Во многих капиталистических странах пошли по пути приобретения лицензий и патентов, а также закупки оборудования для производства кинескопов и приемников ЦТ в США и Японии.

Для отечественной науки и техники характерны традиции глубокой связи теории и практики. В электронной промышленности примером может служить опыт создания некоторых приборов СВЧ,

где значительные успехи были достигнуты благодаря фундаментальным научным исследованиям в этой области. Не должны быть исключением и цветные кинескопы, хотя здесь многие трудности не только связаны с реализацией принципа действия этих приборов, но и как бы умножаются из-за необходимости изготавливать цветные кинескопы миллионными партиями с низким уровнем брака. Положительный опыт производства кинескопов типа 61ЛК3Ц позволяет надеяться, что в ближайшем будущем в нашей стране можно ожидать массового перехода на цветное телевидение.

Вместе с тем нет оснований опасаться вытеснения кинескопов другими типами цветных воспроизводящих устройств, например панельными устройствами [6]. Хотя потребность в новых типах воспроизводящих цветных устройств давно назрела, ощутимые успехи в этой области пока не наблюдаются. Для массового применения цветные кинескопы будут еще долго оставаться основными воспроизводящими устройствами — вероятно, до конца столетия.

Важным направлением является создание цветных кинескопов с повышенной четкостью (1000 ... 2000 линий), которые могут использоваться в системах:

- отображения информации, связанных с ЭВМ и вычислительно-информационными комплексами;

- цветного телевидения с повышенным стандартом четкости; прикладного телевидения.

Цветной кинескоп, являясь по устройству электронно-лучевым прибором, по своему назначению прибор оптический, создающий цветное изображение. Поэтому в современных курсах прикладной оптики телевизионные приборы и системы все чаще рассматриваются вместе с классическими оптическими [7].

Основные трудности, связанные с разработкой цветных кинескопов, определяются прежде всего трудностями, связанными с вопросами оптическими.

Таковыми являются вопросы:

- физиологическая оптика цветного зрения, прежде всего, мало изученные закономерности пространственного смешения цветов;

- оптика дискретных систем, связанная со структурными особенностями трехцветных экранов кинескопов;

- электронная оптика, которую все чаще рассматривают, как обобщение закономерностей геометрической оптики [8];

- теория расчета асимметричных корректирующих оптических систем, используемых при нанесении экранов цветных кинескопов всех типов.

Перечисленные вопросы рассматриваются в соответствующих главах данной книги.

# ГЛАВА 1

## СОВРЕМЕННЫЕ ЦВЕТНЫЕ КИНЕСКОПЫ

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЦВЕТНЫМ КИНЕСКОПАМ

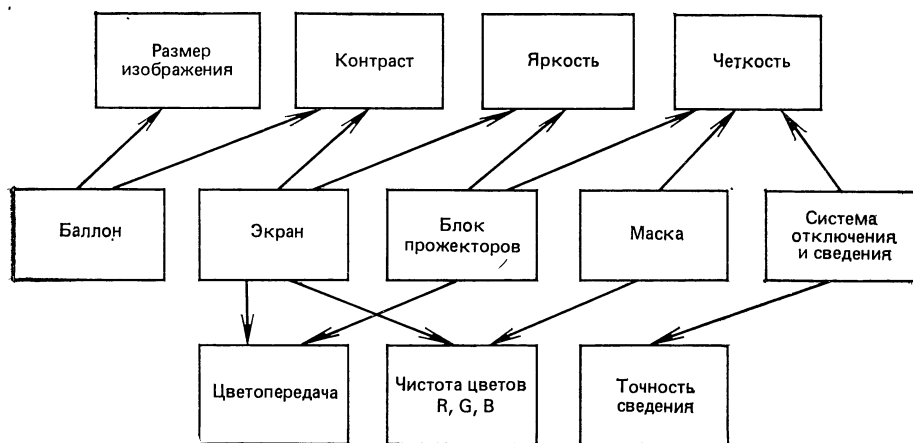
Кинескоп является оконечным устройством, определяющим качество воспроизводимого изображения, и, следовательно, всей телевизионной системы. Поэтому параметры телевизионной системы и кинескопа должны быть хорошо согласованы.

В черно-белом телевидении (ЧБТ) такое согласование достигнуто. Кинескоп является достаточно качественным (может быть и самым лучшим) звеном системы и его параметры хорошо соответствуют параметрам других звеньев. В табл. 1.1 приводятся данные отечественных кинескопов ЧБТ [9]. Весьма важно, что один из основных параметров — разрешающая способность — здесь не хуже (а практически даже лучше), чем у других звеньев системы ЧБТ. Значения яркости и контраста также можно считать достаточно хорошими.

Иначе обстоит дело в цветном телевидении (ЦТ). Здесь кинескоп пока является самым слабым звеном всей системы. С точки зрения условий совместимости систем ЦТ и ЧБТ параметры цветных кинескопов должны быть не хуже соответствующих параметров черно-белых кинескопов. К сожалению, на самом деле параметры кинескопов ЧБТ пока остаются еще не достигнутым идеалом для кинескопов. ЦТ. Прежде всего, это относится к разреша-

Таблица 1.1. Кинескопы для приемников черно-белого телевидения

Тип кинескопа	Угол отклонения, град	Размер раstra, мм	Длина, мм	Диаметр горловины, мм	Масса, кг	Напряжение анода, кВ	Яркость, кд/м <sup>2</sup>	Контраст	Разрешающая способность в центре, линий	Разрешающая способность по углам, линий
67ЛК1Б	110	535×402	389	28,6	19,0	20	150	150	600	550
61ЛК1Б	110	481×375	362	28,6	14,5	18	150	150	600	550
50ЛК1Б	110	394×308	320	28,6	9,0	16	110	140	600	550
40ЛКЗБ	90	320×250	345	28,6	6,5	12	100	100	600	550
31ЛКЗБ	110	257×196	233	20,5	2,8	11	150	150	600	550
23ЛК1ЗБ	90	183×140	200	20,5	1,2	11	225	150	600	600
16ЛК1Б	70	120×98	190	13,0	0,5	9	100	100	600	550
11ЛК1Б	55	84×67	175	13,0	0,3	9	260	150	550	450



**Рис. 1.1.** Связь параметров качества изображения с основными узлами масочного цветного кинескопа

ющей способности, яркости и равномерности цвета. Получается, что обладатель цветного телевизора при приеме программ ЧБТ имеет ухудшенный вариант изображения по сравнению с черно-белым телевизором. Это особенно досадно, если сравнить стоимость кинескопов и приемников ЦТ и ЧБТ.

На рис. 1.1 показаны основные параметры, определяющие качество воспроизводимого цветного изображения, а также связь этих параметров с основными узлами цветного кинескопа масочного типа.

Параметры делят на две группы. К первой группе (верхний ряд) относят параметры, известные из практики ЧБТ,—размер изображения, яркость, контраст, четкость. Ко второй группе (нижний ряд) относят параметры, характерные только для цветных кинескопов,—точность сведения электронных лучей, чистота основных цветов, цветопередача. Рассмотрим все эти параметры подробнее.

**Размер изображения.** Размер изображения определяется размерами экранного стекла кинескопа. В СССР принято обозначать кинескопы ЧБТ и ЦТ так, что первые две цифры, стоящие перед буквами ЛК (лучевой кинескоп), соответствуют размеру диагонали экранного стекла в сантиметрах (округленно). После букв ЛК идет цифра (условный номер разработки), в конце стоит буква Б (для кинескопов ЧБТ) или Ц (для кинескопов ЦТ). Аналогичные обозначения приняты и в других странах. В таблицах данных кинескопов диагональ экрана не указывается, а приводятся размеры раstra (ширина и высота).

Для отечественных цветных кинескопов установлен типовой ряд размеров диагонали экрана 67, 61, 59, 51, 40, 32, 25 и 16 см. Многолетняя практика показала, что для стационарных телевизоров

наиболее популярны кинескопы с диагональю экрана 61 и 51 см, а для переносных телевизоров — 32 и 25 см. Промежуточное положение занимают кинескопы с диагональю экрана 40 см. Для дорогих телевизоров высшего класса предназначены кинескопы с диагональю экрана 67 см и углом отклонения лучей  $110^\circ$  (во всех остальных угол отклонения обычно  $90^\circ$  и менее). Размер изображения связан с массой кинескопа, а также с яркостью экрана и напряжением анода.

**Яркость.** Яркость в масочных кинескопах долгое время была недостаточной, поэтому интенсивно велись работы по увеличению яркости цветных люминофоров. К 1970 г. удалось увеличить среднюю светоотдачу экранов (на белом поле) до 5...10 кд/Вт. С 1970 г. стали применять матричные экраны, где промежутки между точечными элементами заполнялись темным веществом. Это позволило без заметного ущерба для контраста увеличить прозрачность экранного стекла от 0,45...0,65 до 0,85, т. е. увеличить яркость еще в 1,5 раза.

Для оценки яркости белого поля на экране масочного кинескопа удобно пользоваться формулой

$$L = 10 T_m T_c U_a I_0 \eta / S, \quad (1.1)$$

где  $L$  — яркость, кд/м<sup>2</sup>;  $T_m$  — прозрачность маски;  $T_c$  — прозрачность экранного стекла;  $U_a$  — потенциал экрана (напряжение анода), кВ;  $I_0$  — общий ток трех электронных лучей, мА;  $S$  — площадь раstra, см<sup>2</sup>;  $\eta$  — средняя светоотдача экрана, кд/Вт. Например, для кинескопа 61ЛКЗЦ имеем:  $T_m=0,20$ ;  $T_c=0,65$ ;  $U_a=25$  кВ;  $I_0=1$  мА;  $\eta=6$  кд/Вт;  $S=1700$  см<sup>2</sup>. Для кинескопа 61ЛКЗЦ яркость  $L=115$  кд/м<sup>2</sup>.

Хотя яркость современных масочных кинескопов близка к яркости кинескопов ЧБТ, следует учитывать, что это достигается повышением потенциала экрана до уровня, при котором возникает опасность рентгеновского излучения, а также за счет форсирования тока электронных лучей до величин, затрудняющих фокусировку.

**Контраст.** Зная значения яркости на самых светлых ( $L_{\max}$ ) и самых темных ( $L_{\min}$ ) деталях изображения, находят абсолютный  $K_a$  и относительный контраст  $K_0$ :

$$K_a = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}; \quad K_0 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}. \quad (1.2)$$

Однако определение контраста затруднительно из-за неточности измерения минимального уровня яркости  $L_{\min}$ . Практически изображение наблюдается при некотором уровне яркости фона  $L_\phi$ , создаваемом внешним источником засветки с яркостью  $L_s$  за счет отражения от внутренней поверхности экрана кинескопа. Тогда яркость фона

$$L_\phi = L_s \rho_s T_c^2, \quad (1.3)$$

где  $T_c$  — прозрачность экранного стекла;  $\rho_s$  — коэффициент отра-

жения экрана;  $T_s$  — коэффициент заполнения экрана (последний для обычных экранов примерно равен 1,0, а для матричных — 0,7, так как площадь темных промежутков обычно составляет около 30% площади экрана).

С учетом фона величина контраста

$$K_\Phi = \frac{L_{\max} + L_\Phi}{L_{\min} + L_\Phi}. \quad (1.4)$$

На рис. 1.2 сравниваются яркость и контраст для массовых кинескопов с обычным и матричным экраном. При этом яркость люминофоров экрана (без учета прозрачности стекла) принимается равной 100 условным единицам; коэффициент отражения экрана  $\rho_s = 0,8$ ; яркость темных участков  $L_{\min} = 0$ . Полагая для обычного экрана прозрачность стекла  $T_c = 0,42$  и коэффициент заполнения  $T_s = 1$ , получаем  $L_{\max} = 42$ ;  $T_\Phi = 2,8$ ;  $K_\Phi = 16$ . Для матричного экрана ( $T_c = 0,85$ ;  $T_s = 0,7$ ) получаем  $L_{\max} = 85$ ;  $L_\Phi = 8,1$ ;  $K_\Phi = 11,5$ . Видно, что за счет небольшого (на 30%) уменьшения контраста матричный экран позволяет удвоить яркость на светлых участках изображения [4].

Методика измерения контраста кинескопов еще требует дальнейшей доработки. Учитывая неточность измерения  $L_{\min}$  в темноте, целесообразно определять реальный контраст при эталонной засветке, близкой к обычным условиям наблюдения телевизионных изображений [10].

**Четкость.** Обычно под четкостью понимается разрешающая способность при воспроизведении испытательных таблиц разного типа, четкость связана также с контрастом мелких деталей и резкостью границ деталей изображения. Для кинескопов ЦТ это понятие усложняется из-за структурных особенностей экранов, что

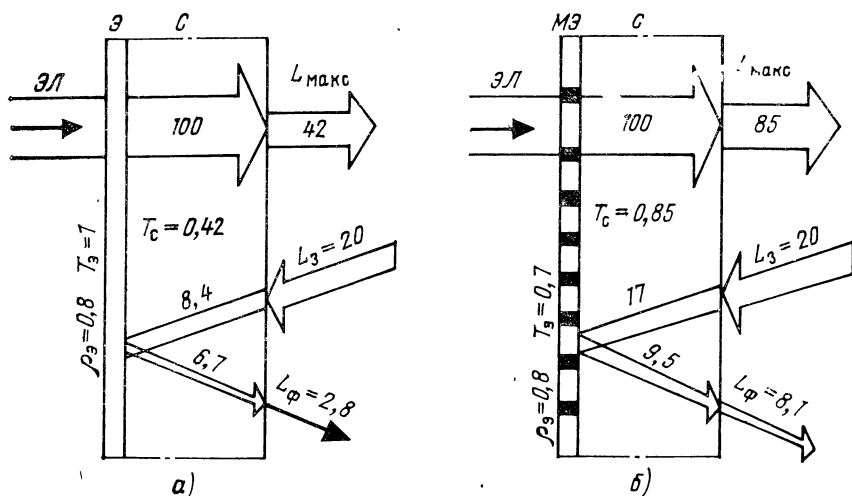


Рис. 1.2. Сравнение яркости и контраста для обычного (а) матричного (б) экранов

будет рассмотрено ниже. Существующая методика измерения четкости для кинескопов ЦТ основана на использовании испытательной таблицы ИТ-72, во многом аналогичной таблице 0249. Для различных цветов и различных участков экрана нормы разрешающей способности разные. Для трех основных цветов — красного R, зеленого G и синего В — в центре экрана требуется разрешение 550 ... 600 линий, а на угловых участках — 450 ... 500 линий. Для белого цвета в центре экрана требуется также разрешение 550 ... 600 линий, в остальных зонах экрана нормы отсутствуют и заменяются нормами на точность сведения трех электронных лучей.

**Точность сведения электронных лучей.** Точность сведения лучей в трехлучевых кинескопах проверяется обычно по сетчатому полю в виде тонких белых горизонтальных и вертикальных линий на темном фоне.

На рис. 1.3 показаны нормы для кинескопа 61ЛК3Ц. Ошибка сведения определяется максимальным расстоянием между центрами соседних следов лучей на экране. В зонах А (центральной), Б (промежуточной) и В (краевой) ошибка сведения не должна превышать соответственно 0,8; 1,8; 2,5 мм. В пересчете на шаг раstra  $h = H/575$  ( $H$  — высота раstra, равная здесь 380 мм) это дает ошибки сведения, соответствующие  $1,2h$  (зона А),  $2,7h$  (зона Б) и  $3,8h$  (зона В). Пересчет на шаг раstra удобен для оценки разрешающей способности. Последняя ухудшается из-за несведения лучей в 1,5—2 раза для зоны А и в 5—7 раз для зон Б и В. Очевидно, что о разрешающей способности для всех суммарных цветов (белого, желтого и т. д.) вне центральной зоны говорить не приходится, так как она будет в лучшем случае порядка 100 линий.

Для сравнения отметим, что оптические системы совмещения растров в современных трехтрубных камерах ЦТ должны обеспечивать точность около  $0,3h$  — для центральной зоны;  $0,6h$  — для

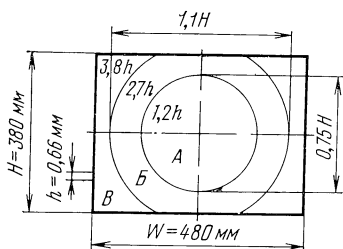


Рис. 1.3. Точность сведения лучей R, G, В для кинескопа типа 61ЛК3Ц

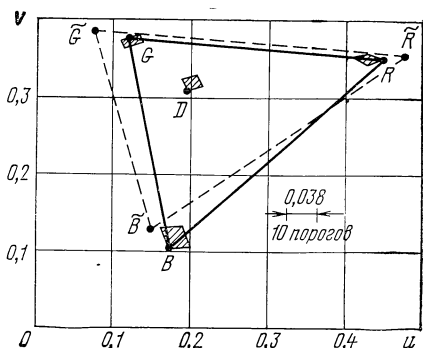


Рис. 1.4. Основные цвета системы СЕКАМ (RGB) и системы NTSC (R'G'B') на графике МКО 1960 г.

промежуточной зоны и  $1,1h$  — для краевой зоны [11]. Считается, что если ошибка не превышает  $0,3h$ , то камера обеспечивает хорошее совмещение растров, и разрешающая способность практически не страдает. Отсюда видно, что точность сведения лучей в цветных кинескопах требует значительного улучшения.

**Чистота основных цветов.** Требование чистоты воспроизведения трех основных цветов, т. е. полей красного, зеленого и синего цветов, является для цветных кинескопов важнейшим. Нарушение чистоты цветов относится к основным признакам брака при массовом производстве цветных кинескопов. Чистота цвета требует, чтобы электронный луч кинескопа не возбуждал одновременно свечения нескольких разноцветных элементов экрана. Практически контроль чистоты цвета состоит в том, что отпирается один из трех электронных лучей (два других — заперты), и при этом должно наблюдаться однородное поле данного цвета без заметных (на глаз и даже под лупой) посторонних цветов по всей рабочей части раstra. Появление посторонней окраски не допускается и требует отбраковки кинескопа. При регулировке чистоты цвета разрешается смещение отклоняющей системы, а также магнита чистоты цвета на горловине кинескопа. Но как до регулировки чистоты цветов, так и после нее необходимо поддерживать оптимальное сведение лучей, так как в масочных кинескопах (особенно типа 61ЛКЗЦ) регулировки чистоты цвета и сведения лучей взаимосвязаны.

Чистота цветов зависит от точности нанесения элементов экрана и определяется прежде всего точностью расчета, изготовления и установки корректирующей линзы. Важное значение имеет также точность изготовления и сборки основных деталей и узлов кинескопа, прежде всего экранно-масочного узла.

**Цветопередача.** Вопросы цветопередачи крупных деталей изображения подробно освещены в литературе — см., например, [12]. Значительно менее изучена цветопередача мелких деталей изображения, где необходимо учитывать структуру экранов кинескопов и особенности пространственного смещения цветов.

Цветопередача крупных деталей определяется цветностью свечения трех люминофоров экрана кинескопа, а также модуляционными характеристиками трех электронных прожекторов.

Цветности люминофоров определяют треугольную область на графике международной комиссии по освещению (МКО) и должны соответствовать стандартным значениям для европейских систем SECAM и PAL, а именно (рис. 1.4):

$$u_R = 0,451; \quad u_G = 0,121; \quad u_B = 0,175;$$

$$v_R = 0,349; \quad v_G = 0,374; \quad v_B = 0,105.$$

При этом опорный равносигнальный белый цвет D6500 соответствует координатам  $u_D = 0,198$ ;  $u_D = 0,312$ .

На рис. 1.4 для сравнения показан штриховой линией треугольник RGB основных цветов для американской системы NTSC. Видно, что различие цветностей для вершин треугольников порядка

10 порогов. Также приводятся нормы допустимых отклонений цветностей трех люминофоров, принятые для кинескопов типа 61ЛК3Ц, — максимальные отклонения цветностей в точках *R*, *G*, *B* и *D* равны соответственно 10; 4; 8 и 3,5 порогам.

В табл. 1.2 приводятся параметры типовых люминофоров красного, зеленого и синего цветов свечения для экранов цветных кинескопов. Выбор люминофоров основан на компромиссе между цветностью (близкой к стандартной) и светоотдачей (обеспечивающей высокую яркость и хороший баланс белого цвета). Должны также учитываться технологические особенности нанесения экранов фотоспособом [13].

Наиболее употребительны люминофоры, имеющие в табл. 1.2 номера 4,5 (*R*), 8(*G*) и 9(*B*). Люминофоры зеленого свечения с медно-алюминиевым активатором все чаще используют в современных кинескопах, так как они обладают высокой светоотдачей и хорошо соответствуют стандартной цветности [14]. Для матричных экранов все чаще используют пигментированные *R*- и *B*-люминофоры, что способствует увеличению контраста и яркости [15].

Гамма-коррекция в европейских системах ЦТ устанавливается исходя из значения «гамма» кинескопа  $\gamma=2,8$ . Это значение яв-

Таблица 1.2. Состав и параметры типовых люминофоров красного, зеленого и синего свечения

№	Название и состав люминофора	Цвет	Активатор	Цветность, МКО 1931		Светоотдача, кд/Вт
				<i>x</i>	<i>y</i>	
1	Фосфат цинка $Zn_3(PO_4)_2:Mn$	Красный <i>R</i>	Марганец	0,670	0,330	0,7...0,8
2	Сульфид цинка-кадмия ( $ZnCd$ ):S:Ag		Серебро	0,660	0,340	1,0...1,2
3	Ванадат иттрия $YVO_4:Eu$		Европий	0,670	0,330	1,4...1,5
4	Оксид иттрия $Y_2O_3:Eu$		»	0,640*	0,330*	2,0...2,2
5	Оксисульфид иттрия $Y_2O_2S:Eu$		»	0,650	0,350	1,9...2,0
6	Виллемит $Zn_2SiO_4:Mn$	Зеленый <i>G</i>	Марганец	0,210	0,710	3,2...3,5
7	Сульфид цинка-кадмия ( $ZnCd$ ):S:Ag		Серебро	0,268... ...0,290*	0,521... ...0,600*	6,8...7,7
8	Сульфид цинка $ZnS:Cu, Al$		Медь, алюминий	0,340... ...0,288	0,610... ...0,617	7,9...8,9
9	Сульфид цинка $ZnS:Ag$	Синий <i>B</i>	Серебро	0,150*	0,060*	1,1...1,5

\* Соответствует стандартной цветности.

ляется номинальным для модуляционных характеристик электронных прожекторов кинескопов, обычно допускаются отклонения в пределах от 2,6 до 3,3. Практический контроль производится воспроизведением 8...10 градаций черно-белых полутонов, при этом не должно наблюдаться заметных нарушений цветности.

Несмотря на разнообразие рекомендаций по улучшению цветопередачи систем ЦТ, вопросы практической оценки ее для цветных кинескопов представляются не столь сложными, так как основные требования здесь сводятся к сравнению и минимизации отклонений параметров и характеристик серийных кинескопов относительно эталонных образцов.

**Уровни качества изображения.** Рассмотренные выше параметры кинескопов можно подразделять на группы значений, соответствующих различным уровням качества воспроизводимого изображения.

В табл. 1.3 приводятся четыре таких уровня, соответствующих удовлетворительному, хорошему, отличному и идеальному качеству изображения. Данные относятся к масочным кинескопам типа 61ЛКЗЦ с размером изображения 480×380 мм.

Уровень *удовлетворительного* качества соответствует значениям параметров, уже достигнутым в настоящее время на серийных кинескопах 61ЛКЗЦ. Уровень *хорошего* качества отвечает показателям, полученным на лучших экземплярах кинескопов этого типа.

**Т а б л и ц а 1.3. Основные параметры качества цветных кинескопов**

Параметр	Уровень качества			
	удовлетворительный	хороший	отличный	идеальный
Разрешающая способность, линии: в центре экрана для любого цвета <i>R, G, B</i> в углах белый в углах	500 450 —	550 500 —	600 550 300	600 600 550
Несведение лучей в углах экрана, шаг строк: <i>R-G</i> <i>R-B</i> или <i>G-B</i>	4 4	3 3	1...2 2...3	0,5 1,0
Яркость на белом поле, кд/м <sup>2</sup>	110	120	150	200
Контраст: в темноте при засветке	120 —	150 —	150 30	150 50
Цветопередача, пороги МКО 1960: цвета <i>R, G, B</i> белые, телесные прочие	8...10 4...5 6...8	6...8 3...4 4...6	5...6 2...3 3...5	5 2 3

Уровень *отличного* качества характеризует его практический предел при массовом производстве цветных кинескопов. По мнению автора этот уровень можно достичь при дальнейшем совершенствовании конструкции и технологии цветных кинескопов, опираясь на фундамент научных исследований.

Наконец, уровень *идеального* качества соответствует предельным значениям параметров современных систем ЦТ. Возможно, что этот уровень недостижим при массовом производстве серийных кинескопов, а может быть получен только для специальных образцов устройств отображения цветовой информации. Иначе говоря, этот уровень соответствует предельным возможностям цветных кинескопов в настоящее время.

**Экономические факторы.** Основная проблема при изготовлении цветных кинескопов — это повышение качества и понижение стоимости — связана прежде всего с уменьшением брака при массовом производстве. В целом, качество изображений, воспроизводимых существующими кинескопами типа 61ЛК3Ц, номинально вполне удовлетворительное (см. табл. 1.3). Основным является вопрос, какой ценой оно достигается. Стоимость цветных кинескопов все еще в несколько раз выше, чем кинескопов ЧБТ, и почти равна стоимости всего приемника ЧБТ. Поэтому первоочередной задачей является снижение брака и увеличение выпуска цветных кинескопов уже на достигнутом уровне качества.

Важным экономическим показателем является долговечность, которая для кинескопов типа 61ЛК3Ц достигает 5000 ч — при снижении яркости до 70% и разрешающей способности в центре экрана (на белом цвете) до 400—500 линий [9].

Решающим фактором является стоимость кинескопов и телевизоров ЦТ (по сравнению с ЧБТ). Если разница в стоимости кинескопов и телевизоров ЦТ и ЧБТ не будет превышать 50—70%, то можно ожидать массового перехода на цветное телевидение.

## 1.2. МАСОЧНЫЕ КИНЕСКОПЫ С ТРЕУГОЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПРОЖЕКТОРОВ

**Общие сведения.** Трехлучевые масочные кинескопы с треугольным расположением электронных прожекторов (типа «дельта»), использующие теневую маску с круглыми отверстиями, точечный экран и динамическое сведение лучей, долгое время были практически единственными среди цветных кинескопов для массовых телевизоров.

Принцип действия масочных кинескопов основан на угловом параллаксе трех электронных лучей в зоне маска — экран (рис. 1.5). Маска механически препятствует каждому из трех лучей попадать на элементы экрана, возбуждаемые двумя другими лучами. Маска имеет отверстия диаметром  $d_m$ , расположенные гексогонально. Расстояние между центрами ближайших отверстий определяет шаг маски  $a_m$ .

Экран состоит из круглых элементов («точек») диаметром  $D_s$ , образованных люминофорами красного, зеленого и синего свечения. Структура одноцветных элементов экрана геометрически подобна структуре отверстий маски. Расстояние между центрами ближайших одноцветных элементов определяет шаг экрана  $A_s$ .

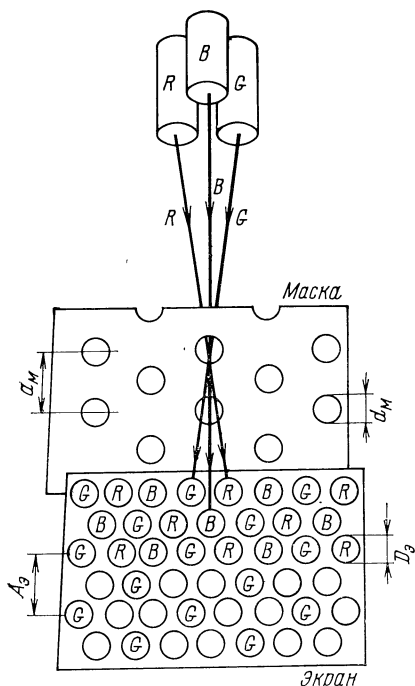


Рис. 1.5. Принцип действия масочного кинескопа с точечным экраном и треугольным расположением прожекторов

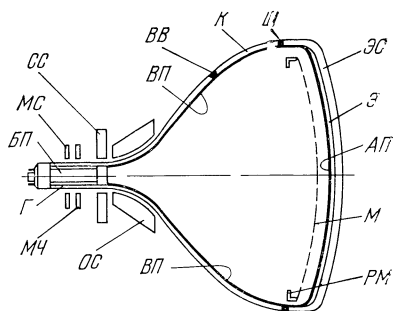


Рис. 1.6. Основные узлы масочного кинескопа

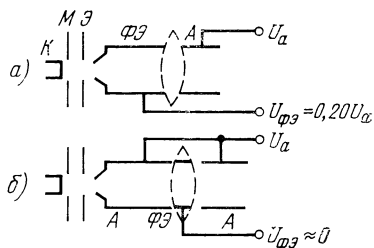


Рис. 1.7. Расположение электродов в блоке прожекторов масочных кинескопов:

а — фокусирующая система бипотенциального типа; б — фокусирующая система унипотенциального типа

К основным узлам масочного кинескопа (рис. 1.6) относятся оболочка, маска и блок прожектора. Оболочка состоит из экранного стекла ЭС, конуса К и горловины Г. После монтажа маски М на раме РМ конус с экранным стеклом соединяется с помощью герметизирующего шва Ш из специального стеклотемента.

На внутренней поверхности экранного стекла наносится точечный экран Э, покрытый тонкой алюминиевой пленкой АП. Последняя электрически соединена с внутренним проводящим покрытием ВП оболочки, с узлом маски, с анодами прожекторов и высоковольтным выводом ВВ. Снаружи на горловине кинескопа расположены: отклоняющая система ОС, система сведения СС, магнит чистоты цвета МЧ и магнит смещения синего луча МС. Внутри горловины расположен блок прожекторов БП.

Схемы расположения электродов в блоке прожекторов показаны на рис. 1.7. Каждый из трех прожекторов имеет катод К, модулятор М и экранирующий электрод Э, а также систему электростатической фокусировки. Последняя состоит из фокусирующего электрода ФЭ и одного или нескольких анодов А. В кинескопах

типа 61ЛКЗЦ используют бипотенциальную линзу, где имеется один анод и потенциал фокусирующего электрода составляет около 20% от потенциала анода (рис. 1.7,а). В кинескопах с меньшим размером экрана иногда используют линзу унипотенциального типа с двумя анодами, между которыми расположен фокусирующий электрод с потенциалом, близким к нулевому, — обычно от —75 до 400 В (рис. 1.7,б).

Подробное описание конструкции и технологии изготовления масочных кинескопов типа «дельта» имеется в литературе [1...5]. Поэтому здесь ограничимся данными кинескопов этого типа и отметим их основные особенности. Данные современных кинескопов для всех типовых размеров приводятся в табл. 1.4. Для европейских стран приняты обозначения, где внешние размеры диагонали экранного стекла обозначены двумя цифрами (т. е. в сантиметрах), в Японии — тремя цифрами (т. е. в миллиметрах). В США диагональ экрана обозначают в дюймах. Например, в европейский кинескоп А56-120Х включают элементы обозначения, где А — кинескоп, 56 — диагональ экрана 56 см, 120 — тип конструкции, Х — цветной кинескоп. Обозначение японского кинескопа 560АВ22 начинается с диагонали экрана 560 мм, буква А — тип конструкции, В22 — цветной экран. Американский кинескоп 25АВР22 — диагональ экрана 25 дюймов (63 см), АВ — тип конструкции, Р22 — цветной экран.

**Таблица 1.4. Масочные кинескопы с треугольным расположением прожекторов**

Тип кинескопа	Угол отклонения, град	Диаметр горловины, мм	Размер раstra, мм	Длина, мм	Г <sub>с</sub> экрана, %	Тип * экрана	Номинальный режим	
							U <sub>а</sub> , кВ	U <sub>ф</sub> , В
А67-150Х	110	29,1	528×396	432	52	О	25	4200...5000
А66-120Х	90	36,5	518×390	522	52	О	25	4200... 5000
61ЛКЗЦ	90	36,5	483×362	511	60	О	25	4500...5500
А56-120Х	90	36,5	445×336	474	52	О	25	4200...5000
560АВ22	110	29,1	445×336	375	85	М	25	4200...5000
510ЕХВ22	90	36,5	404×303	454	85	М	25	4200...5000
510ДХВ22	110	29,1	404×303	358	85	М	24	4200...5000
470ДМВ22	90	36,5	364×273	425	85	М	25	от —75 до +400
470ДХВ22	110	29,1	364×273	337	85	М	24	4600...5000
420СВ22	90	36,5	342×241	398	85	М	20	от —75 до +400
420JB22	110	29,1	342×241	310	85	М	22	3700...4400
40ЛК4Ц	90	29,1	342×241	395	60	О	25	3300...4100
370АКВ22	90	36,5	310×280	366	85	М	20	от —75 до +400
370АЗВ22	110	29,1	310×280	296	85	М	20	3800...4200
320АГВ22	90	36,5	254×200	347	85	М	20	от —75 до +400
270JB22	90	29,1	193×145	237	72	О	18	3000...3600
250ХВ22	60	29,1	184×142	305	64	О	18	от —75 до +400
200ХВ22	70	29,1	145×110	293	66	О	16	от —75 до +400
140АГВ22	55	20,2	96×72	273	76	О	12	2300...2700

\* О — обыкновенный; М — матричный.

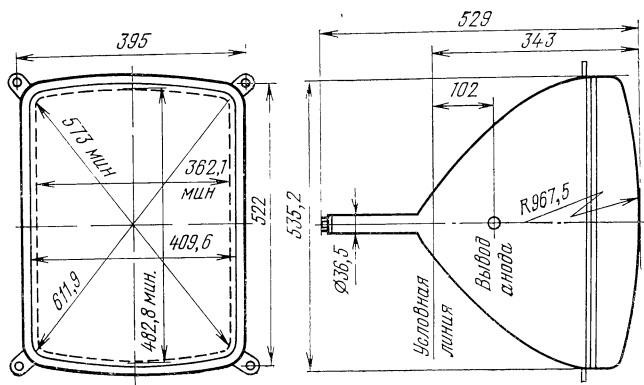


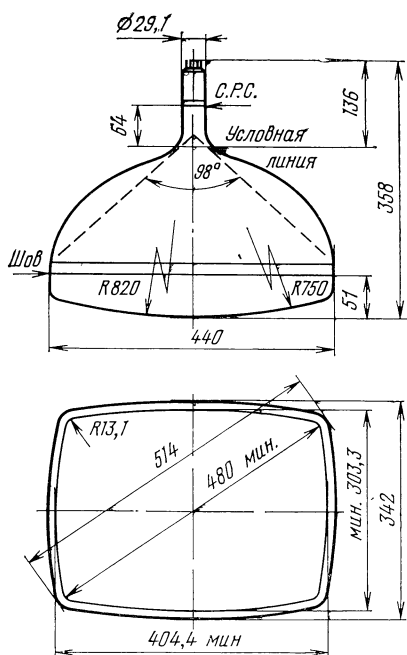
Рис. 1.8. Основные размеры кинескопа 61ЛК3Ц

**Кинескопы с углом отклонения  $90^\circ$ .** Этот тип кинескопов долгое время был наиболее распространенным, примером может служить кинескоп 61ЛК3Ц, габариты которого приводятся на рис. 1.8.

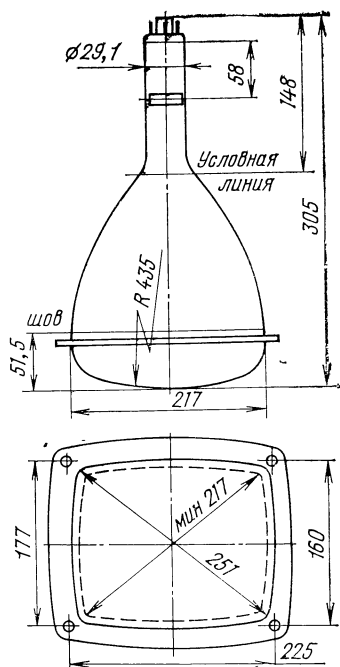
Все кинескопы этого типа (см. табл. 1.4) имеют многочисленные аналоги, различия между которыми весьма незначительны и обычно сводятся к разным конструкциям крепления и взрывозащиты. Наиболее существенны различия в экранах и электронных прожекторах. Применяют экраны как обычного типа с прозрачностью экранного стекла  $T_c = 52 \dots 72\%$ , так и матричные с  $T_c = 85\%$ , что позволяет увеличить яркость без заметного ущерба для контраста (см. рис. 1.2). Применение фокусирующей линзы унипотенциального типа ( $U_{\text{ф}}$  от  $-75$  до  $+400$  В) позволяет упростить схему питания и уменьшить зависимость фокусировки от катодного тока, такие линзы используют в кинескопах с малыми размерами экрана.

При угле отклонения  $90^\circ$  кинескопы не требуют сложных схем динамического сведения лучей и коррекции дисторсии раstra — такие схемы выполняются на пассивных элементах. Отклоняющие системы обеспечивают в плоскости поперечного сечения горловины кинескопа примерно равномерное распределение магнитного поля — в отличие от «самосводящих» систем для кинескопов с линейным расположением прожекторов, где используются поля типа «подушка» и «бочка». Примером может служить отклоняющая система ОС-90-ЛЦ2 типа седло-седло для кинескопов 61ЛК3Ц [11, с. 294].

**Кинескопы с углом отклонения  $110^\circ$ .** Увеличение углов отклонения лучей по диагонали, горизонтали и вертикали соответственно до  $110$ ,  $98$  и  $80^\circ$  (вместо  $90$ ,  $79$  и  $63^\circ$ ) позволяет за счет конусной части сократить общую длину кинескопа на  $20\%$  (см. табл. 1.4). Уменьшение длины конусной части также способствует лучшей фокусировке электронных лучей в центре экрана, однако дефокусировка отклоненных лучей при этом значительно увеличивается. Также затрудняется динамическое сведение лучей на краях и углах раstra. Наконец,



**Рис. 1.9.** Основные размеры 110°-кинескопа 510BJB22



**Рис. 1.10.** Основные размеры кинескопа 250XB22

ощутимо увеличивается мощность разверток. Последнее заставляет уменьшить диаметр горловины кинескопа до 29,1 мм (вместо 36,5 мм, как при 90-градусном отклонении). Типовые габаритные размеры кинескопа с углом отклонения лучей 110° и с диагональю экрана 51 см показаны на рис. 1.9 [16].

Уменьшение диаметра горловины и соответствующее уменьшение диаметра электродов блока прожекторов до 7,6 мм (вместо 9 мм) затрудняет фокусировку лучей из-за увеличения аберраций, а также создает проблему электрической прочности прожекторов. Для динамического сведения лучей кинескопов с углом отклонения лучей 110° приходится применять сложные схемы с активными элементами и большим числом регулировок [5, 10]. Все это привело к тому, что при угле отклонения 110° оказалось целесообразнее перейти от треугольного расположения прожекторов к линейному.

**Малогабаритные кинескопы.** Для переносных и портативных телевизоров были разработаны малогабаритные кинескопы с диагональю экрана 32 см и менее (см. табл. 1.4). Угол отклонения здесь не более 90°, а иногда уменьшен до 55...60°, что упрощает сведение лучей и уменьшает мощность разверток. Примером служит кинескоп 250XB22 (рис. 1.10) с углом отклонения лучей 60° [17].

Все же практика показала, что при треугольном расположении прожекторов нельзя обойтись без динамического сведения лучей. Поэтому и для малогабаритных кинескопов линейное расположение прожекторов предпочтительнее треугольного, так как динамическое сведение при этом не требуется.

### 1.3. МАСОЧНЫЕ КИНЕСКОПЫ С ЛИНЕЙНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПРОЖЕКТОРОВ

**Общие сведения.** При линейном («планарном», «in-line») расположении прожекторов их оси расположены в горизонтальной плоскости, а ось центрального прожектора совпадает с осью кинескопа. При этом сведение трех электронных лучей может значительно упроститься, так как почти отпадает необходимость в динамическом сведении лучей, т. е. может быть реализовано «самосведение» лучей. Общие соображения в пользу линейного (а не треугольного) расположения прожекторов были известны давно [18], но практическая реализация таких кинескопов и соответствующих отклоняющих систем задерживалась.

Одно из заметных затруднений состояло в том, что при линейном расположении прожекторов с диаметром электродов  $d_3$  диаметр горловины кинескопа  $D_n$  необходимо увеличить на 40% по сравнению с диаметром горловины  $D_\Delta$  при треугольном расположении прожекторов (рис. 1.11). Это приводит к нежелательному увеличению мощности генераторов разверток. Если же при неизменном диаметре горловины уменьшить на 40% диаметр электродов прожектора  $d_3$ , то возникают трудности фокусировки электронных лучей из-за увеличения сферической аберрации.

В кинескопах типа «тринитрон» японской фирмы «Сони» обеспечить фокусировку пытались с помощью специальной системы, общей для всех трех линейно расположенных электронных лучей [1, с. 156]. Были разработаны тринитроны с диагональю экрана

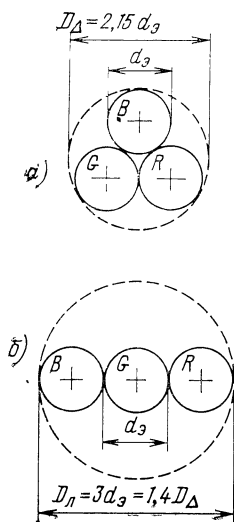


Рис. 1.11. Сравнение треугольного и линейного расположения электронных прожекторов

а — треугольное расположение; б — линейное расположение

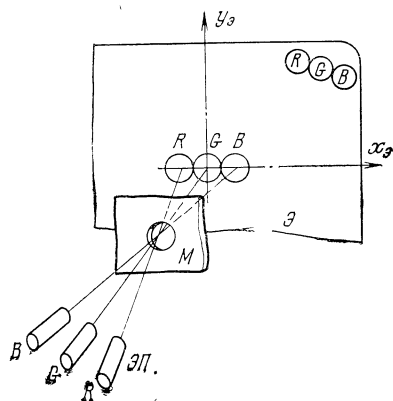


Рис. 1.12. Формирование линейных триад RGB в масочных кинескопах с линейным расположением прожекторов и точечным экраном:

(ЭП — электронные прожекторы; М — маска; Э — экран)

от 25 до 47 см [19]. Но эти кинескопы требуют очень точной сборки систем фокусировки и сведения лучей. Наличие дополнительных высоковольтных выводов также заметно усложняет конструкцию. Поэтому интерес к тринитронам заметно упал с появлением современных типов масочных кинескопов с системами «самосведения» лучей.

Первые кинескопы такого типа отличались от обычных масочных кинескопов с точечным экраном только тем, что треугольное расположение прожекторов было заменено на линейное (рис. 1.12). Но при этом из-за влияния магнитного поля отклоняющей системы в угловых зонах экрана наблюдался поворот линейных триад *RGB*. Для компенсации этого явления принимались разные меры [20], но самой радикальной стала замена точечного экрана штриховым. При штриховом экране маска может иметь как круглые, так и щелевые отверстия — последнее позволяет несколько повысить прозрачность маски.

Для повышения прочности маски щелевые отверстия располагают в шахматном порядке (рис. 1.13). Шаг щелей  $a_m$  обычно 0,6 ... 0,7 мм, число щелей вдоль строки определяет горизонтальную разрешающую способность кинескопа. Ширина щелей в центральной зоне маски  $d_m$  (примерно 0,12 ... 0,16 мм) выбирается как компромисс между прозрачностью маски (около 20%) и условиями чистоты цветов. Вертикальные размеры щелей  $t_m$  в пределах 0,6 ... 0,8 мм, перемычки между щелями  $r_m$  около 0,12 ... 0,14 мм. Эти размеры не очень критичны, однако излишнее увеличение отношения  $r_m/t_m$ , хотя и способствует прочности маски, но может привести к муарам на растре. Из условий чистоты цветов ширина щелей  $d_m$  обычно уменьшается от центра к краям маски как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

Штриховой экран состоит из вертикальных полосок люминофоров красного, зеленого и синего свечения (на рис. 1.13 полоски

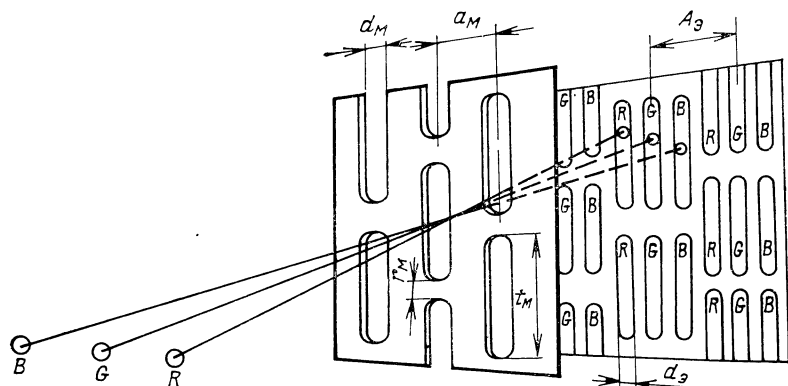


Рис. 1.13. Принцип действия масочного кинескопа со штриховым экраном, щелевой маской и линейным расположением прожекторов

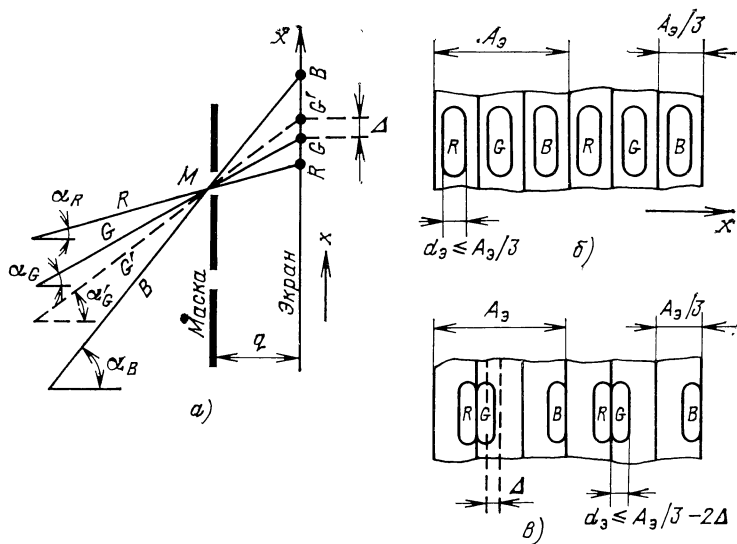
люминофоров не показаны, но изображены следы щелей маски на экране, создаваемые соответствующими электронными лучами). Шаг одноцветных полосок экрана  $A_3$  обычно 0,6 ... 0,7 мм. Максимальная ширина полосок экрана равна  $A_3/3$ , но иногда применяют экран матричного типа, где промежутки между соседними полосками заполнены темным веществом. Разные варианты экранно-масочного узла описаны в патентах, обзор которых имеется в [21].

В горизонтальном направлении справедливы все основные геометрические соотношения, характерные для масочных кинескопов [1, с. 67]. Но в вертикальном направлении здесь допускается большая свобода, так как смещение следов электронных лучей вдоль полосок люминофоров не нарушает чистоты цветов. В этом состоит одно из принципиальных преимуществ кинескопов со штриховым экраном.

**Самосведение электронных лучей.** При совместном отклонении трех компланарных лучей должны выполняться два требования: все три луча должны проходить через общую точку отверстия маски;

следы боковых лучей R и B должны располагаться симметрично относительно центрального G луча.

Первое требование представляется очевидным. Поясним второе условие с помощью рис. 1.14. Здесь три луча R, G, B пересекаются в общей точке M щелевой маски и попадают на экран в соответствующих точках R, G, B (рис. 1.14,а). Возможное сме-



**Рис. 1.14.** Сведение лучей R, G, B в кинескопе со щелевой маской:

а — структура масочно-экранного узла; б — идеальная структура следов лучей; в — предельный случай

шение  $\Delta$  центрального луча  $G$  от идеального симметричного положения  $G'$  определится выражением

$$\Delta = q(\operatorname{tg} \alpha_R + \operatorname{tg} \alpha_B)/2 - \operatorname{tg} \alpha_G, \quad (1.5)$$

где  $q$  — расстояние маска — экран;  $\alpha_R$ ,  $\alpha_G$ ,  $\alpha_B$  — углы отклонения лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$ .

В идеальном случае  $\Delta=0$  и следы лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  расположены равномерно (рис. 1.14,б). При неравномерном расположении лучей (рис. 1.14,в) ширина следа луча на экране определится неравенством

$$d_s \leq A_s/3 - 2\Delta. \quad (1.6)$$

Идея самосведения трех компланарных лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  поясняется рис. 1.15. Пусть в плоскости отклонения ПО рассматривается круглое сечение конусного пучка электронных лучей, сходящегося в центре  $O$  плоскости сведения ПС при отсутствии отклонения (рис. 1.15,а). Луч  $G$  совпадает при этом с осью кинескопа  $OZ$ . Лучи  $R$  и  $B$  вместе с лучом  $G$  образуют горизонтально-планарную систему, а лучи 1 и 2 (вместе с лучом  $G$ ) — вертикально-компланарную. При горизонтальном отклонении конуса лучей вдоль оси  $OX$  можно так подобрать неоднородность распределения магнитного отклоняющего поля  $B_H$  в плоскости ПО (типа «бочка» — см. рис. 1.15,б — сплошные линии), что на правом краю растра получим изображение этих конусных лучей в виде штриха. В центре этого штриха сойдутся лучи  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , по краям — лучи 1 и 2.

При вертикальном отклонении конуса лучей вдоль оси  $OY$  можно так подобрать распределение поля  $B_V$  (типа «подушка» — см. рис. 1.15,б — штриховые линии), что на верхнем краю растра так-

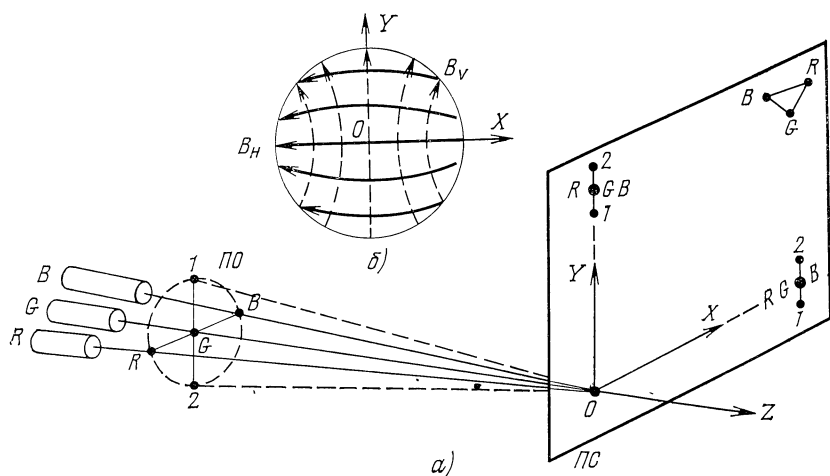


Рис. 1.15. Принцип самосведения компланарных лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$ :

а — отклонение лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$ ; б — структура магнитного поля систем горизонтального ( $B_H$ ) и вертикального ( $B_V$ ) отклонения

же будет изображение вертикального штриха, в центре которого снова будут лучи R, G, B, по краям — лучи 1 и 2. Но если вместо конусного пучка лучей взять только три луча R, G, B (лучи 1 и 2 отсутствуют), то на плоскости ПС вдоль осей ОХ и ОУ получим вместо упомянутых штрихов точки сведения всех трех горизонтально-компланарных лучей R, G, B.

В углах раstra сведение лучей в точку не гарантируется и может получиться «треугольник» R, G, B (рис. 1.15,а). Поэтому для сближения следов лучей R, G, B в углах раstra нужны дополнительные меры, обычно с этой целью используют четырехполюсные (квадрупольные) системы. Подробнее эти вопросы рассмотрены в главе 3. Теория самосведения мало освещена в литературе, некоторые публикации [22] используют теоретические материалы из [18].

**Блок электронных прожекторов.** Блок прожекторов должен иметь минимальные габариты для уменьшения диаметра и длины горловины. Но уменьшение габаритов блока прожекторов затрудняет фокусировку электронных лучей из-за возрастания влияния сферической аберрации на фокусировку лучей. Кроме того, возрастают требования к точности изготовления и сборки основных деталей и узлов прожекторов.

На рис. 1.16 показана типовая конструкция блока прожекторов для кинескопа с диаметром горловины 29,1 мм, используемая в кинескопах типа PIL (Precision In line) американской фирмы RCA [23, 24].

Прожекторы имеют линзу предварительной фокусировки тетродного типа (состоящую из катода К, модулятора М, экранирующего Э электрода), а также бипотенциальную линзу главной фокусирующей системы, состоящую из фокусирующего электрода ФЭ и анода А. Здесь катоды электрически взаимно изолированы.

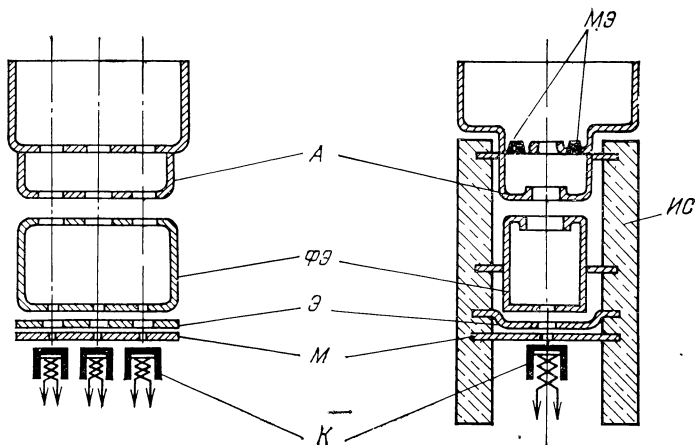


Рис. 1.16. Блок электронных прожекторов кинескопа типа PIL

Остальные электроды имеют общие диафрагмы с тремя отверстиями. Расстояние между осями соседних прожекторов 4 ... 5 мм. Статическое сведение крайних лучей под углом около 55' относительно оси центрального луча достигается соответствующим смещением центров отверстий диафрагм электродов. Для кинескопа типа P1L магнитные элементы МЭ, укрепленные на диафрагме анода, служат для коррекции aberrаций типа кома и уменьшения эллиптичности сечения крайних лучей. Описанная конструкция отличается высокой механической прочностью и малыми габаритными размерами, но требует прецизионной сборки.

В большинстве кинескопов применяют фокусирующие системы бипотенциального типа (рис. 1.16 и 1.7,а). В малогабаритных кинескопах используется также линза унипотенциального типа (рис. 1.7,б). Другие варианты фокусирующих систем, используемые в кинескопах с линейным расположением прожекторов, показаны на рис. 1.17 [25]. Вариант бипотенциальной линзы рис. 1.17,а с удлинненным фокусирующим электродом ФЭ применялся в кинескопах RCA (США), а также «Мацусита» (Япония) и «Филипс» (Голландия).

Удлинненный фокусирующий электрод в линзе унипотенциального типа рис. 1.17,б использовался в кинескопах японской фирмы «Хитати». По сравнению с обычной бипотенциальной линзой здесь диаметр пятна значительно меньше зависит от тока луча, фокусировка производится двумя линзами. Такая система может сочетаться с входной бипотенциальной линзой, образуя трехлинзовую систему фокусировки рис. 1.17,в, что используется фирмой «Мицубиси» (Япония). Обратное сочетание — унипотенциальная линза на входе и бипотенциальная на выходе рис. 1.17,г используется в кинескопах фирмы «Тосиба». Система двух последовательных унипотенциальных линз рис. 1.17,д применяется в кинескопах фирмы «Хитати»: Трехпотенциальная система двух линз рис. 1.17,е используется в кинескопах фирмы «Зенит» (США) [26]. Возможно, что все эти фокусирующие системы являются результатом эмпирических поисков, так как теоретические работы по таким системам не опубликовывались. По системам обычного типа имеются публикации [27—30].

Внешние узлы на горловине кинескопа. Кинескоп А51-190Х (рис. 1.18) наиболее распространен и имеет многочисленные аналоги, например отечественный кинескоп 51ЛК1Ц [31]. На горловине кинескопа расположены отклоняющая система ОС и магнитная система МС.

Магнитная система состоит из трех пар магнитных колец — четырехполюсной 4П, шестиполюсной 6П и двухполюсной 2П. Первые две пары колец 4П и 6П служат для статического сведения двух крайних лучей R и В; на центральный луч G они не должны оказывать влияния (рис. 1.19) [5]. Рассмотрим вначале действие пары четырехполюсных колец 4П. Если оба кольца взаимно нейтрализуют друг друга (северные полюсы N одного кольца совмещены с южными полюсами S другого), то они не влияют на элект-

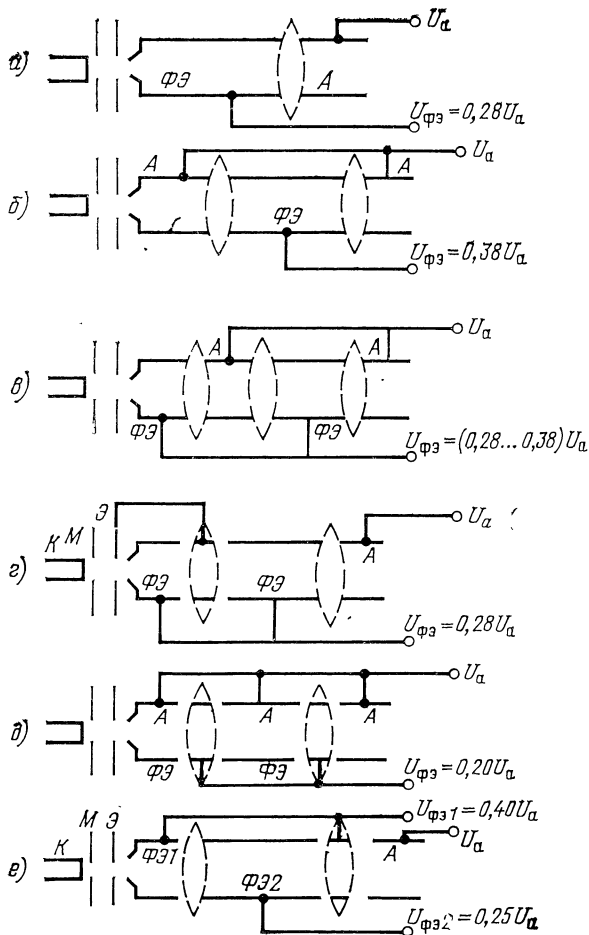


Рис. 1.17. Специальные типы фокусирующих систем для кинескопов с линейным расположением прожекторов

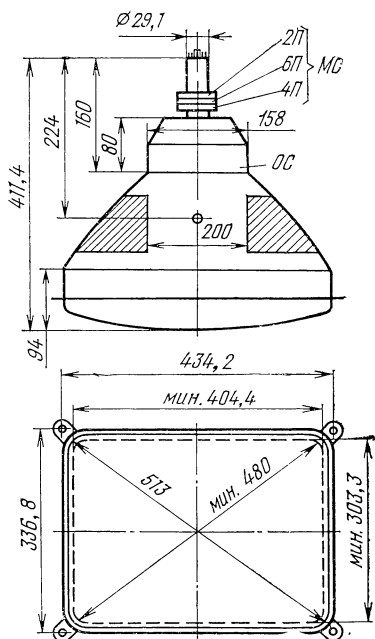
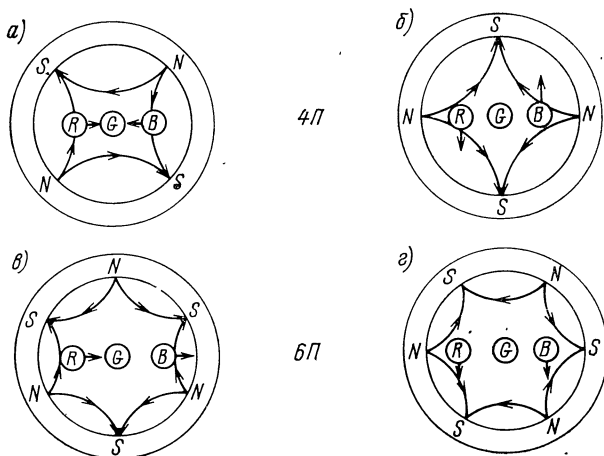


Рис. 1.18. Основные размеры кинескопа типа А51-190Х

ронные лучи кинескопа. Максимальное действие пары этих колец будет при их полном совмещении (т. е. совмещении северного полюса одного кольца с северным полюсом другого). При этом кольца могут быть повернуты так, что лучи R и В будут смещаться в горизонтальном а или вертикальном б направлениях противоположно друг другу.

Аналогично действует пара шестиполюсных колец 6П, смеща лучи R и В горизонтально в или вертикально г, но здесь оба луча движутся в одинаковых направлениях.

Рисунок 1.20 иллюстрирует действие двухполюсной 2П пары кольцевых магнитов. Они служат для регулирования чистоты цветов путем одновременного смещения всех трех лучей в одном на-



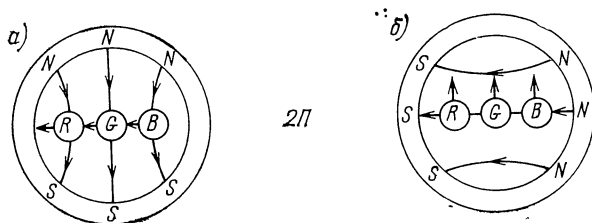
**Рис. 1.19.** Влияние четырехполюсных 4П и шестиполюсных 6П магнитов на смещение компланарных лучей R, G, B

правлении — в частности, горизонтальном рис. 1.20,а или вертикальном рис. 1.20,б. Регулировки статического сведения лучей (магнитами 4П и 6П) и чистоты цветов (магнитами 2П) взаимосвязаны, поэтому их обычно приходится повторять несколько раз.

Отклоняющая система ОС на участке перехода горловины в конус крепится так, чтобы была возможность смещать ее относительно кинескопа во всех направлениях. Смещение ОС в горизонтальном направлении (вдоль оси ОХ) относительно идеально-симметричного ее положения может привести к тому, что размеры трех растров будут неодинаковы — см. рис. 1.21,а, где В-растр оказался самым большим, а R-растр — самым маленьким.

Смещение ОС в вертикальном направлении (вдоль оси ОУ) может привести (см. рис. 1.21,б) к повороту центральных осей В и R-растров [23].

Смещение ОС вдоль оси кинескопа ОZ связано с регулировкой чистоты цветов. Поэтому ОС должна допускать продольное смещение (обычно на 5 ... 6 мм) без ущерба для угловых участков



**Рис. 1.20.** Влияние двухполюсных 2П магнитов на смещение компланарных лучей R, G, B

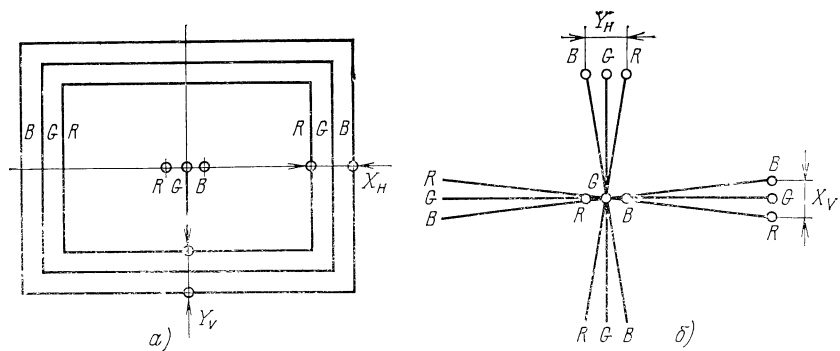
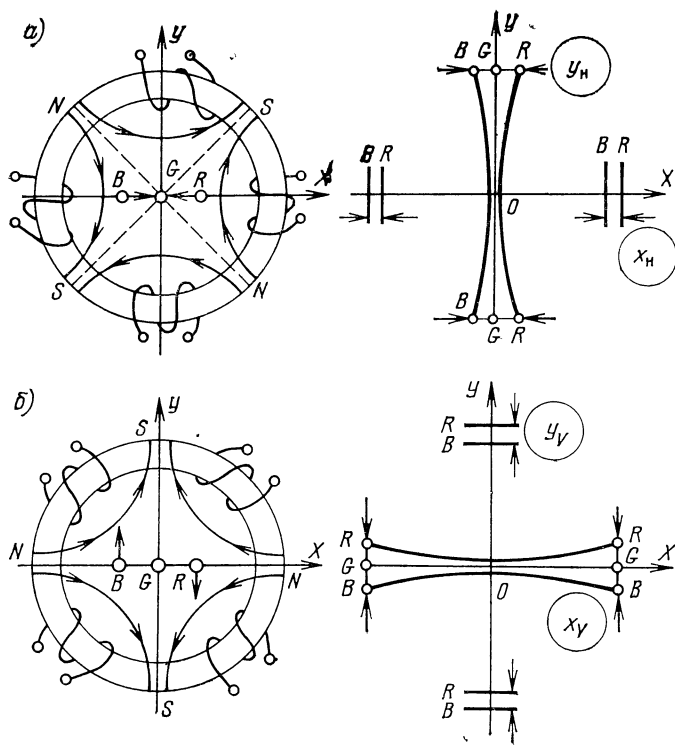


Рис. 1.21. Влияние смещения отклоняющей системы на совмещение линий R, G, B  
 а — горизонтальное смещение; б — вертикальное смещение

растра. Поперечное смещение ОС в горизонтальном или вертикальном направлениях обычно допускается в пределах 1 ... 2 мм. Все смещения ОС влияют не только на сведение трех растров, но и на чистоту цвета, поэтому юстировка ОС относительно горловины кинескопа является весьма ответственной операцией. Некоторые американские фирмы (RCA и др.) выпускают кинескопы вместе с отклоняющими системами, фиксируя последние после юстировки, чтобы дальнейшая юстировка была невозможной. Европейские и японские фирмы обычно применяют гибкую конструкцию крепления ОС, где с помощью регулировочных винтов можно юстировать ее при эксплуатации приемного устройства.

**Четырехполюсные системы коррекции сведения лучей.** В кинескопах с линейным расположением прожекторов эффект самосведения лучей достигается в крестообразной области растра вдоль его осей. На углах (особенно в кинескопах с углом отклонения  $110^\circ$ ) сведение лучей затруднительно. Поэтому в таких кинескопах обычно используют отклоняющие системы с дополнительными четырехполюсными (квадрупольными) элементами, требующими отдельного питания от схем разверток.

На рис. 1.22 показаны два типа таких систем. Первая (рис. 1.22, а), в дальнейшем называемая осевой, имеет витки, расположенные на осях ОХ и ОУ (здесь это оси антисимметрии). Четыре полюса N—S—N—S расположены так, что соединяющие их линии N—N и S—S (оси симметрии) проходят под углами  $45^\circ$  к осям ОХ и ОУ. Такая система смещает лучи R, G, B на краях и углах экрана в горизонтальном направлении. Витки четырехполюсной системы (на рис. 1.22 эти витки образуют тороидальную обмотку) включаются последовательно. Подавая на них сигналы строчной частоты параболической формы, можно получить горизонтальное смещение вертикальных линий B и R на краях оси растра ОХ (величина смещения  $X_H$ ). Подавая аналогичные сигналы полукадровой частоты, можно получить горизонтальное смещение (величи-



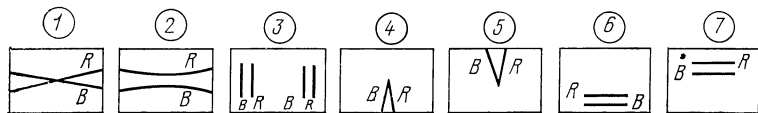
**Рис. 1.22.** Четырехполюсные системы и обеспечиваемое ими смещение лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$

$a$  — система осевого типа;  $b$  — система диагонального типа

ной  $Y_H$ ) линий  $R$  и  $B$  вверху и внизу оси раstra  $OY$ . По углам раstra также получим смещение следов лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  в горизонтальном направлении.

Вторая четырехполюсная система (рис. 1.22, б), называемая далее *диагональной*, имеет витки на диагональных осях антисимметрии (т. е. под углом  $45^\circ$  к осям раstra), а полюсы расположены при этом на осях симметрии  $OX$  и  $OY$ . Такая система смещает лучи  $R$ ,  $G$ ,  $B$  на краях и углах экрана в вертикальном направлении. Подавая на витки четырехполюсника параболические сигналы строчной частоты, получаем вертикальное смещение (величина его  $X_V$ ) линий  $R$  и  $B$  на краях оси  $OX$ . Подавая сигналы параболической формы полуквадровой частоты, получаем вертикальные смещения (величиной  $Y_V$ ) горизонтальных линий  $R$  и  $B$  наверху и внизу оси раstra  $OY$ . По углам раstra также получим смещение следов лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  в вертикальном направлении.

Обычно первая система (осевая) создается дополнительными витками на отклоняющей системе (как на рис. 1.22, а), а вторая система (диагональная) создается без дополнительных витков за



СК — строчные катушки; КК — кадровые катушки; ОК — осевые квадрупольные катушки (в нижней части показано действие органов регулировки 1—7)

Типовая схема питания четырехполюсных систем, а также систем горизонтального и вертикального отклонения (с учетом дисбаланса токов в последних) показана на рис. 1.23 [5].

**Данные кинескопов.** Основные данные типовых кинескопов с линейным расположением прожекторов приводятся в табл. 1.5 [5, 9, 32—37]. По типу отклоняющих систем ОС и методам коррекции сведения лучей эти кинескопы можно разделить на следующие типовые группы.

29

Таблица 1.5. Масочные кинескопы с линейным расположением прожекторов

№ п/п	Тип кинескопа	Угол отклонения, град	Диаметр горловины, мм	Размер раstra, мм	Длина, мм	$T_0^*$ , %
1	A67-610X	110	29,1	528×396	401	51
2	A66-501X	110	36,5	518×390	398	70
3	A56-500X	110	29,1	444×334	374	52
4	A56-610X	110	29,1	447×337	358	51
5	A51-190X	90	29,1	404×303	415	66
6	A42-160X	90	29,1	322×241	361	55
7	32ЛК1Ц-1	90	29,1	244×182	306	60
8	25ЛК2Ц	90	20,5	185×138	240	60
9	142 «Тосиба»	55	20,5	96×72	232	50
10	104 «Тосиба»	60	20,5	71×53	168	70

\*  $T_0$  — прозрачность экранного стекла;  $A_0$  — шаг одноцветных полос экрана.

\*\* — Запирающий потенциал модулятора.

в системах типа седло-тор и седло-седло. Использование прецизионной ОС позволило в кинескопах типа PIL с углом отклонения лучей  $90^\circ$  получить хорошее сведение лучей без дополнительных четырехполосных систем, а в кинескопах этого типа с углом отклонения лучей  $110^\circ$  (рис. 1.24) — при упрощенной схеме питания четырехполосной системы от схемы вертикальной развертки [5].

Другую группу составляют кинескопы типа AX европейских фирм «Филипс» и др. — табл. 1.5 № 2, 4, 5. Характерным представителем является кинескоп A51-190X с углом отклонения лучей  $90^\circ$  (см. рис. 1.18). В кинескопах этой группы, но с углом отклонения лучей  $110^\circ$ , используют обычно ОС типа седло-седло [33], а для дополнительного подсведения лучей в углах раstra в ранних типах кинескопов (типа 20AX) применялась схема, аналогичная показанной на рис. 1.23. Современные аналоги этой группы (типа 30AX) используют упрощенное подсведение лучей и отличаются высокими светотехническими параметрами [10]. Группа кинескопов типа AX является самой распространенной в европейских странах. Отечественный кинескоп 51ЛК1Ц [31] близок по габаритам и основным параметрам к A51-190X. Основное отличие состоит в том, что

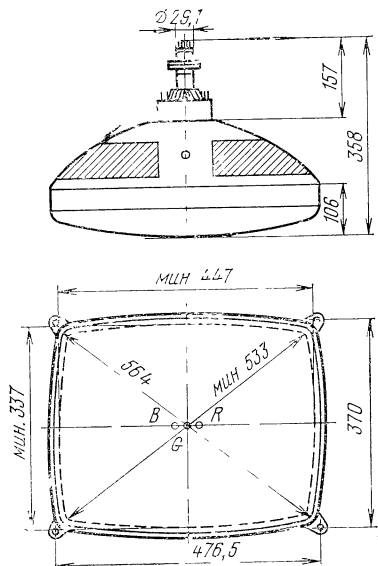


Рис. 1.24. Основные размеры кинескопа A56-610X с углом отклонения лучей  $110^\circ$  (типа PIL)

$A, \text{ мм}$	Номинальный режим				Масса, кг
	$U_a, \text{ кВ}$	$U_{\text{фа}}, \text{ кВ}$	$U_{\text{за}}, \text{ В}$	$U_{\text{м}}, \text{ В}^{**}$	
0,83	25	4,2—5,0	285—685	—150	20,5
0,80	25	4,0—4,8	212—495	—100	20,0
0,80	25	4,0—4,8	212—495	—100	14,0
0,83	25	4,2—5,0	335—670	—125	15,7
0,82	25	4,2—5,0	150—420	—100	12,1
0,76	25	4,2—5,0	335—670	—125	9,1
0,60	18	3,2—4,0	200—650	—100	6,0
0,60	16	1,8—2,8	200—550	—70	3,5
0,45	12	2,4—2,9	200—500	—50	0,8
0,30	12	2,4—2,9	200—500	—50	0,3

последний имеет центральный луч R (вместо G). Нормы остаточного несведения лучей для кинескопа А51-190Х показаны на рис. 1.25.

Заслуживают внимания кинескопы японского производства, в частности, имеющие диагональ экрана 67 см, где трудности сведения лучей и коррекции дисторсии раstra особенно заметны. Для уменьшения энергии отклонения в кинескопах типа RIS [34, 35] сечение горловины на участке перехода ее в конус близко к прямоугольному. Это позволяло сочетать преимущества горловин диаметром 36,5 мм (уменьшение аберраций блока прожекторов) и 29,1 мм (уменьшение энергии отклонения лучей). В дальнейшем удалось уменьшить диаметр горловины до 29,1 мм и при этом раз-

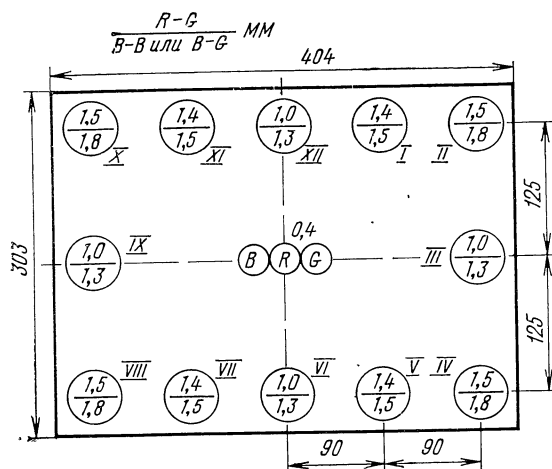


Рис. 1.25. Нормы на точность сведения комплашарных лучей для кинескопа типа А51-190Х (числитель — лучи R-G, знаменатель — лучи B-R, или B-G; все размеры в миллиметрах)

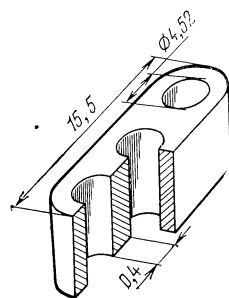


Рис. 1.26. Блок фокусирующих электродов 110-градусного кинескопа с диаметром горловины 22,5 мм

**Таблица 1.6. Кинескопы с диагональю экрана 67 см [37]**

Параметры	Кинескоп I	Кинескоп II	Кинескоп III
Угол отклонения, град	110	110	100
Диаметр горловины, мм	22,5	29,1	29,1
Длина, мм	415	427	473
Энергия горизонтального отклонения, мДж	26	32	29
Энергия вертикального отклонения, мДж	39	48	42
Дисторсия раstra, %	1	1	1
Несведение лучей в углах раstra, мм	0,5	0,9	0,8

работать ОС типа седло-тор, свободную не только от остаточного несведения лучей, но и от дисторсии раstra [36]. Последним достижением является разработка кинескопа с углом отклонения лучей  $110^\circ$  и с диаметром горловины 22,5 мм [37]. Сравнение данных этого кинескопа (I) с кинескопами, имеющими горловину диаметром 29,1 мм (II и III), приводится в табл. 1.6.

Все указанные в табл. 1.6 кинескопы имеют размер раstra  $528 \times 396$  мм, анодный потенциал 25 кВ и используют отклоняющую систему типа седло-тор. Уменьшение диаметра горловины до 22,5 мм позволило уменьшить энергию отклонения на 20%. Для сохранения хорошей фокусировки лучей общий фокусирующий электрод выполнен из сплошного куска металла, что позволило увеличить диаметр отверстий до 4,52 мм (вместо 3,9 мм, как при обычной конструкции, штампованной из листового материала) — см. рис. 1.26.

Новый кинескоп с диаметром горловины 22,5 мм имеет также усовершенствованный внутренний магнитный экран, а также люминофоры с улучшенной насыщенностью зеленого ( $x=0,286$ ;  $y=0,611$ ) и красного ( $x=0,640$ ;  $y=0,331$ ) цветов.

**Малогобаритные кинескопы.** К ним принято относить кинескопы с диагональю экрана 32 см и менее, используемые для переносных и портативных приемников, а также для электронных видеоскателей передающих камер ЦТ и аппаратуры прикладного телевидения.

Данные отечественных кинескопов 32ЛК1Ц-1 и 25ЛК2Ц приводятся в табл. 1.5 (№ 7 и 8), а их эскизы — на рис. 1.27 [9].

Кинескоп 32ЛК1Ц-1 обеспечивает яркость в белом  $150 \text{ кд/м}^2$ , разрешающую способность в центре экрана — не менее 300 линий. Модифицированный вариант кинескопа 32ЛК2Ц имеет яркость  $280 \text{ кд/м}^2$  за счет повышения анодного потенциала до 22 кВ (вместо 18 кВ).

Кинескоп 25ЛК2Ц имеет яркость в белом около  $200 \text{ кд/м}^2$ . Сравнительно большой шаг щелей маски (около 0,6 мм) ограничивает горизонтальную разрешающую способность до 300 линий. В модифицированном варианте предполагается довести ее до 450 линий [31].

Представляют интерес миниатюрные кинескопы японской фирмы «Тосйба» с диагональю экрана 14 и 10 см (см. № 9 и 10 табл. 1.5). Первый из них имеет около 200 щелей маски вдоль строки, второй — около 230 щелей [38].

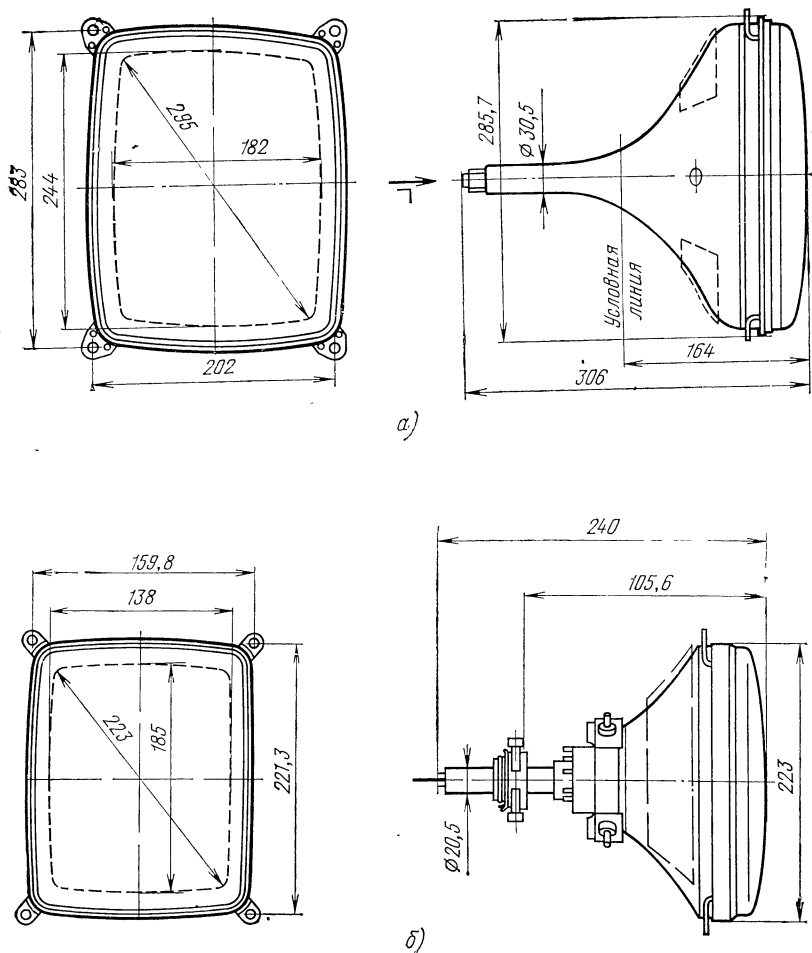


Рис. 1.27. Основные размеры малогабаритных кинескопов:  
а — 32ЛК1Ц-1; б — 25ЛК2Ц

В них используются катоды с ускоренным подогревом (примерно 5 с), что характерно для всех современных кинескопов, применяемых в устройствах с полупроводниковыми схемами.

Малогабаритные кинескопы обычно имеют более простую конструкцию (в частности, не требуется термокомпенсация крепления узла маски), отличаются высокой яркостью, пониженным анодным потенциалом (рентгеновское излучение практически отсутствует), но слабым местом является пониженная горизонтальная разрешающая способность.

#### 1.4. КИНЕСКОПЫ С ПОВЫШЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Все массовые стандартные кинескопы для массовых приемников имеют невысокую разрешающую способность — обычно не более 400 ... 500 линий и то лишь в основных цветах или в центре

экрана. Хотя для обычных телевизоров это считается приемлемым, для специальных применений требуются кинескопы с более высокой разрешающей способностью — 1000 линий и выше. Повышенная четкость требуется:

в системах отображения информации (дисплей) для ЭВМ [39];  
в системах ЦТ с повышенным качеством изображения [40, 41].

Современный уровень развития ЭВМ требует устройств отображения информации в виде букв, цифр, символов, графиков и т. п. В настоящее время сравнительно хорошо разработаны устройства отображения одноцветной информации, использующие электронно-лучевые трубки ЭЛТ — чаще всего обычные кинескопы для ЧБТ [42]. Попытки заменить ЭЛТ другими устройствами (электролюминесцентными экранами, лазерными системами и др.) пока не дали нужных результатов.

В современных системах отображения информации все чаще применяется многоцветное воспроизведение. Оно делает отображаемую информацию более наглядной и легко читаемой, позволяя значительно увеличить объем информации и заметно снизить утомляемость операторов.

Для систем отображения информации требуются устройства с более высокими параметрами качества, чем для стандартных систем ЦТ. Прежде всего, разрешающая способность должна быть в 2—3 раза выше. Кроме того, желательны более высокие уровни яркости и контраста, а также малые значения входной емкости кинескопа (между катодом и модулятором). Важно также, чтобы четкость и яркость были достаточно высокими не только в центральной зоне, но и по всему изображению. При этом требования колориметрически точного воспроизведения цветов в системах отображения информации часто не играют существенной роли — обычно достаточно только «раскрасить» изображение несколькими разными цветами. Это может упростить требования к точности сведения лучей на краях изображения трехлучевых кинескопов. С другой стороны, желательно иметь универсальные кинескопы с повышенными параметрами качества, пригодные как для систем отображения информации, так и для систем ЦТ с повышенными параметрами качества изображения.

Основным путем повышения разрешающей способности в трехлучевых масочных кинескопах является уменьшение шага отвер-

Таблица 1.7. Трехлучевые масочные кинескопы для систем отображения

Тип кинескопа	Диагональ экрана, см	Угол отклонения, град	Диаметр горловины, мм	Расположение прожекторов	Основные цвета
320CCB22	32	76	29,1	Линейное	R, G, B
320CUB22	32	90	29,1	»	R, G, B
1409CB22	35	90	36,5	Треугольное	R, G, B
1449CBW1	35	90	36,5	»	R, G, W
2009CB22	51	90	36,5	»	R, G, B
2019CBW1	51	90	36,5	»	R, G, W

ствий маски по сравнению со стандартными кинескопами (т. е. шаг 0,3 мм вместо обычного 0,6 мм). При этом необходимо соответственно уменьшить диаметр следа электронного луча (пятна), т. е. улучшить фокусировку луча по всей поверхности экрана. Заметим, что если первая задача — уменьшение шага отверстий маски — чисто технологическая и реализуется без большого труда, то вторая является сложной электронно-оптической задачей.

Практика показала, что уменьшение шага отверстий маски до 0,3 мм (а иногда и до 0,2 мм) значительно проще выполнить на маске с круглыми отверстиями. Дело в том, что уменьшение шага требует соответствующего уменьшения толщины маски, что ограничено условиями ее механической прочности. Поэтому уменьшение шага отверстий на щелевой маске затруднительно. Все современные кинескопы повышенной четкости используют маску с круглыми отверстиями при треугольном или линейном расположении электронных прожекторов.

Основные данные трехлучевых масочных кинескопов японского производства для систем отображения информации приводятся в табл. 1.7 [43, 44]. Первые два типа имеют линейное расположение прожекторов, остальные — треугольное. Входная емкость (около 5 пФ) позволяет подавать на кинескоп высокочастотные сигналы, необходимые для воспроизведения знаковой информации (в виде букв и цифр). Помимо указанных основных размеров диагонали экрана (32, 35 и 51 см) известны и кинескопы такого рода как с уменьшенным экраном (диагональ 14 и 19 см), так и увеличенного размера (диагональ 66 и даже 76 см) [45, 46]. Наряду с обычными основными цветами R, G, B есть кинескопы, где основными являются красный, зеленый и белый W (вместо синего) цвета (табл. 1.7). Замена синего цвета белым способствует увеличению яркости изображения, но сужает возможности применения таких кинескопов.

В большинстве устройств отображения информации на экране требуется воспроизвести текст, состоящий из 25 ... 30 (иногда из 40) строк, каждая строка содержит 60 ... 80 знаков (букв или цифр, включая пробелы между ними). Элементарный расчет требуемого шага отверстий маски при этом сводится к следующему [43]. Для воспроизведения одного знака желательно иметь 7 условных элементов по высоте и 6 элементов по ширине (рис. 1.28),

#### информации

Размер растра, мм	Длина, мм	Шаг отвер- стий маски, мм	Номинальный режим		Ток луча, мкА	Диаметр пятна, мм
			$U_a$ , кВ	$U_{фа}$ , кВ		
243×183	354	0,30	25	6,5—7,5	450	0,20
243×183	315	0,30	25	6,5—7,5	450	0,20
275×206	372	0,36	20	3,3—4,2	100	0,20
275×206	392	0,36	20	3,3—4,2	250	0,30
400×300	454	0,34	25	4,1—5,2	100	0,25
400×300	454	0,34	25	4,1—5,2	250	0,35

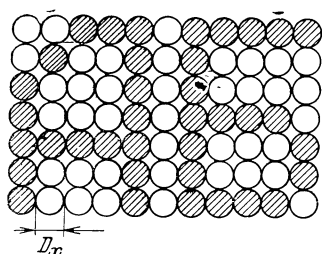


Рис. 1.28. К определению диаметра условного элемента  $D_x$  при воспроизведении знаков алфавита

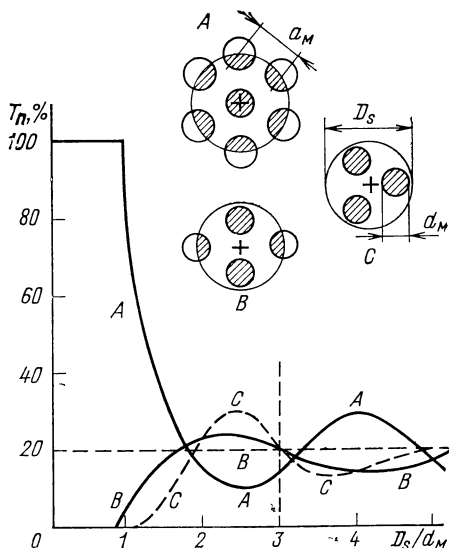


Рис. 1.29. К выбору параметров маски для кинескопов типа дисплей

Всего вдоль строки требуется воспроизвести  $N_x = 6 \times 80 = 480$  таких элементов. Задав длину строки  $l_x = 250$  мм, можно найти диаметр условного элемента  $D_x = l_x / N_x = 250 / 480 = 0,521$  мм.

Диаметр следа электронного луча на маске  $D_s$  может несколько превышать диаметр условного элемента  $D_x$ , т. е.  $D_s = K_1 D_x$  (где  $K_1 \approx 1,5$ ). След луча должен одновременно охватывать несколько (не менее трех) отверстий маски. Но при движении луча вдоль строки проходящая через маску доля луча  $T_n$  (отношение площади отверстий под лучом к площади следа луча) должна изменяться как можно меньше. На рис. 1.29 показаны зависимости  $T_n$  от отношения  $D_s/d_M$  для трех случаев: когда центр следа луча совмещен с центром отверстия маски (A), с центром ромба из четырех отверстий маски (B) и центром треугольника из трех отверстий (C). Видно, что при  $D_s/d_M \approx 3$  кривые B и C достаточно близки и соответствуют  $T_n \approx 20\%$ .

Если принять положение B за основное, то шаг отверстий

$$a_M = \frac{K_1 D_x}{\sqrt{3} + d_M/a_M}. \quad (1.7)$$

Принимая  $d_M/a_M = 0,45$ ;  $K_1 = 1,5$  и  $D_x = 0,521$  мм, получаем  $a_M = 0,35$  мм. Большинство известных кинескопов для дисплеев имеют шаг отверстий маски в пределах 0,30 ... 0,36 мм (табл. 1.7), хотя имеются сообщения о кинескопах с шагом маски 0,20 ... 0,25 мм [46].

Для уменьшения диаметра следа луча в центральной зоне экрана принимались разные меры. В первых кинескопах с треугольным расположением прожекторов фокусирующий электрод бипотенциальной линзы имел дополнительную диафрагму, что снижало общую долю анодного тока [43].

В последних конструкциях дисплей-кинескопов с линейным расположением прожекторов стали применять более сложные фокусирующие линзы (см. рис. 1.17). Для уменьшения сферической aberrации диаметр диафрагмы фокусирующего электрода был увеличен от 4,5 до 7 мм, между соседними отверстиями оставлены лишь тонкие перемычки (рис. 1.30,а). Для улучшения фокусировки на краевых зонах изображения используется динамическая подфокусировка — потенциал фокусирующего электрода меняется по параболическому закону на величину  $\Delta U_{\text{фз}}$ , зависящую от удаления  $r$  луча от центра экрана (рис. 1.30,б). Для улучшения сведения лучей применяется отклоняющая система комбинированного типа (рис. 1.30,в), где помимо седлообразных обмоток горизонтального СГ и вертикального СВ отклонения используется дополнительная тороидальная обмотка вертикального отклонения ТВ, расположенная на магнитном сердечнике МС [45 ... 47].

В будущем ожидается широкое внедрение вещательных систем ЦТ с повышенным стандартом разложения (около 1200 строк), а также развитие широкоформатного ЦТ с форматом кадра 5 : 3 и даже 2 : 1 (вместо обычного 4 : 3 или 5 : 4) [40, 41, 48]. Поэтому

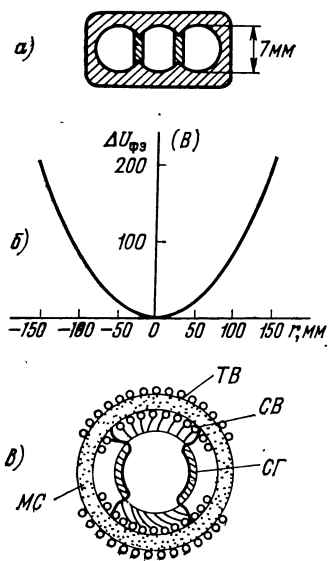


Рис. 1.30. Особенности кинескопов типа дисплей:

а — диафрагма фокусирующего электрода; б — динамическая подфокусировка; в — отклоняющая система

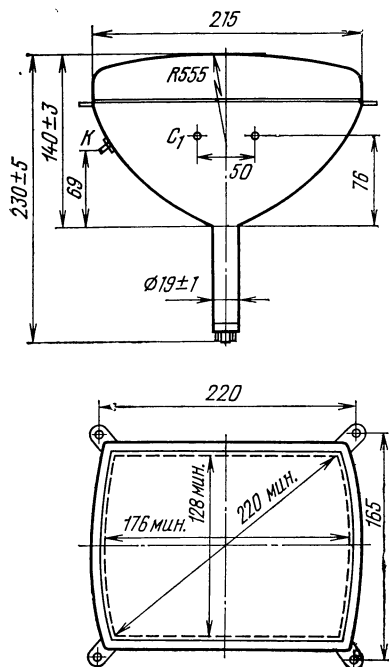


Рис. 1.31. Основные размеры одноплучевого хроматрона 25JK1Ц

разработка цветных кинескопов повышенной четкости актуальна не только для дисплеев, но и для перспективных систем ЦТ.

Кроме кинескопов высокого разрешения (с шагом маски 0,3 мм) стали разрабатываться кинескопы с повышенным разрешением (шаг маски 0,4 мм вместо обычного 0,6 мм) [45]. В целом разработка кинескопов повышенной четкости является весьма важным и перспективным направлением. Для воспроизводящих устройств с диагональю экрана 1 м и более разрабатываются проекционные системы с тремя кинескопами [49—51].

## 1.5. ДРУГИЕ ТИПЫ КИНЕСКОПОВ

**Недостатки масочных кинескопов.** Принципиальным недостатком всех масочных кинескопов является низкая прозрачность маски — примерно 20%. Это приводит к ограничению яркости экрана, поэтому приходится форсировать анодное напряжение и ток луча, что вызывает соответственно опасность рентгеновского излучения и затруднения в фокусировке. Не менее важно и то, что маска работает в тяжелом температурном режиме, так как на ней бесполезно теряется около 80% энергии электронного потока. Последнее обстоятельство, в свою очередь, создает дополнительные нежелательные явления, наиболее опасным из них является локальное вспучивание маски на отдельных ее участках [52]. Неоднородность прозрачности маски на различных ее участках, а также разброс прозрачности на разных экземплярах масок вызывают ряд трудностей, связанных с разбросом светотехнических параметров кинескопа и с условиями чистоты цветов [53... 58]. Другой особенностью масочных кинескопов является то, что в процессе производства маска и экран образуют связанную пару основных элементов конструкции — каждая маска неразлучна со своим экраном. Условия чистоты цветов масочных кинескопов чрезвычайно жесткие, и поэтому брак при массовом производстве все еще достаточно велик. Все эти обстоятельства продолжают стимулировать интерес к другим типам цветных кинескопов, несмотря на то, что масочные кинескопы до сих пор остаются единственным типом цветных кинескопов, освоением в массовом производстве.

**Трехлучевые кинескопы с фокусирующими масками.** Этот тип кинескопов конструктивно мало отличается от масочных — различие только в том, что маска электрически изолирована от оболочки кинескопа и имеет повышенный диаметр отверстий при пониженном потенциале (относительно экрана), обеспечивающем дополнительную фокусировку электронных лучей на участке маска — экран [1, с. 108]. Имеются сообщения о разработке кинескопов с фокусирующими масками, где экран, маска и конус оболочки имеют потенциалы 25, 12 и 13 кВ соответственно. В кинескопах с отклонением лучей  $110^\circ$  фирмы «Хитати» (с диагональю экрана 53 см и диаметром горловины 36,5 мм) для снижения вторичной эмиссии поверх алюминиевой пленки экрана наносилось углеродное покрытие [59]. Если паразитная засветка экрана вторичными электронами будет заметно ослаблена, то кинескопы с фокусирующей маской смогут успешно конкурировать с кинескопами, использующими обычную («теневую») маску.

**Однолучевые кинескопы.** Успехи в области самосведения трех лучей заметно ослабили интерес к однолучевым кинескопам. Все же индексные кинескопы

продолжают привлекать внимание из-за отсутствия чувствительности к паразитным магнитным полям и возможности применения в дисплеях [60].

Представляет интерес первый отечественный однолучевой хроматрон 25ЛК1Ц (рис. 1.31) [61]. При растре  $180 \times 130$  мм и штриховом экране типа RGBG обеспечивается яркость на белом около  $150 \text{ кд/м}^2$ . Сетка имеет 400 вертикальных нитей с шагом 0,4 мм, что дает четкость около 300 линий. Потенциал экрана и конуса оболочки 14 ... 16 кВ, потенциал сетки 3,5 ... 5 кВ, потенциал коммутации цветов около 200 В.

На базе этого кинескопа А. В. Смирновым были разработаны и испытаны оконечные устройства приемников системы СЕКАМ с построчной и поэлементной коммутацией цветов, а также проведены соответствующие исследования этих устройств [62]. Основные преимущества однолучевых хроматронов (перед трехлучевыми масочными кинескопами):

экономичность питания, высокая яркость, электрическая регулировка чистоты цветов, простота конструкции электронного прожектора;

возможность использования в малогабаритной аппаратуре ЦТ.

## ГЛАВА 2

### ВОПРОСЫ КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

---

#### 2.1. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ (СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА)

Вопросы воспроизведения крупных деталей цветного изображения в системах ЦТ основательно освещены в литературе (см. [12] и библиографию). Значительно меньше исследованы особенности цветопередачи мелких деталей, а также влияние структуры экранов кинескопов и принципа пространственного смещения цветов на воспроизведение мелких деталей цветных изображений.

Под мелкими деталями понимают детали размером от одного до четырех элементов, воспроизведение которых зависит от структурных особенностей экранов цветных кинескопов, а также в некоторых пределах от полосы частот в системах ЦТ. Исследовался вопрос о возможном сужении полосы частот. Основанием для сокращения полосы частот в ЦТ явились эксперименты, проводимые на ранней стадии разработки системы NTSC в 1951—1952 гг. [63, с. 336]. Наблюдатели сравнивали два изображения, одно было получено при передаче всех трех сигналов в полной полосе, другое — при сокращении полосы за счет эффекта смещения высоких частот. Сокращение полосы частот (до 25% от максимальной) оказалось почти незаметным на сюжетных изображениях, но обнаружилось на тест-таблицах. Поэтому реализуемое в современных системах ЦТ сокращение полосы цветоразностных сигналов можно оправдать не столько особенностями цветного зрения (пока все еще мало исследованными), но и статистикой передаваемых сюжетных изображений, где равнояркостные переходы между разноцветными мелкими деталями встречаются крайне редко.

Такие переходы исследовались в 1950 г. Бэдфордом [64] на оптической модели телевизионного изображения, где размытие вертикальных границ имитировалось зубчатыми переходами. Различимость черно-белого (Ч-Б) перехода принималась за 100%, при этом заметность перехода G-R (40%) оказалась почти вдвое меньше, чем у перехода R-Ч (90%) при равных уровнях яркости (22 кд/м<sup>2</sup>). Отсюда следует, что при отсутствии контраста по яркости размер равноярких деталей нужно удвоить, чтобы они стали различаться наблюдателем. Однако эти важные результаты, насколько известно, не проверялись на базе современных систем ЦТ.

Иногда утверждается, что в современных совместимых системах ЦТ мелкие детали воспроизводятся как черно-белые. Неточность такого предположения доказывается в [1, с. 25], это мнение стало разделяться в новых работах по системам ЦТ [65].

Важным является вопрос о влиянии дискретной структуры экранов цветных кинескопов на качество воспроизводимого изображения. Здесь можно отметить такие особенности:

при наблюдении изображений с близких расстояний может быть заметна структура экрана, особенно на крупных одноцветных деталях [1, с. 58];

разрешающая способность кинескопа ограничена конечным числом элементов экрана, количественные закономерности этого явления пока еще мало исследованы;

возможно образование ложных узоров (муаров) из-за интерференции между структурой экрана и строчной структурой раstra (растровые муары) или между структурой экрана и структурой мелких деталей изображения (сюжетные муары).

Наиболее обстоятельное исследование растровых муаров на точечном экране было проведено в работах Рамберга [66, см. также 4, с. 51]. Используя методы двумерного гармонического анализа, Рамберг показал, что период муаров зависит от угла поворота  $\theta$  горизонтальных рядов отверстий маски относительно строк раstra и от отношения  $h/a_m$  (где  $h$  — шаг строк раstra,  $a_m$  — шаг отверстий маски). Амплитуда муаров определяется только отношениями  $d_s/h$  и  $d_m/h$  ( $d_s$  — условный диаметр следа электронного

луча на экране,  $d_m$  — диаметр отверстий маски). Несмотря на общность задачи, результаты Рамберга и других авторов [67—69] оказались различными. Поэтому целесообразно дальнейшее изучение растровых и сюжетных муаров.

Также представляет интерес исследование характеристик зрения, связанных с пространственным смещением цветов на дискретных экранах цветных кинескопов. Простая модель пространственного смещения цветов, используемая далее, показана на рис. 2.1.

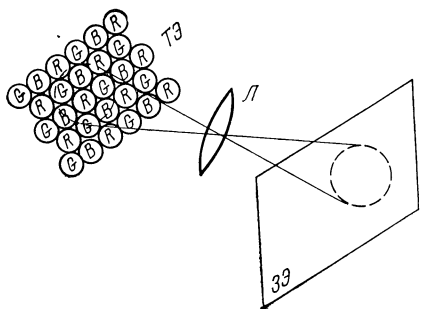


Рис. 2.1. Модель пространственного смещения цветов:

ТЭ — точечный экран; Л — линза; ЗЭ — зрительный экран

Цветное изображение с *точечного* экрана ТЭ, аналогичного экрану цветного кинескопа, проецируется на *зрительный* экран ЗЭ с помощью линзы *Л*. При оптимальной фокусировке линза может создать на зрительном экране точное подобие изображения на точечном экране. Но если линзу расфокусировать так, чтобы при сохранении общего характера изображения элементы ТЭ стали бы на экране ЗЭ неразличимыми, то получим модель эффекта пространственного смешения цветов при наблюдении изображений с экранов цветных кинескопов. Вблизи экрана можно различить его точечные элементы. Удаление глаз наблюдателя от экрана кинескопа создает эффект, аналогичный расфокусировке проекционной линзы.

## 2.2. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ШТРИХОВОГО ЭКРАНА НА КАЧЕСТВО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Вертикальная ориентация штрихового экрана используется в современных кинескопах со щелевой маской, а также в хроматронах и индексных кинескопах. Эффект одномерной дискретизации здесь можно представить в виде модели, где перед сплошным экраном кинескопа (как в ЧБТ) расположен растровый фильтр из вертикальных пробелов, имеющих ширину  $p$  и шаг  $a$  (рис. 2.2). Каждый из трех каналов идеальной системы ЦТ будет аналогичен каналу ЧБТ, отличаясь от него только наличием сплошного светофильтра 3 на передающей стороне и растрового светофильтра 7 на приемной.

В качестве объекта передачи рассмотрим синусоидальные миры с периодом  $\lambda_0$ , чему соответствует пространственная круговая частота  $\omega_0 = 2\pi/\lambda_0$ . Для такой миры сигналы всех строк одинаковы и достаточно рассмотреть сигнал одной строки.

Исходное изображение  $F(x)$  уже учитывает влияние основных звеньев передающей стороны — объектива 2, передающей трубки 4 и видеусилителей 5 с гамма-коррекцией  $\Gamma K$ . Предполагается, что эти звенья удовлетворяют обычным требованиям и обеспечивают на кинескопе 6 высокое качество изображения с четкостью не хуже 600 линий. Это исходное изображение можно представить со-

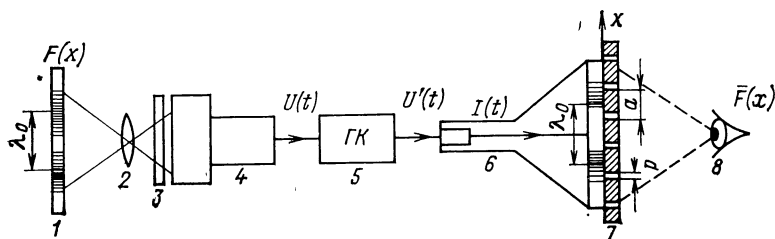


Рис. 2.2. Система ЦТ с одномерной дискретизацией изображения:

1 — объект (мира); 2 — объектив; 3 — светофильтр; 4 — передающая трубка; 5 — гамма-корректор; 6 — кинескоп; 7 — растровый фильтр; 8 — глаз

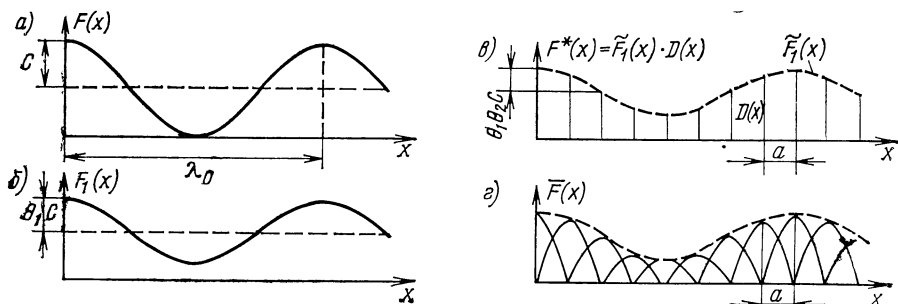


Рис. 2.3. Оптические сигналы в системе с одномерной дискретизацией:

$a$  — исходное изображение (синусоидальная волна);  $b$  — ослабление амплитуды из-за влияния апертуры луча;  $c$  — дискретизация выборками (полосками экрана) с шагом  $a$ ;  $d$  — восстановление изображения глазом наблюдателя

ответствующей косинусоидой с периодом  $\lambda_0$  и амплитудой  $c$  (рис. 2.3,  $a$ ).

В дальнейшем для анализа будем применять методы, используемые в современной теории связи для исследования передачи дискретных сообщений [70, 71], что позволяет получить результаты в простой и легко обзримой форме.

Апертура электронного луча кинескопа действует аналогично фильтру, ослабляющему высокие частоты. Поэтому изображение, «профильтрованное» апертурой луча (т. е. на кинескопе ЧБТ со сплошным экраном), можно выразить в виде свертки

$$F_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) G_1(x-t) dt = F(x) \otimes G_1(x), \quad (2.1)$$

где  $\otimes$  — символ операции свертки;  $G_1(x)$  — распределение плотности тока в сечении электронного луча. Обычно [66]

$$G_1(x) = \exp[-(x/r_e)^2]/r_e \sqrt{\pi}, \quad (2.2)$$

где  $r_e$  — условный радиус сечения луча на уровне  $1/e$  от максимума. Изображение на сплошном экране кинескопа  $F_1(x)$  будет иметь яркостную амплитуду  $C\theta_1$ , где  $\theta_1$  выражает ослабление контраста из-за апертуры луча (рис. 2.3,  $b$ ). Это изображение наблюдается через растровый фильтр, прозрачность каждого штрихового элемента которого

$$A(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq p/2, \\ 0, & |x| > p/2. \end{cases} \quad (2.3)$$

Но глаз не должен видеть структуру фильтра. Все лучи (электронные или световые), прошедшие через штриховой элемент (например, через щелевое отверстие маски), суммируются и определяют яркость соответствующего элементарного участка изображения. «Профильтрованное» щелями маски изображение  $F_1(x)$  выразится другой сверткой:

$$\tilde{F}_1(x) = F_1(x) \otimes A(x). \quad (2.4)$$

Синусоидальной мире будет соответствовать яркостная синусоида с амплитудой  $C\theta_1\theta_2$ , т. е. контраст здесь ослаблен совместным влиянием апертуры луча  $\theta_1$  и апертуры маски  $\theta_2$  (рис. 2.3,в).

Дискретизирующая функция  $D(x)$ , определяющая положение центров щелей маски с шагом  $a$ , может быть выражена с помощью дельта-функций  $\delta$  следующим образом:

$$D(x) = \delta_a(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x - ka). \quad (2.5)$$

Эта функция, будучи умножена на  $F_1(x)$ , порождает периодические отсчеты (выборки), показанные на рис. 2.3,в вертикальными линиями. Иначе говоря, произведение указанных функций образует последовательность  $\delta$ -импульсов, следующих через равные промежутки и имеющих интенсивности (т. е. площади), равные значениям функции  $F_1(x)$  в соответствующих точках  $x = ka$  [71, с. 72].

В результате получим дискретизированное щелями маски «изображение», описываемое выражением

$$F^*(x) = \tilde{F}_1(x) D(x). \quad (2.6)$$

Но это еще не изображение в строгом смысле слова, так как вблизи оно воспринимается, как ряд светящихся линий. При наблюдении с обычных расстояний глаз будет играть роль фильтра нижних частот, который восстановит яркостный сигнал по отсчетам дискретизированной функции  $F^*(x)$  (рис. 2.3,г). Следовательно, глаз можно уподобить апертуре с весовой функцией  $G_2(x)$ , и тогда видимое изображение определится сверткой

$$\bar{F}(x) = F^*(x) \otimes G_2(x). \quad (2.7)$$

Все рассмотренные преобразования, определяющие видимое глазом изображение  $\bar{F}(x)$ , можно объединить в общей формуле:

$$\bar{F}(x) = \{[F(x) \otimes G_1(x) \otimes A(x)] D(x)\} \otimes G_2(x). \quad (2.8)$$

Влияние отдельных звеньев иллюстрируется на рис. 2.4,а (здесь сверху показаны звенья, входящие в операцию свертки, внизу — в операцию умножения). Соответствующие выражения даны в табл. 2.1,

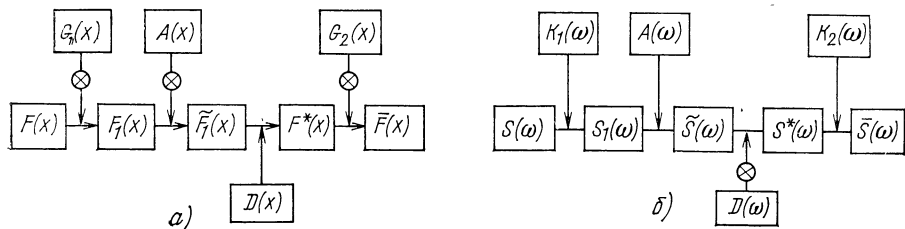


Рис. 2.4. Связь между основными элементами воспроизводящей системы:  
а — видимая область; б — спектральная область

Используя преобразование Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x) e^{-i\omega x} dx, \quad (2.9)$$

можно построить схему рассматриваемой одномерной дискретизации в области спектрального пространства (рис. 2.4,б). При этом операции свертки в видимой области соответствует операция умножения в спектральной области. Наоборот, операции умножения соответствует в спектральной области операция свертки (с множителем  $1/2\pi$ ).

В результате все преобразования в спектральной области можно объединить общей формулой:

$$\bar{S}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \{ [S(\omega) K_1(\omega) A(\omega)] \otimes D(\omega) \} K_2(\omega). \quad (2.10)$$

Соответствующие формулы для спектров отдельных звеньев приводятся в табл. 2.1 [71].

Т а б л и ц а 2.1. Основные элементы систем одномерной дискретизации и их спектры

Элементы	Видимая область $f(x)$	Спектральная область $S(\omega)$
Исходный сигнал	$F(x) = C \cos \omega_0 x$	$S(\omega) = C\pi \delta(\omega \pm \omega_0)$
Апертура луча кинескопа	$G_1(x) = \frac{\exp[-(x/r_e)^2]}{r_e \sqrt{\pi}}$	$K_1(\omega) = \exp[-(r_e \omega/2)^2]$
Центры щелей маски	$D(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(x - ka)$	$D(\omega) = \omega_a \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - m\omega_a)$
Апертура щели маски	$A(x) = \begin{cases} 1, &  x  \leq p/2, \\ 0, &  x  > p/2 \end{cases}$	$A(\omega) = p \text{Sa}(p\omega/2)$

В частности,  $K_1(\omega)$  выражает частотную характеристику апертуры луча (типа кривой Гаусса);  $A(\omega)$  соответствует частотной характеристике прямоугольной апертуры (сходные характеристики хорошо известны в теории системы ЧБТ [72 ... 74]).

Менее изучены частотные характеристики глаза  $K_2(\omega)$ . Согласно данным [75] их можно представить кривой Гаусса вида

$$K_2(\omega) = \exp[-(k_R \omega / \omega_{кр})^2], \quad (2.11)$$

где  $k_R$  — пропорционально отношению  $R/H$  ( $R$  — дистанция наблюдения,  $H$  — высота изображения);  $\omega_{кр}$  — критическая частота, соответствующая порогу различения  $\Delta_0 = 0,10 \dots 0,15$  (см. рис. 2.5).

Подставив в формулу (2.10) выражения для спектров из табл. 2.1, получим

$$\bar{S}(\omega) = K_2(\omega) \frac{C \pi p}{a} \{ \delta(\omega \pm \omega_0) \exp[-(r_e \omega/2)^2] \text{Sa}(p\omega/2) \} \otimes \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - m\omega_a). \quad (2.12)$$

Здесь и далее использовано обозначение  $\text{Sa}(x) = \sin x/x$ . Выполняя операции свертки с учетом свойств дельта-функций

$$f(x) \delta(x-a) = f(a) \delta(x-a),$$

$$\delta(x-x_1) \otimes \delta(x-x_2) = \delta(x-x_1-x_2),$$

получаем окончательное выражение для спектра видимого изображения:

$$\bar{S}(\omega) = C_1 K_2(\omega) \exp[-(r_e \omega_0/2)^2] \text{Sa}(p\omega_0/2) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - m\omega_a \pm \omega_0), \quad (2.13)$$

где  $C_1 = C\pi p/a$ ;  $\omega = 2\pi/\lambda$ ;  $\omega_0 = 2\pi/\lambda_0$ ;  $\omega_a = 2\pi/a$ . Выражение (2.13) описывает частотные характеристики для всех типов цветных кинескопов с вертикальным штриховым экраном. Сравнение разных типов этих кинескопов будет дано ниже. Рассмотрим общие свойства спектров, вытекающие из (2.13).

На рис. 2.6 показаны спектры, соответствующие формуле (2.13). Частотная характеристика глаза идеализирована прямоугольным фильтром  $K_2(\omega)$ . Спектр состоит из основной ( $m=0$ ) и побочных ( $m=\pm 1, \pm 2$  и т. д.) составляющих, разнесенных по оси частот на  $\omega_a$  и одинаковых по величине. Последнее обусловлено тем, что дискретизация производится предельно узкими выборками в виде дельта-функций с частотой  $\omega_a$ .

Возможны два случая: перекрытие спектров отсутствует; спектры перекрываются.

Первый случай (рис. 2.6, а) имеет место, когда максимальная частота исходного сигнала  $\omega_{0 \text{ макс}}$  меньше критической частоты  $\omega_a/2$ . В этом случае муары отсутствуют, а разрешающая способность кинескопа определяется частотой  $\omega_R$ , соответствующей уровню  $\Delta_0$ .

Перекрытие соседних спектров (рис. 2.6, б) имеет место, когда  $\omega_0 > \omega_a/2$ . В этом случае образуются «сюжетные» муары из-за биений между структурой щелей маски и высокочастотными составляющими сигнала. Пространственная частота  $\Omega = 2\pi/\Lambda$  и длина волны  $\Lambda$  таких муаров определяются соотношениями

$$\Omega = \omega_0 - \omega_a; \quad 1/\Lambda = 1/\lambda_0 - 1/a. \quad (2.14)$$

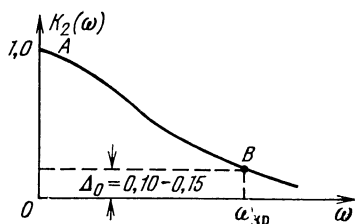


Рис. 2.5. Частотная характеристика глаза

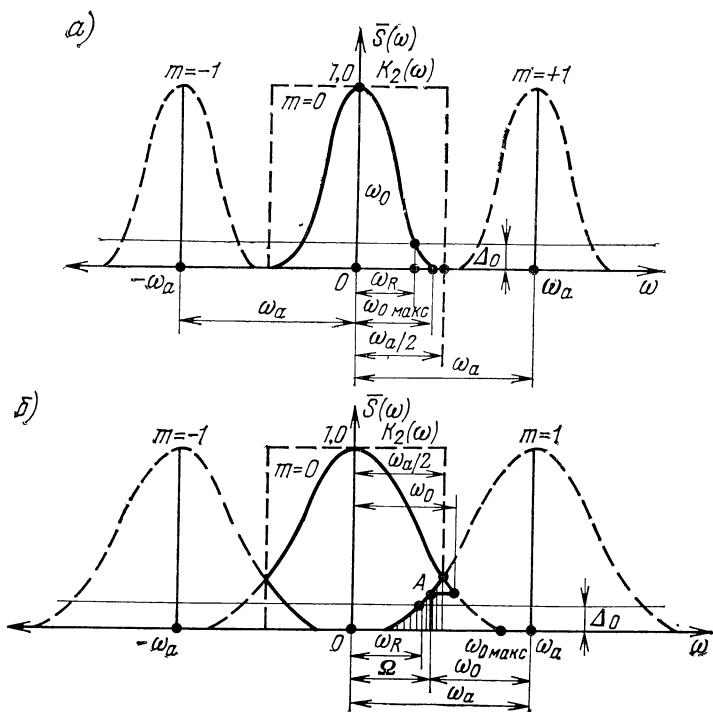


Рис. 2.6. Типовые спектры изображений:  
а — отдельные; б — перекрывающиеся

Вместо высокочастотных сигналов воспроизводятся биения разностных частот  $\omega_0 - m\omega_a$ ; низкочастотные составляющие биений образуют видимые на экране муары, так как эти составляющие попадают в пределы полосы частотной характеристики глаза.

Разрешающая способность  $\omega_R$  определяется уровнем  $\Delta_0$  (обычно 0,10 ... 0,15), ниже которого биения практически незаметны из-за малого контраста. Практически следует стремиться к минимальному перекрытию спектров — чтобы точка пересечения А находилась на уровне ниже критического  $\Delta_0$ .

### 2.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕСКОПОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ШТРИХОВЫМ ЭКРАНОМ

Сравним разные типы цветных кинескопов, имеющих вертикальный штриховой экран (масочные, хроматроны, индексные), по их горизонтальной разрешающей способности и по уровню муаров.

Из общей формулы частотного спектра видимого глазом изображения на экране кинескопа (2.13), полагая  $m=0$ , получаем выражение для амплитуды полезной составляющей яркостного сиг-

нала, как функции параметра  $\varepsilon = \omega_0/\omega_a = a/\lambda_0$ , характеризующего относительную частоту рассматриваемого сигнала. В результате получим

$$A_0(\varepsilon) = AK_2(\varepsilon) \exp[-(\pi r_e \varepsilon/a)^2] \text{Sa}(\pi p \varepsilon/a) = AK_2(\varepsilon) \theta_1(\varepsilon) \theta_2(\varepsilon), \quad (2.15)$$

где  $A = \text{const}$ .

Амплитуда паразитных составляющих (муаров) определится аналогично, если положить  $m=1$  и ввести параметр  $\varepsilon' = 1 - \varepsilon$ , тогда

$$\begin{aligned} A_1(\varepsilon) &= AK_2(\varepsilon) \exp[-(\pi r_e \varepsilon'/a)^2] \text{Sa}(\pi p \varepsilon'/a) = \\ &= AK_2(\varepsilon) \theta_1(\varepsilon') \theta_2(\varepsilon'). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Сомножитель  $\theta_1$  характеризует влияние частотной характеристики апертуры луча кинескопа (рис. 2.7).

Отношение  $r_e/a$  должно быть минимально у индексных кинескопов, где пятно не должно возбуждать одновременно две соседние полоски экрана, т. е. требуется, чтобы  $r_e/a \leq 0,2$  (в реальных индексных кинескопах обычно  $r_e/a = 0,3 \dots 0,5$ ).

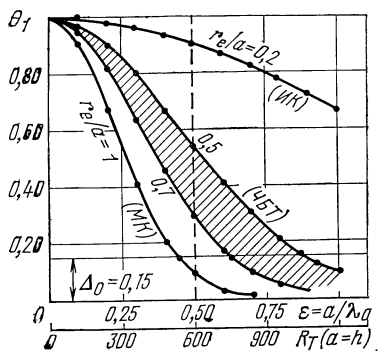


Рис. 2.7

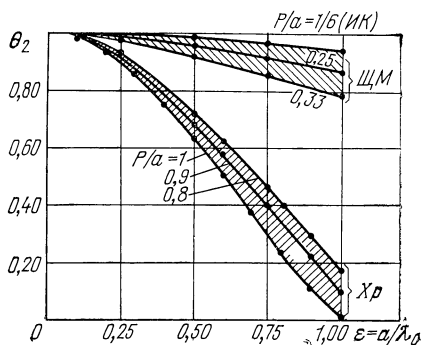


Рис. 2.8

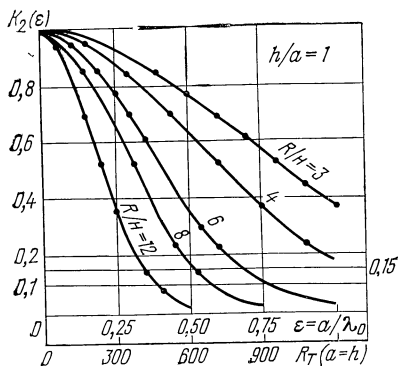


Рис. 2.9

Рис. 2.7. Характеристики апертуры луча

Рис. 2.8. Характеристики экранного узла

Рис. 2.9. Частотные характеристики глаза при разных  $R/H$

Напротив, у масочных кинескопов нередко имеет место отношение  $r_e/a=1$ , так как при больших токах луча его трудно сфокусировать. Обычно стремятся к отношению  $r_e/a=0,5 \dots 0,7$  (как в кинескопах ЧБТ), чтобы обеспечить разрешающую способность около 600 линий по тест-таблице 0,249.

Будем далее считать «нормальным» шаг штрихового экрана, равный шагу строк раstra, т. е.  $a=h$ . Тогда при  $\varepsilon=0,5$  продольная разрешающая способность соответствует «нормальной» разрешающей способности телевизионной системы в поперечном направлении [74]. Последняя может считаться равной видимому числу строк раstra  $z_a=575$  (округленно 600). Тогда получим следующую связь между продольной (горизонтальной) разрешающей способностью цветного кинескопа  $R_T$  и относительной частотой  $\varepsilon=\omega_0/\omega_a$ :

$$R_T = 2 \varepsilon z_a h/a \approx 1200 \varepsilon h/a. \quad (2.17)$$

На рис. 2.7 по горизонтальной оси отложены как значения относительной частоты  $\varepsilon$ , так и значения  $R_T$  при «нормальном» соотношении  $a=h$ .

Сомножитель  $\theta_2=Sa(\pi \varepsilon r/a)$  характеризует влияние относительной прозрачности  $p/a$  экранного узла кинескопа на его частотные характеристики (рис. 2.8). Для индексных кинескопов ИК обычно  $p/a=1/6$ ; для кинескопов со шелевой маской ШМ относительная прозрачность находится в пределах  $0,20 \dots 0,25$  (теоретический максимум равен  $1/3$ ). Для хроматронов Хр прозрачность сетки обычно  $p/a=0,8 \dots 0,9$  (теоретический максимум равен  $1,0$ ).

Различие между восприятием паразитной и полезной составляющих, выражаемых формулами (2.15) и (2.16), соответственно определяется также частотной характеристикой глаза  $K_2(\varepsilon)$ . Частотную характеристику глаза (2.11) в виде кривой Гаусса (см. рис. 2.5) удобно выразить соотношением, где фигурирует отношение дистанции наблюдения  $R$  к высоте изображения  $H$ , а также отношение шага строк  $h$  к шагу одноцветных полос экрана  $a$ :

$$K_2(\varepsilon) = \exp \left[ - \left( \frac{1}{3} \frac{R}{H} \frac{h}{a} \varepsilon \right)^2 \right]. \quad (2.18)$$

Соответствующие кривые для разных значений  $R/H$  (при  $h=a$ ) показаны на рис. 2.9. Нормальным будем считать отношение  $R/H=6$ , при котором глаз хорошо различает отметку 600 линий тест-таблицы, но не различает строчной структуры раstra и вертикальной структуры экрана (что соответствует отметке 1200).

Выражение (2.18) характеризует разрешение глазом штриховых элементов экрана или тест-таблицы. При увеличении шага полосок экрана вдвое ( $a=2h$ ) разрешение их увеличится так, как если бы отношение  $R/H$  уменьшилось вдвое (т. е. вместо  $R/H=6$  будет  $R/H=3$  и т. д.).

Пользуясь выражениями (2.15) и (2.16), можно построить частотные характеристики основной и «муаровой» составляющих разных типов цветных кинескопов. Они будут отличаться разными параметрами апертуры луча  $r_e/a$  и экранного узла  $p/a$ , а также мо-

гут зависеть от условий наблюдения, определяемых частотной характеристикой глаза  $K_2(\varepsilon)$  (например, из-за разных отношений  $h/a$ ).

На рис. 2.10,а показаны частотные характеристики кинескопа со щелевой маской при  $p/a=0,2$ ;  $r_e/a=0,7$ ;  $R/H=6$ ;  $a=h$ . Видно, что при этом амплитуда муаров  $A_1(\varepsilon)$  не превышает критического уровня  $\Delta_0=0,15$ . На рис. 2.10,б показаны аналогичные характеристики, но при более резкой фокусировке луча ( $r_e/a=0,5$ ), что приводит к заметному увеличению уровня муаров. Поэтому для уменьшения заметности сюжетных муаров в кинескопах со щелевой маской следует избегать резкой фокусировки луча, т. е. выполнять условие  $r_e/a \geq 0,7$ , что практически и имеет место.

В кинескопах типа хроматрон заметность муаров весьма мала. На рис. 2.11 показаны частотные характеристики однолучевого хроматрона типа 25ЛК1Ц, где сетка имеет около 400 вертикальных нитей и поэтому горизонтальное разрешение не более 300 линий. Действительно, при  $p/a=0,8$ ;  $r_e/a=0,7$ ;  $R/H=6$ ;  $a=2h$  из рис. 2.11 имеем, что разрешение для основной составляющей  $A_0(\varepsilon)$  на критическом уровне  $\Delta_0=0,15$  около 300 линий. Но амплитуда муаров  $A_1(\varepsilon)$  здесь также не превосходит критического уровня  $\Delta_0=0,15$ , т. е. муары практически незаметны даже при сетке с шагом  $a=2h$ .

Малая заметность муаров в хроматронах объясняется тем, что здесь в произведении  $\theta_1\theta_2$  основную роль играет второй сомножитель, в то время как в масочных кинескопах — первый (см. рис. 2.7 и 2.8). Поэтому в масочных кинескопах могут наблюдаться муары на темных участках изображения, где радиус электронного пятна  $r_e$  меньше, чем на светлых участках. В хроматронах из-за больших значений отношения  $p/a=0,8 \dots 1,0$  величина  $\theta_2$  всегда достаточно мала, и поэтому муары практически незаметны как на светлых, так и на темных участках изображения.

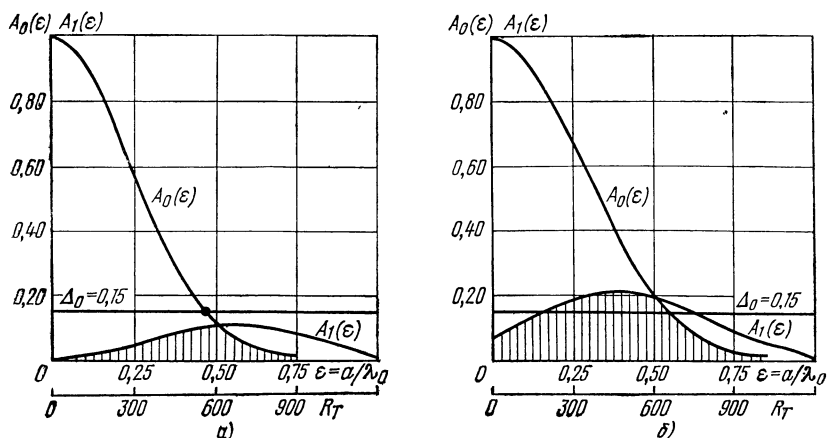


Рис. 2.10. Характеристики масочного кинескопа:

а — нерезкая апертура луча ( $r_e/a=0,7$ ); б — резкая апертура луча ( $r_e/a=0,5$ )

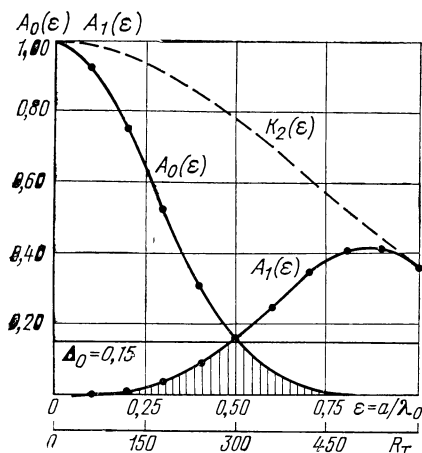


Рис. 2.11. Характеристики хроматрона ( $a=2h$ ,  $R/H=6$ )

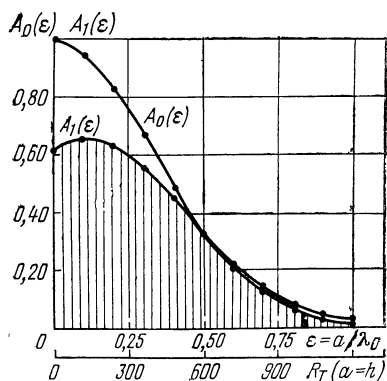


Рис. 2.12. Характеристики индексного кинескопа ( $a=h$ ,  $R/H=6$ ,  $p/a=1/6$ )

Напротив, в индексных кинескопах муары очень заметны, а при острой фокусировке луча ( $r_e/a=0,2$ ) могут даже полностью подавить полезное изображение (см. рис. 2.12). Аналогичный эффект можно моделировать на фототелеграфной системе при резкой фокусировке [76]. В реальных образцах индексных кинескопов отношение  $r_e/a$  находится обычно в пределах  $0,3 \dots 0,4$ , но при этом страдает насыщенность основных цветов. Поэтому противоречие между насыщенностью цветов и склонностью к муарам является принципиальным недостатком индексных кинескопов. Заметность муаров здесь также зависит от передаваемого сюжета. Муары заметнее на одноцветных мелких деталях или при воспроизведении цветов, где преобладает яркостный вклад одного из основных цветов — обычно зеленого [77].

В результате сравнительного анализа разных типов цветных кинескопов, имеющих вертикальный штриховой экран, можно сделать следующие выводы:

горизонтальная разрешающая способность определяется числом одноцветных штриховых элементов экрана, которое должно быть не менее 800, чтобы обеспечить нормальное разрешение вдоль строки, равное разрешению в поперечном (вертикальном) направлении;

при равном числе полос экрана заметность муаров будет наименьшей у кинескопов типа хроматрон (однолучевых или трехлучевых). Объясняется это высокой прозрачностью сетки ( $p/a \geq 0,8$ );

наиболее заметны муары у индексных кинескопов — особенно на одноцветных деталях. Объясняется это тем, что для получения насыщенных основных цветов относительный радиус апертуры электронного луча здесь должен быть достаточно мал ( $r_e/a \approx 0,2$ );

кинескопы со щелевой маской по заметности муаров занимают промежуточное положение между индексными кинескопами и хроматронами, здесь сюжетные муары могут быть заметны на темных участках изображения (т. е. при уменьшении апертуры луча  $r_e/a \approx 0,5$ ).

Для практической оценки разрешающей способности и заметности муаров в цветных кинескопах следует пользоваться испытательными таблицами с зонами Френеля, так как обычные тест-таблицы со штриховыми элементами мало пригодны из-за муаров. Примером может служить тест-таблица ЛЭТИ [78, с. 28].

## 2.4. ОСОБЕННОСТИ ДВУМЕРНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Общие положения.** Рассмотренная выше схема анализа влияния одномерной дискретизации структуры экрана кинескопа на качество изображения (см. рис. 2.4) может быть перенесена и на случай двумерной дискретизации — например, для масочных кинескопов с точечным экраном. В этом случае используется двумерное преобразование Фурье

$$S(\omega, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(\omega x + \nu y)} dx dy, \quad (2.19)$$

позволяющее получить спектры воспроизводящей системы, т. е. частотные характеристики кинескопа с учетом свойств глаза, аналогичные выражениям (2.10) и (2.13). Но теперь воспроизведение изображений будет характеризоваться не только в направлении оси экрана  $OX$  (т. е. вдоль строк), чему на спектре соответствует ось  $\omega$ , но и в направлении  $OY$  (поперек строк), чему на спектре соответствует ось  $\nu$ . Это также дает возможность определить показатели качества изображения (четкость, муары) и в любом другом направлении, например вдоль диагонали экрана. Иначе говоря, вместо одной оси  $OX$  (как при одномерной дискретизации) можно получить множество осей в любом направлении и в каждом из них можно построить «сечение» спектров, аналогичное рис. 2.6.

В качестве исходного сигнала будем снова рассматривать пространственные синусоиды, шаг которых равен  $\lambda_0$ . Но в отличие от одномерного случая здесь гребни синусоид могут располагаться

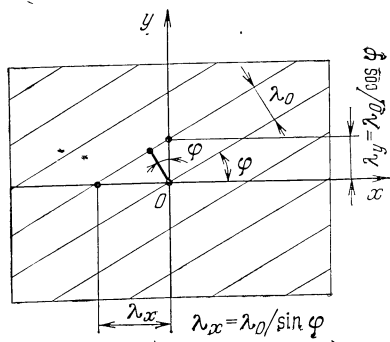


Рис. 2.13. Штриховая мира с периодом  $\lambda_0$  и наклоном штрихов под углом  $\varphi$  к строкам раstra

горизонтально ( $\varphi=0$ ), вертикально ( $\varphi=90^\circ$ ) или под любым углом  $\varphi$  относительно строк раstra (рис. 2.13). При этом в направлении оси  $OX$  расстояние между гребнями синусоид  $\lambda_x = \lambda_0 / \sin \varphi$ , а в направлении оси  $OY$  —  $\lambda_y = \lambda_0 / \cos \varphi$ .

По аналогии с формулой (2.2) апертура луча кинескопа может быть выражена двумерной функцией Гаусса

$$G(x, y) = \exp \left[ -(x^2 + y^2) / r_e^2 \right] / \pi r_e^2. \quad (2.20)$$

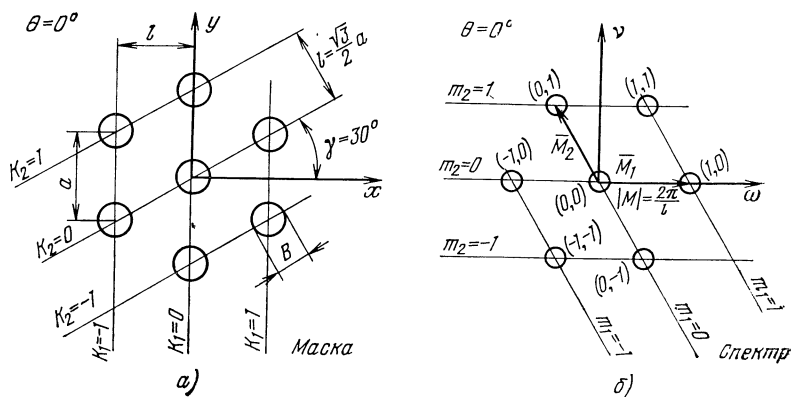
Соответствующий спектр при преобразовании вида (2.19)

$$K(\omega, \nu) = \exp \left[ -(r_e/2)^2 (\omega^2 + \nu^2) \right]. \quad (2.21)$$

Указанный подход к исследованию изображений на экранах цветных кинескопов с двумерной дискретизацией позволяет получать частотные характеристики кинескопов в виде сечений соответствующих спектров. Опуская промежуточные выкладки [см. 79—81], рассмотрим основные результаты для наиболее важных для практики случаев.

**Масочный кинескоп с точечным экраном.** На рис. 2.14,а показана структура отверстий маски ( $B$  — диаметр отверстий,  $a$  — шаг), а на рис. 2.14,б — соответствующий спектр. Видно, что спектр соответствует структуре отверстий, повернутой на  $90^\circ$ . Объясняется это тем, что минимальному расстоянию  $l$  между рядами отверстий маски в направлении  $OX$  соответствует максимальное расстояние между соседними спектрами  $2\pi/l$  в направлении оси  $\omega$ . Центры отверстий маски расположены в точках пересечения двух семейств параллельных линий, расположенных под углом  $60^\circ$ . На рис. 2.14,а показаны три вертикальные линии ( $K_1 = -1, 0, 1$ ) и три «косые» линии ( $K_2 = -1, 0, 1$ ). На спектре (рис. 2.14,б) им соответствуют горизонтальные линии ( $m_2 = -1, 0, 1$ ) и «косые» линии ( $m_1 = -1, 0, 1$ ). В точках пересечения этих линий находятся центры спектров.

Спектр изображения, воспроизводимого масочным кинескопом с точечным экраном (без учета характеристик глаза), показан на



**Рис. 2.14.** К определению спектра маски с круглыми отверстиями:  
а — структура маски; б — спектр маски

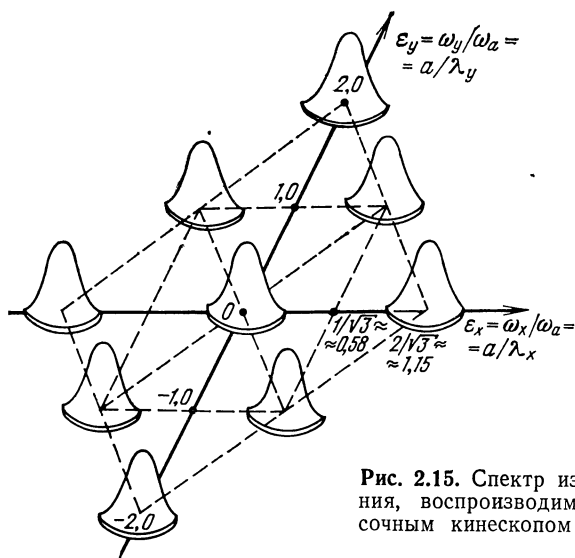


Рис. 2.15. Спектр изображения, воспроизводимого массочным кинескопом

рис. 2.15. Он состоит из основной (центральной) и соседних составляющих (которых всего восемь) одинаковой величины. Каждая такая составляющая имеет форму колокола и определяется в основном апертурой луча кинескопа в соответствии (2.21). Чем меньше апертура луча, тем шире будет каждый «колокол». Если апертура луча не слишком мала ( $r_e/h \geq 0,6$ ), то спектры практически не перекрываются и сюжетные муары отсутствуют. По мере уменьшения апертуры луча будет увеличиваться ширина спектральных составляющих. При этом в первую очередь произойдет сближение спектров по горизонтальной оси, а в последнюю — по вертикальной. На рис. 2.15 по осям отложены отношения

$$\epsilon_x = \omega_x/\omega_a = a/\lambda_x; \quad \epsilon_y = \omega_y/\omega_a = a/\lambda_y, \quad (2.22)$$

где  $\omega_x = 2\pi/\lambda_x$ ,  $\omega_y = 2\pi/\lambda_y$  ( $\lambda_x$  и  $\lambda_y$  соответствуют рис. 2.13).

Рассмотрим разрешающую способность кинескопа в горизонтальном и вертикальном направлениях. На рис. 2.16 показаны частотные характеристики воспроизводящей системы с массочным кинескопом для вертикального  $a$  и горизонтального  $b$  направлений. Пунктиром показаны кривые, не учитывающие характеристику глаза. Отношения основных параметров  $r_e/a = 0,7$  и  $b/a = 0,4$  близки к типовым значениям.

При нормальном шаге маски  $a=h$  можно выразить значения вертикальной  $R_{TV}$  или горизонтальной  $R_{TH}$  разрешающей способности, используя формулу (2.17). Для основной составляющей получим выражение

$$A_1(\epsilon) = \frac{2J_1(\pi \epsilon B/a)}{\pi \epsilon B/a} \exp[-(\pi \epsilon r_e/a)^2], \quad (2.23)$$

где  $J_1$  — функция Бесселя первого порядка.

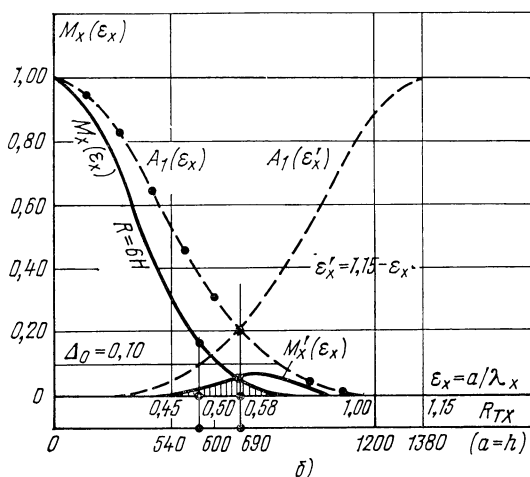
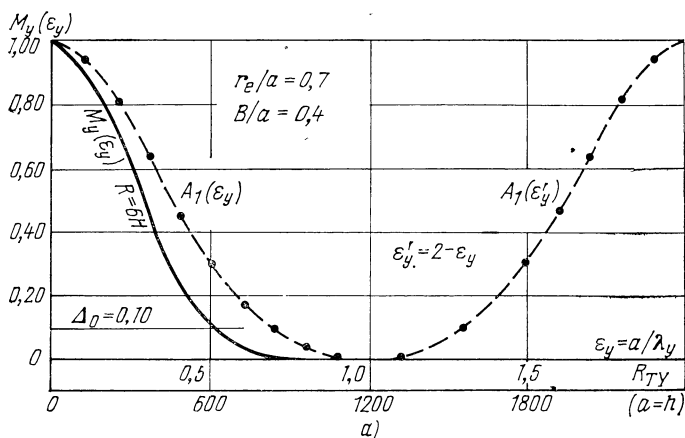


Рис. 2.16. Частотные характеристики масочного кинескопа:  
а — в вертикальном направлении; б — в горизонтальном направлении

Для боковых составляющих (т. е. для соседних спектров)  $A_1(\epsilon'_x)$  и  $A_1(\epsilon'_y)$  в соответствии с рис. 2.15 принимаем

$$\epsilon'_x = 1,15 - \epsilon_x; \quad \epsilon'_y = 2 - \epsilon_y. \quad (2.24)$$

Частотную характеристику глаза считаем одинаковой для горизонтального и вертикального направлений, т. е.  $K_2(\epsilon_x) = K_2(\epsilon_y)$ , и определяем ее по формуле (2.18), полагая  $R/H = 6$ . Умножая значения основной и боковой составляющих спектра на частотные характеристики глаза, получаем

$$M(\epsilon) = K_2(\epsilon) A_1(\epsilon); \quad M'(\epsilon) = K_2(\epsilon) A'(\epsilon'). \quad (2.25)$$

Соответствующие кривые показаны на рис. 2.16 сплошными линиями.

На рис. 2.16,а спектры не перекрываются, вертикальная разрешающая способность (на уровне  $\Delta_0=0,10$ ) равна 600 линий. На рис. 2.16,б небольшое перекрытие спектров приводит к некоторому снижению разрешающей способности до 540 линий, что составляет 90% от вертикальной разрешающей способности.

В приведенном анализе отверстия маски кинескопа рассматриваются не как «окна», через которые наблюдаются участки изображения, а как дополнительные апертуры, в пределах которых интегрируется действие всех лучей (аналогичные отверстиям диска Нипкова).

**Наклонная ориентация штрихового экрана.** Ранее был рассмотрен штриховой экран с вертикальной ориентацией его элементов. Рассмотрим теперь кинескоп, где щелевая маска с шириной щели  $p$  и шагом  $a$  расположена так, что оси щелей маски и полосок штрихового экрана повернуты на угол  $\alpha$  относительно вертикальной оси  $OY$  (рис. 2.17).

Точки пересечения наклонных осей полосок экрана с горизонтальными осями строк раstra образуют центры системы двумерной дискретизации. В вертикальном направлении шаг такой системы определяется шагом строк раstra  $h$ , в горизонтальном —  $a_x = a/\cos \alpha$ . В качестве исходного изображения будем снова рассматривать синусоидальную мишу, где гребни синусоид расположены под углом относительно горизонтальной оси  $OX$  (рис. 2.13).

Проведя анализ с использованием двумерного преобразования Фурье (2.19) [64], получаем для наблюдаемого глазом на экране кинескопа изображения

$$\bar{F}(x, y) = K_2(\omega, \nu) \theta_1 \theta_2 \exp[i(\omega x + \nu y)], \quad (2.26)$$

где  $K_2(\omega, \nu)$  — двумерная частотная характеристика глаза;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — множители, определяющие частотные характеристики апертуры луча и структуры щелей маски соответственно;

$$\omega = -\omega_0 \sin \varphi + k \omega_a \cos \alpha = -2\pi/\lambda_x + k 2\pi/a_x; \quad (2.26a)$$

$$\nu = \omega_0 \cos \varphi + n \omega_h + k \omega_a \sin \alpha = 2\pi/\lambda_y + n 2\pi/h + k 2\pi/a_y. \quad (2.26b)$$

Здесь использованы обозначения

$$\omega_0 = 2\pi/\lambda_0; \quad \omega_a = 2\pi/a; \quad \omega_h = 2\pi/h.$$

Значения  $\omega$  и  $\nu$  определяют пространственные частоты в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно при разных сочетаниях целочисленных значений  $n$  и  $k$ . В частности, при  $n = k = 0$  получим основные гармоники исходного изображения, а при

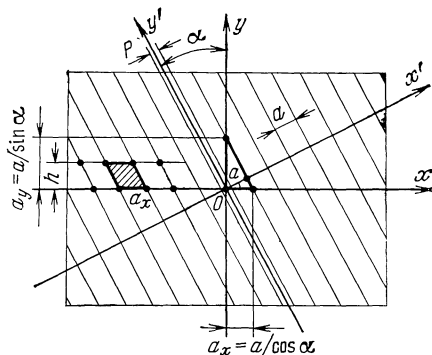


Рис. 2.17. Маска с наклонным расположением щелей

$n=k=\pm 1, \pm 2$  и т. д. — составляющие боковых спектров, обуславливающие образование сюжетных муаров.

Для множителя  $\theta_1$ , определяющего влияние апертуры луча кинескопа на амплитуду гармонических составляющих имеем

$$\theta_1 = \exp \{ -(r_e/2)^2 [(\omega_0 \sin \varphi)^2 + (\omega_0 \cos \varphi + n \omega_h)^2] \}. \quad (2.27)$$

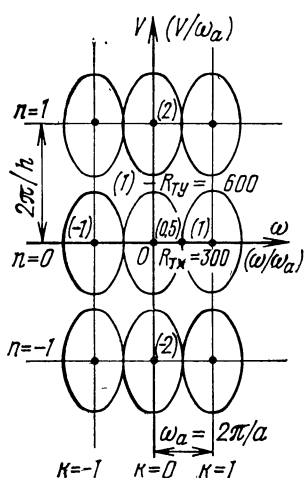
Аналогично определяющий влияние структуры щелей маски на амплитуду составляющих множитель

$$\theta_2 = \text{Sa} \{ 0,5 p [\omega_0 \sin (\alpha - \varphi) + n \omega_h \sin \alpha] \}. \quad (2.28)$$

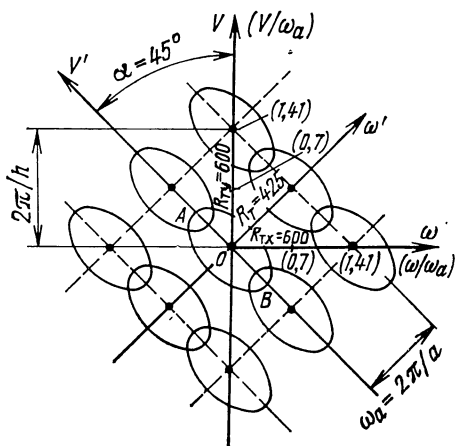
Можно убедиться, что при  $\alpha=0^\circ$  (вертикальная ориентация штрихового экрана) и  $\varphi=90^\circ$  (вертикальная ориентация гребней синусоид миры) выражения (2.27) и (2.27) будут соответствовать ранее полученному выражению (2.15).

В отличие от кинескопа с круглыми отверстиями маски, где составляющие спектра имели симметрию вращения (см. рис. 2.15), здесь такая симметрия отсутствует. При сечении спектральных составляющих горизонтальной плоскостью, соответствующей условному уровню (например,  $\Delta_0=0,10$ ), получаются эллипсы (рис. 2.18).

На рис. 2.18,а показаны такие эллипсы при вертикальной ориентации щелей маски ( $\alpha=0^\circ$ ) и соотношении шагов маски и раstra  $a=2h$ . При этом горизонтальная разрешающая способность  $R_{Tx}$  не может превышать 300 линий и определяется точкой на горизонтальной оси, где  $\omega = \omega_a/2$ . Вертикальная разрешающая способность  $R_{Ty}$  может достигать нормального значения 600 линий, что соответствует точке на вертикальной оси, где  $v = \omega_a$ . Очевидно, что



а)



б)

Рис. 2.18. Спектры изображений, воспроизводимых кинескопом с щелевой маской:

а — вертикальное расположение щелей маски ( $\alpha=0^\circ$ ,  $a/h=2$ ); б — наклонное расположение щелей маски ( $\alpha=45^\circ$ ,  $a/h=1,41$ )

для получения нормальной горизонтальной разрешающей способности  $R_{Tx}=600$  линий необходимо, чтобы  $a=h$ .

Наклонная ориентация элементов экранного узла кинескопа дает возможность получить нормальную разрешающую способность  $R_{Tx}=600$  линий при  $a>h$ , что заметно облегчает технологию изготовления щелевых масок (или сеток для хроматронов).

На рис. 2.18,б показаны спектральные составляющие для случая, когда угол наклона штриховых элементов экрана составляет  $\alpha=45^\circ$ , при этом  $a=\sqrt{2}h$ . В этом случае можно получить нормальную разрешающую способность в горизонтальном и вертикальном направлениях, т. е.  $R_{Tx}=R_{Ty}=600$  линий, при этом  $\omega=v=0,7\omega_a$ . Это достигается за счет некоторого ухудшения разрешающей способности в направлении осей  $\omega'$  и  $v'$  (т. е.  $\pm 45^\circ$  к строкам раstra), где она ограничена перекрытием спектров в области точек  $A$  и  $B$  (им соответствует  $R_T=425$  линий). Практически такое перекрытие спектров допустимо, так как штриховые наклонные элементы в сюжетных изображениях весьма редки, и поэтому вероятность образования муаров невелика. Кроме того, частотная характеристика глаза  $K_2(\omega, v)$  практически неоднородна, так как глаз хуже различает штриховые структуры в диагональном направлении, чем в горизонтальном и вертикальном [82].

Важно отметить, что общее число отсчетов (т. е. точек пересечения осей полосок экрана с осями строк раstra) будет уменьшаться с ростом угла  $\alpha$ , так как общее число отсчетов

$$N_0 = K_\Phi z_a^2 \frac{h}{a} \cos \alpha, \quad (2.29)$$

где  $K_\Phi$  — формат кадра (отношение ширины к высоте). Очевидно, что максимальное число отсчетов будет при вертикальной ориентации полосок экрана ( $\alpha=0^\circ$ ) а  $a=h$ . Поэтому число отсчетов в горизонтальном направлении при повороте на угол  $\alpha$  увеличивается за счет общего их числа. Практически можно рекомендо-

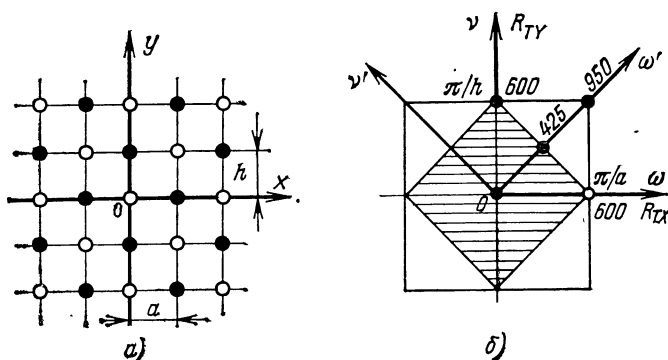


Рис. 2.19. К определению четкости при шахматном расположении отверстий маски:

$a$  — структура отверстий маски;  $b$  — спектр для данной структуры отверстий маски

вать поворот полосок экрана на угол  $\alpha=45^\circ$  при  $a=\sqrt{2}h$ , что позволяет увеличить шаг маски (или сетки) на 40% без ущерба для горизонтальной четкости.

Сказанное выше поясняется рис. 2.19. Здесь показана двумерная дискретная структура при  $a=h$ , точками показаны центры ее на рис. 2.19,а. Соответствующий спектр рис. 2.19,б имеет вид квадрата, при этом четкость по вертикали и горизонтали будет соответствовать 600 линий. При этом в направлении осей  $\omega'$  и  $\nu'$  (диагонали квадрата) четкость 950 линий, что явно избыточно.

Уменьшим теперь число центров дискретизации вдвое (например, закрыв отверстия «маски», показанной на рис. 2.19,а в шахматном порядке — они показаны темными точками). Тогда общее число отсчетов уменьшится вдвое. Спектр будет соответствовать показанному на рис. 2.19,б малому (заштрихованному) квадрату, площадь его уменьшится вдвое. Но четкость вдоль горизонтальной оси  $\omega$  и вертикальной оси  $\nu$  не уменьшится и останется равной 600 линий (хотя вдоль осей  $\omega'$  и  $\nu'$  уменьшится до 425 линий).

## 2.5. ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ТРЕХЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ СМЕШЕНИИ ЦВЕТОВ

В предыдущих разделах рассматривались особенности одномерной и двумерной дискретизации при воспроизведении на экранах кинескопов ЦТ одноцветных изображений (красных, зеленых или синих). Трехцветное изображение можно рассматривать как сумму трех одноцветных изображений. Однако при пространственном смещении цветов три первичных изображения в основных цветах  $R$ ,  $G$ ,  $B$  взаимно смещены, что вызывает ряд особенностей, которые не имеют места при точном совмещении соответствующих элементов первичных изображений.

Возможная модель пространственного смещения цветов была показана на рис. 2.1, где глаз имитировался с помощью расфокусированной линзы. При этом можно воспользоваться математическим аппаратом, примененным в предыдущих разделах, и получить соответствующие выражения для описания трехцветных изображений [77]. Не приводя получающихся при этом выражений, рассмотрим основные особенности пространственного смещения цветов на упрощенных моделях, позволяющих наглядно выяснить качественную сторону рассматриваемых эффектов.

Рассмотрим штриховой экран с вертикальными полосками люминофоров шириной  $p$ , расположенными в последовательности  $R$ ,  $G$ ,  $B$  и т. д. (рис. 2.20). Шаг одноцветных полосок  $a$  предполагается равным шагу строк растра  $h$ , что обеспечивает нормальную разрешающую способность около 600 линий в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Будем рассматривать различные оригиналы  $O$  и соответствующие им изображения  $I$  с учетом структуры штрихового экрана и эффекта пространственного смещения цветов.

Если воспроизводится равномерное одноцветное поле (например, зеленое — рис. 2.20,а), то на штриховом экране будут высвечиваться  $G$ -полоски, между которыми имеются темные промежутки шириной  $2p$ . Эти промежутки не долж-



При передаче двухцветных сочетаний (например, желтых, голубых, пурпурных — см. рис. 2.20, *г, д, е*) ширина темных интервалов составляет  $4p$  или  $3p$ , и поэтому глаз эти интервалы видит.

Отсюда следует, что сочетания штриховых деталей любого цвета с черными полосками между ними, соответствующие отметке 600 линий на тест-таблице, будут нормально воспроизводиться на штриховом экране с нормальным шагом  $a=h$  и правильно восприниматься глазом при расстоянии наблюдения  $R=6H$  (рис. 2.20). Иначе говоря, при передаче черно-цветных мелких деталей воспроизведение их на кинескопе со штриховым экраном будет такое же, как при идеальном оптическом совмещении трех первичных изображений  $R, G, B$  цветов.

Рассмотрим теперь оригиналы  $O$  в виде чередований равноярких разноцветных полос и их изображения  $I$ , воспроизводимые на штриховом экране (рис. 2.21).

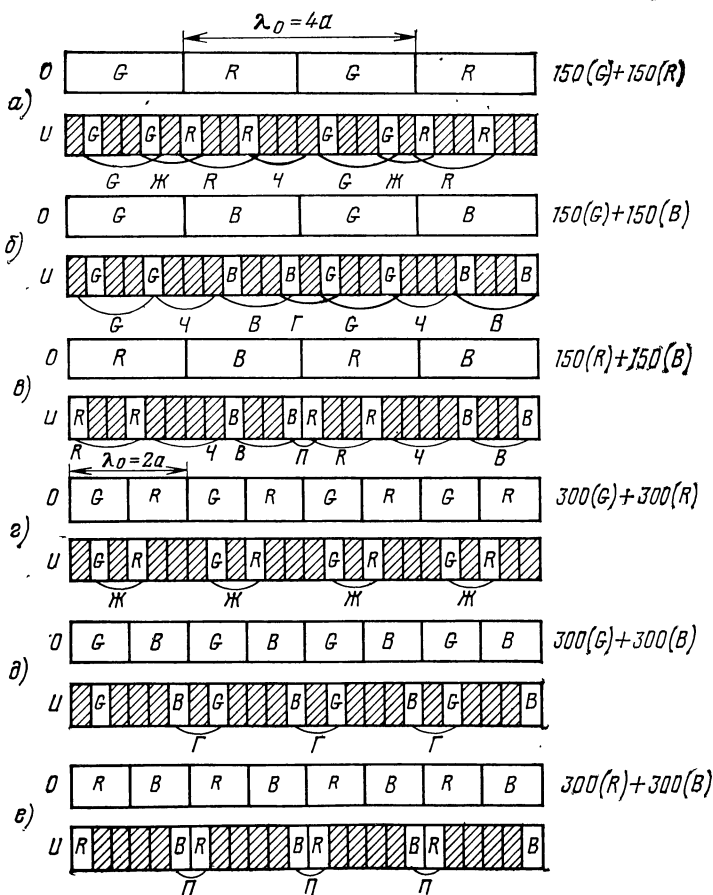


Рис. 2.21. Воспроизведение равноярких разноцветных полосок оригинала  $O$  в виде изображений  $I$  на штриховом экране

Вначале рассмотрим оригинал в виде красно-зеленых (R-G) полос с периодом  $\lambda_0 = 4a$ . На штриховом экране такому оригиналу соответствует изображение, полученное при возбуждении свечения штриховых элементов R и G (рис. 2.21,а). При этом промежутки между одноцветными элементами экрана не превышают  $2p$ , и поэтому для глаз зрителя такие элементы сливаются в более широкие полосы R и G (отмечены скобками на рис. 2.21а). Такие полосы оригинала R и G будут переданы и восприняты глазом практически правильно, если ширина их будет не меньше, чем на штриховых группах тест-таблиц, соответствующих отметке 300 линий, т. е.  $150G + 150R$ . Отметим только, что граница R-G будет подчеркнута темным переходом, так как на штриховом экране здесь расположены три темные полосы шириной  $3p$ . Другая граница G-R, напротив, будет ослаблена «желтым» переходом, так как на штриховом экране полосы G и R здесь разделены только одной темной. Аналогичные явления имеют место и при передаче G-B и R-B полос оригинала — см. рис. 2.21,б и в.

Предположим, что период одноцветных полос оригинала уменьшен вдвое, т. е.  $\lambda_0 = 2a$ , и структура оригинала теперь соответствует предельным возможностям идеальной системы ЦТ (где не используется сокращение полосы частот за счет смещения высоких) передавать равнояркие разноцветные детали на уровне отметки  $R_T = 600$ .

Например, на рис. 2.21,г показан оригинал O в виде чередования G-R полос, соответствующих отметке тест-таблицы 600 линий, т. е.  $300G + 300R$ . Соответствующее этому оригиналу изображение И на штриховом экране состоит из светящихся элементов G и R, разделенных темным промежутком в один элемент. Такие элементы G и R при нормальном расстоянии наблюдения сливаются для глаза в одну желтую полосу. Но темные промежутки шириной  $3p$  будут различаться глазом. Поэтому на изображении вместо оригинала в виде R-G полосок зритель увидит чередование желтых Ж и черных полосок. Аналогичные явления имеют место и при передаче G-B и R-B полосок оригинала — см. рис. 2.21,д, е. Во всех трех случаях (г, д, е) на рис. 2.21 изображения на штриховом экране кинескопа, воспринимаемые глазом, будут аналогичны одноименным изображениям на рис. 2.20, несмотря на различие оригиналов.

Следовательно, из-за особенностей пространственного смещения цветов на экранах цветных кинескопов нельзя воспроизвести равнояркие разноцветные полосы оригинала, соответствующие отметке штриховой тест-таблицы  $R_T = 600$  линий, даже если система ЦТ не использует принцип смещения высоких частот и передает все три сигнала в полной полосе частот. Поэтому используемое в современных совместимых системах ЦТ сокращение полосы частот цветоразностных сигналов может быть оправдано не только особенностями передаваемых цветных изображений или свойствами зрения, но прежде всего спецификой пространственного смещения цветов на дискретных экранах цветных кинескопов.

Другой особенностью пространственного смещения цветов на экранах кинескопов является возможность появления цветных окантовок вокруг контуров

крупных цветных деталей, что может наблюдаться даже при идеальном сведении трех электронных лучей масочных кинескопов [83].

Для объяснения этого эффекта следует иметь в виду, что изображение малой светящейся точки зрительной системой глаза можно уподобить действию апертуры с весовой функцией типа кривой Гаусса, описываемой выражением вида (2.20).

На рис. 2.22,а показаны единичные импульсы 1 и 2, соответствующие свечению двух соседних одноцветных (например, красных) элементов экрана кинескопа, расстояние между ними соответствует шагу экрана  $a$ . Реакция глаза на каждый такой единичный импульс может быть отображена кривой Гаусса. Для двух соседних импульсов яркости 1 и 2 соответствующие кривые  $R_1$  и  $R_2$ , сдвинуты на шаг  $a$ , показаны на рис. 2.22,а. Для воспроизведения ровного одноцветного (красного) поля точка пересечения А кривых  $R_1$  и  $R_2$  должна быть расположена вблизи 50% уровня яркости (точнее, на уровне 0,53), тогда колебания результирующей яркости  $R_1 + R_2$  (штриховая линия) будут около 6%, и поэтому глаз увидит ровное поле данного (красного) цвета.

Пусть теперь воспроизводятся детали, цвет которых соответствует сумме двух или трех основных цветов. На рис. 2.22,б показаны единичные импульсы (1 и 2), соответствующие свечению двух соседних разноцветных элементов экрана (например, красному R и зеленому G), расстояние между ними равно  $a/3$ . Таких элементов может быть несколько (в зависимости от протяженности детали изображения), и тогда будет воспроизводиться деталь суммарного (например, желтого) цвета. Но левый и правый края этой детали получают дополнительную окраску. А именно, на правом краю в суммарном (желтом) цвете будет преобладать один из цветов (зеленый), на левом — другой (красный). Протяженность таких окантовок определяется характеристикой глаза и зависит прежде всего от расстояния наблюдения.

Для упрощенной модели пространственного смешения цветов на экранах цветных кинескопов можно использовать факт восприятия ровного одноцветного (например, зеленого) поля, если возбуждено свечение соответствующих одноцветных элементов экрана. Такие одноцветные элементы занимают 1/3 площади экрана, но обеспечивают иллюзию равномерного свечения всего экрана. Поэтому для первого приближения можно предположить, что 2/3 светового потока каждый элемент экрана отдает соседним элементам.

Например, на точечном экране каждый светящийся элемент отдает 2/3 светового потока шести соседним элементам, каждый из которых получит 1/9 часть. Тогда, зная распределение яркости на точечных элементах R, G, B, мож-

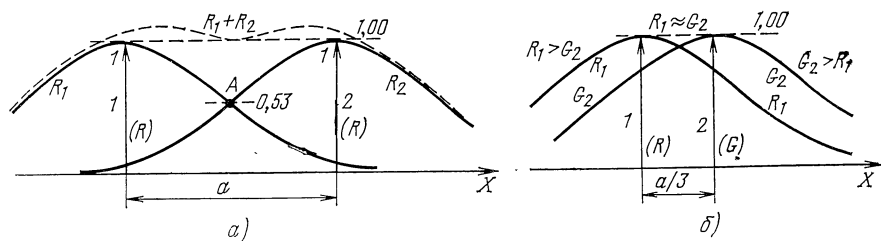


Рис. 2.22. Пространственное смешение цветов:

а — для импульсов 1 и 2 одного цвета; б — для импульсов 1 и 2 разных цветов

но определить кажущийся цвет каждого элемента на изображении, воспринимаемый глазом в результате пространственного смешения цветов.

На рис. 2.23 показаны различные виды изображений на точечном экране масочного кинескопа: *а* — зеленая точка и ее изображение (как бы колоколообразная фигура вращения кривой Гаусса, «квантованная» на два уровня); *б* — зеленое поле; *в* — белое поле; *г* — желтое поле; *д* — желтая точка, которая воспроизводится с цветной окантовкой.

Более точные модели можно построить, пользуясь рассмотренной выше методикой анализа одноцветных изображений [77—81]. Для более детального исследования необходимо знать количественные закономерности пространственного смешения цветов, основанные на экспериментальных данных в условиях, близких к условиям наблюдения цветных телевизионных изображений, так как эти вопросы в физиологической оптике цветного зрения пока мало изучены.

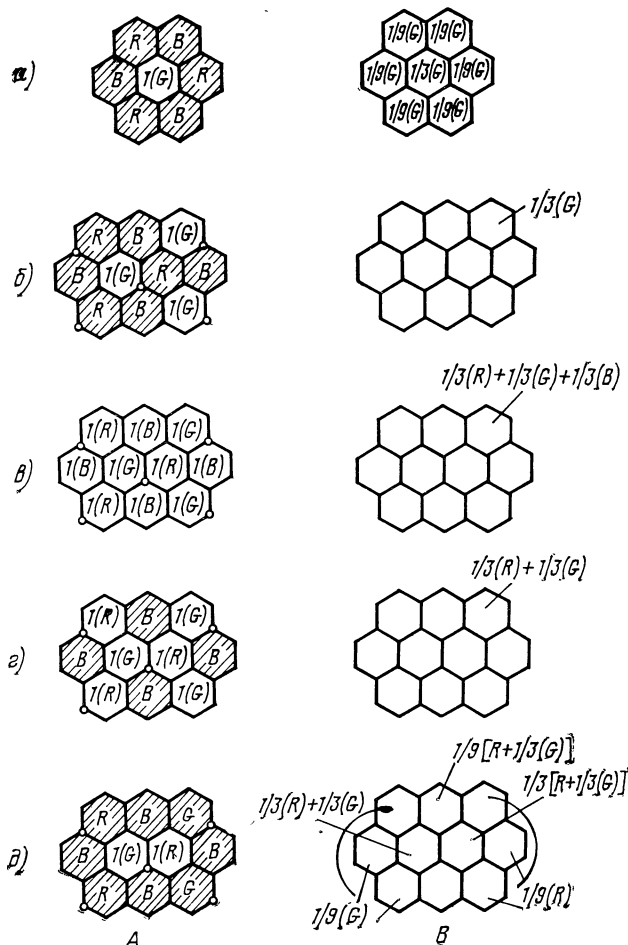


Рис. 2.23. Различные виды изображений *A* на точечном экране и соответствующие им зрительные восприятия *B* при пространственном смешении цветов

# ГЛАВА 3

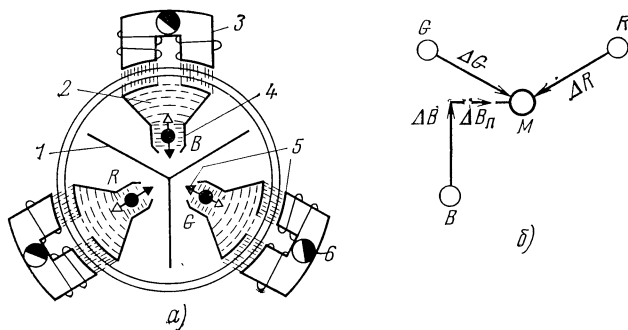
## ВОПРОСЫ ОТКЛОНЕНИЯ И СВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛУЧЕЙ В ТРЕХЛУЧЕВЫХ КИнесКОПАХ

### 3.1. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ОТКЛОНЕНИЯ И СВЕДЕНИЯ

Вопросы отклонения и сведения электронных лучей в трехлучевых цветных кинескопах имеют важное значение как с точки зрения качества изображения, так и для определения исходных данных к расчету корректирующей оптики, применяемой при нанесении экрана.

В масочных кинескопах с треугольным расположением прожекторов (например, типа 61ЛКЗЦ) используется динамическое сведение трех электронных лучей (R, G, B) путем независимого смещения каждого из них в радиальном направлении (рис. 3.1,а). Для этого внутри горловины кинескопа расположены три пары внутренних магнитных наконечников, связанных с наружными электромагнитами. Каждый электромагнит имеет две обмотки, по которым протекают токи строчной и полукадровой частоты — обычно сумма пилообразной и параболической составляющих, получаемых от схем разверток.

Для изменения амплитуды этих составляющих требуется 12 органов регулировки, так как для каждого из трех лучей нужно регулировать параболическую и пилообразную составляющие как строчной, так и полукадровой частоты. Для настройки используют генератор сетчатого поля, позволяющий получить на экране кинескопа сетку из горизонтальных и вертикальных белых линий на темном фоне. Вначале запирают В-луч и сводят G-R-лучи, получая желтую сетку. При этом лучи  $\Delta G$  и  $\Delta R$  смещаются по радиусу до их пересечения в точке М (рис. 3.1,б). Затем включают В-луч и получают белую сетку. Строго говоря, помимо радиального динамического смещения В-луча на величину  $\Delta B$ , может потребоваться еще и горизонтальное смещение  $\Delta B_{\text{п}}$ , но обычно ограничиваются только радиальным смещением.



**Рис. 3.1.** Система динамического сведения электронных лучей масочного кинескопа:

а — основные элементы системы сведения: 1 — внутренний магнитный экран; 2 — магнитное поле; 3 — электромагнит; 4 — внутренний полюсный наконечник; 5 — смещение луча, 6 — магнит статического сведения; б — смещение лучей R, G, B при их сведении

Для оценки пригодности реальных отклоняющих систем возможен следующий метод контроля (см. рис. 3.2). Три электронных луча масочного кинескопа отклоняют, например, в правый верхний угол с помощью постоянных токов, питающих обмотки систем горизонтального и вертикального отклонения. При отсутствии сигналов динамического сведения на этом участке экрана наблюдаются три несовмещенные точки R, G, B. Затем в обмотки каждого из трех электромагнитов радиального сведения подается синусоидальный ток, амплитуда которого может регулироваться и измеряться. Тогда след каждого из трех лучей R, G, B будет прочерчивать на экране линию. Пересечение всех трех линий в одной общей точке позволяет судить о хорошем сведении трех лучей, иначе возникает необходимость в дополнительном горизонтальном смещении В-луча.

Изменение цвета линий вблизи точки их пересечения свидетельствует о нарушении чистоты цвета при динамическом сведении и является обычно следствием неправильной коррекции хода световых лучей при нанесении экрана фотоспособом. Кроме того, такой несложный эксперимент позволяет получить данные для получения идеального динамического сведения, если для этого применять сигналы сведения произвольной формы.

В масочных кинескопах с углом отклонения не более  $90^\circ$  угол начального (статического) сведения  $\theta_0$  составляет обычно величину порядка одного градуса. Изменение этого угла в процессе динамического сведения  $\Delta\theta = \theta_0 - \theta$  весьма невелико.

При этом предполагается, что выполняется соотношение

$$\Delta\theta(x_a, y_a) = \Delta\theta(x_a, 0) + \Delta\theta(0, y_a), \quad (3.1)$$

т. е. изменение угла сведения  $\Delta\theta$ , соответствующее точке экрана с координатами  $x_a, y_a$  (без учета дисторсии раstra), равно сумме соответствующих величин при горизонтальном и вертикальном отклонении. Это позволяет упростить сведение в кинескопах с углом отклонения лучей  $90^\circ$ , так как сигналы сведения строчной и полукадровой частоты будут постоянными и независимыми. Однако сведение лучей в углах раstra будет неполным. В кинескопах с углом отклонения лучей  $110^\circ$  для улучшения сведения лучей в углах раstra используется еще и дополнительный сигнал, пропорциональный  $x_a y_a$ , что приводит к нежелательному усложнению схемы из-за необходимости применять активные элементы. Обычные схемы сведения, применяемые в приемниках с кинескопами с углом отклонения лучей  $90^\circ$  типа 61ЛК3Ц, используют только пассивные элементы, они достаточно просты и сами по себе практически

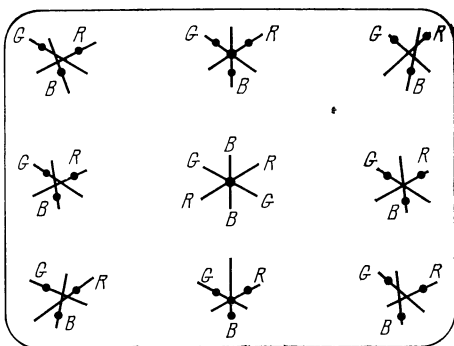


Рис. 3.2. К пояснению метода контроля отклоняющей системы

не влияют на стоимость приемника. Описание разных вариантов схем сведения имеется в [11, 84].

Существенный недостаток систем сведения с внутренними полюсными наконечниками и другими элементами, расположенными на горловине кинескопа, является изменение угла сведения неотклоненных электронных лучей. Поэтому возникает радиальное смещение условного центра отклонения и соответствующее ему смещение следа отклоненного луча на экране. Такое смещение, зависящее от работы схем динамического сведения, трудно учесть при расчете и реализации корректирующей оптики для нанесения экрана (см. гл. 4). Реальное сведение, достигаемое при настройке приемника, может отличаться от расчетного, учитываемого при проектировании корректирующей оптики.

Иначе говоря, вопросы чистоты цвета и динамического сведения оказываются связанными. Поэтому интерес к самосводящим отклоняющим системам обусловлен не только желанием упростить схему и настройку приемника, но и разделить задачи чистоты цвета и сведения лучей. Заметим, что самосводящие отклоняющие системы нередко содержат дополнительные элементы для «подсведения» лучей, например четырехполюсные системы (см. рис. 1.22). Но здесь отклоняющие и сводящие устройства совмещены в отклоняющей системе, расположенной на конусном участке оболочки кинескопа (а не на горловине), поэтому изменение угла сведения луча до его входа в отклоняющую систему здесь отсутствует.

Существующие нормы на остаточное несведение лучей на различных участках экрана кинескопа (см. рис. 1.3) определены эмпирически на основании опыта выпуска кинескопов типа 61ЛКЗЦ. В центре экрана эти нормы более жесткие, чем на краевых и угловых зонах. Это обусловлено статистикой реальных величин несведения при массовом производстве кинескопов. Кроме того, наиболее важные детали сюжетных изображений расположены обычно в центральной зоне экрана, а не на краях и углах. Но с точки зрения свойств глаза такое разделение не оправдано: глаз в одинаковой мере различает или не различает несовмещение лучей как в центре, так и на углах экрана — с этим приходится считаться в кинескопах для дисплеев. Глаз менее критичен к несовмещению В-луча (ввиду малого яркостного вклада синего цвета и пониженной разрешающей способности глаза к синему цвету). Поэтому нормы на несовмещение В-R и В-G лучей могут быть увеличены вдвое по сравнению с нормами для G-R лучей, что подтверждено экспериментами как на реальных кинескопах, так и на оптических эквивалентах трех совмещенных изображений [1, с. 59].

При совместном отклонении все три луча должны одновременно проходить через общее отверстие маски М и попадать на соседние разноцветные элементы триады R, G, В, исходя из трех условных точек R, G, В, называемых обычно центрами отклонения («первого порядка») — см. рис. 3.3.

Но все три луча могут одновременно попадать на триаду R, G, В, проходя и через три соседних отверстия маски (рис. 3.4.). При этом расположение трех условных центров отклонения R, G, В (называемых центрами отклонения «второго порядка») изменится и расстояние между ними станет равным  $S_0 = \theta_0 P_0 + a$ , т. е. увеличится на шаг отверстий маски  $a$  (ср. рис. 3.3 и 3.4). В реальных кинескопах используют обычно только центры отклонения

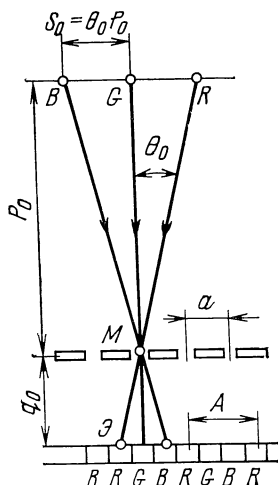


Рис. 3.3. Сведение лучей из центров отклонения R, G, B 1-го порядка

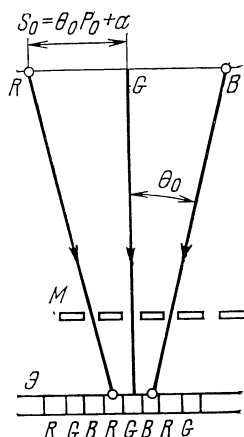


Рис. 3.4. Сведение лучей из центров отклонения R, G, B 2-го порядка

«первого порядка». Центры «второго порядка» иногда использовались для помещения в них точечных источников света при нанесении экрана фотоспособом [4, с. 81].

В любом случае все три луча должны попадать на триаду R, G, B одновременно. Если же через маску в данный момент не проходят все три луча, а только два или один (остальные задерживаются маской), то цвет свечения экрана будет зависеть от положения лучей, а не только от входных сигналов кинескопа. Поэтому сведение трех лучей в общей точке экрана (а не маски) приводит к зависимости цвета экрана от положения лучей в данный момент [83, 85]. Это иллюстрирует рис. 3.5 на примере кинескопа со щелевой маской и штриховым экраном с вертикальными полосками R, G, B.

Пусть нужно воспроизвести вертикальную линию желтого цвета (G и R лучи включены, луч B заперт). Тогда при сведении G и R лучей в общей точке маски M получится требуемая желтая линия (рис. 3.5, а). Но при сведении лучей G и R в общей точке экрана (рис. 3.5, б) при положении лучей  $G_1R_1$  получится красная линия, а при положении  $G_2R_2$  — зеленая (вместо нужной желтой). Аналогичные явления будут наблюдаться и при точечном экране.

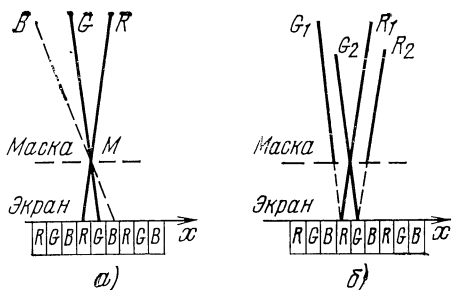


Рис. 3.5. К выбору точки сведения лучей:

а — точка сведения на поверхности маски; б — точка сведения на поверхности экрана

### 3.2. АБЕРРАЦИИ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛУЧЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Уравнения траекторий.** Дифференциальное уравнение движения электронов в магнитном поле в векторной форме имеет вид [86]

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{e}{m} [\mathbf{V} \times \mathbf{B}], \quad (3.2)$$

где  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона;  $\mathbf{V}$  — вектор скорости электрона;  $\mathbf{B}$  — вектор индукции магнитного поля.

В составляющих прямоугольных координатах ему соответствуют три уравнения:

$$\ddot{x} = \frac{e}{m} (B_y \dot{z} - B_z \dot{y}); \quad (3.2a)$$

$$\ddot{y} = \frac{e}{m} (B_z \dot{x} - B_x \dot{z}); \quad (3.2б)$$

$$\ddot{z} = \frac{e}{m} (B_x \dot{y} - B_y \dot{x}), \quad (3.2в)$$

где точками обозначено дифференцирование по времени  $t$ . Исключая время  $t$  и принимая за независимую переменную координату  $Z$  (направленную вдоль оси кинескопа  $OZ$ ), получаем уравнения электронных траекторий в виде системы двух нелинейных дифференциальных уравнений 2-го порядка, удобной для решения на ЭВМ [87]:

$$x'' = k_e \sqrt{1 + x'^2 + y'^2} [B_y (1 + x'^2) - B_z y' - B_x x' y']; \quad (3.3a)$$

$$y'' = k_e \sqrt{1 + x'^2 + y'^2} [-B_x (1 + y'^2) + B_z x' + B_y x' y'], \quad (3.3б)$$

здесь и далее используется обозначение  $k_e = \sqrt{e/2mU_s}$  ( $U_s$  — потенциал экрана, оболочки и анодов масочного кинескопа); штрихами обозначено дифференцирование по  $Z$ .

При одномерном отклонении осевого луча в горизонтальной плоскости  $XOZ$ , когда  $y = y' = y'' = 0$ , траектория луча будет плоской кривой и описывается уравнением

$$x'' = k_e B_y (1 + x'^2)^{3/2}. \quad (3.4)$$

Это уравнение может быть решено в квадратурах методом понижения порядка [88, с. 55]. Тогда наклон траектории (относительно оси  $OZ$ ) определится выражением

$$x'(z) = k_e \int_{z_0}^z B_y dz / \sqrt{1 - \left[ k_e \int_{z_0}^z B_y dz \right]^2}, \quad (3.5)$$

где  $B_y$  — магнитная индукция вдоль траектории  $x(z)$ . Траектория определится интегрированием

$$x(z) = \int_{z_0}^z x'(z) dz, \quad (3.6)$$

где  $z_0$  — начальное значение координаты  $z$ .

**Магнитное поле отклоняющей системы.** При соблюдении условий симметрии составляющие напряженности  $H$  магнитного поля системы горизонтального (строчного) отклонения (рис. 3.6) подчинены следующим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} H_x(x, y, z) &= -H_x(-x, y, z) = -H_x(x, -y, z); \\ H_y(x, y, z) &= H_y(-x, y, z) = H_y(x, -y, z); \\ H_z(x, y, z) &= H_z(-x, y, z) = -H_z(x, -y, z). \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Аналогичные соотношения можно написать и для системы вертикального отклонения (путем взаимной замены индексов  $x$  и  $y$ ).

В пространстве отклонения электронных лучей справедливо условие  $\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0$  и поэтому магнитное поле можно определить при помощи скалярного потенциала  $\Phi$ , т. е.

$$\mathbf{H} = -\operatorname{grad} \Phi. \quad (3.8)$$

Скалярный потенциал магнитного поля в области оси кинескопа можно представить степенным рядом

$$\Phi(x, y, z) = \sum_{i+j=n} a_{ij}(z) x^i y^j, \quad (3.9)$$

где  $a_{ij}(z)$  — коэффициенты, зависящие только от координаты  $z$ .

С учетом условий симметрии (3.7) для системы строчного отклонения и аналогичных условий для системы вертикального отклонения, а также вытекающего из уравнения Лапласа условия  $\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$ , можно получить выражения для составляющих напряженности магнитного поля всей отклоняющей системы [18, 89]:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{d\Phi}{dx} = V_0 - (V_2 + V_0''/2) x^2 + 2H_2 xy + V_2 y^2 + \dots; \\ H_y &= \frac{d\Phi}{dy} = H_0 - (H_2 + H_0''/2) y^2 + 2V_2 xy + H_2 x^2 + \dots; \\ H_z &= \frac{d\Phi}{dz} = V_0' x + H_0' y + \dots, \end{aligned} \quad (3.10)$$

где использованы обозначения

$$H_0 = a_{10}(z); \quad H_2 = a_{12}(z); \quad V_0 = a_{01}(z); \quad V_2 = a_{21}(z).$$

Функции  $H_0$  и  $H_2$  характеризуют приосевое поле системы строчного отклонения:

$$H_0 = (H_y)_{x=y=0}; \quad H_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} \right)_{x=y=0}. \quad (3.11)$$

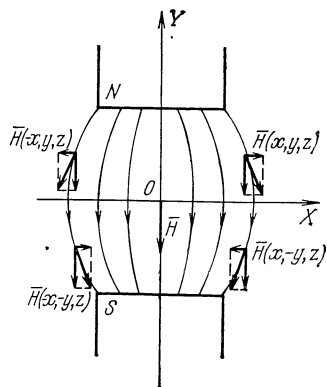


Рис. 3.6. Симметрия магнитного поля системы горизонтального отклонения



$$Y_G = -\mu_0 k_e \int_{z_0}^{z_s} (z_s - z) V_0 dz; \quad (3.14б)$$

$$X'_G = \mu_0 k_e \int_{z_0}^{z_s} H_0 dz; \quad (3.14в)$$

$$Y'_G = -\mu_0 k_e \int_{z_0}^{z_s} V_0 dz. \quad (3.14г)$$

Разность координат  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  для точек  $G$  и  $R$ , соответствующих гауссову осевому и реальному неосевому лучам, можно определить с разной степенью точности. В теории аббераций 3-го порядка в уравнениях траекторий (3.3) используют для составляющих магнитного поля выражения (3.10). Тогда разность между гауссовым осевым и реальным неосевым лучами в общем виде выразится так [18, 89]:

$$\begin{aligned} \Delta X_3 = & A_{301} Y_G^3 + (A_{302} + B_{303}) X_G Y_G^2 + (A_{304} X_G^2 + B_{305} Y_G^2) x'_0 + \\ & + (A_{306} + B_{306}) X_G Y_G y'_0 + A_{307} X_G x'^2_0 + A_{308} X_G y'^2_0 + 2B_{308} Y_G x'_0 y'_0; \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y_3 = & B_{301} Y_G^3 + (B_{302} + A_{303}) X_G^2 Y_G + (B_{304} Y_G^2 + A_{305} X_G^2) y'_0 + \\ & + (B_{306} + A_{306}) X_G Y_G x'_0 + B_{307} Y_G y'^2_0 + B_{308} Y_G x'^2_0 + 2A_{308} X_G x'_0 y'_0, \end{aligned} \quad (3.16)$$

Можно убедиться, что выражение (3.16) получается из (3.15) взаимной заменой символов  $A$  и  $B$ ,  $x$  и  $y$ ,  $X_G$  и  $Y_G$ . Обозначения абберационных коэффициентов  $A$  и  $B$  включают индекс из трех цифр, первая означает третий порядок абберации, остальные — порядковый номер [89].

Коэффициенты  $A_{301-303}$  и  $B_{301-303}$  определяют геометрические искажения — нелинейность отклонения и дисторсию раstra. Для различия между реальными лучами  $R$ ,  $G$ ,  $B$  они не представляют интереса, так как в равной мере действуют на все три луча. Коэффициенты  $A_{304-306}$  и  $B_{304-306}$  (астигматизм), а также  $A_{307-308}$  и  $B_{307-308}$  (кома) определяют взаимное положение лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  трехлучевого кинескопа на поверхности сведения и поэтому являются основными. Влияние этих коэффициентов на взаимное расположение следов трех компланарных лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  при их совместном отклонении на различные участки плоскости сведения показано на рис. 3.8.

Если в выражениях (3.15) и (3.16) учесть условие компланарности лучей  $y'_0 = 0$ , то расстояния между следами лучей и абберационные коэффициенты оказываются связанными следующими соотношениями [18]:

$$a_1 = 2\bar{A}_{304} X_G^2 x'_0;$$

$$a_2 = 2\bar{B}_{305} Y_G^2 x'_0;$$

$$\begin{aligned}b_2 - b_3 &= 2 \bar{A}_{307} X_G x_0'^2; \\b_1 &= \bar{B}_{308} Y_G x_0'^2; \\C_1 &= 2 (\bar{A}_{306} + \bar{B}_{306}) X_G Y_G x_0',\end{aligned}\tag{3.17}$$

где  $X_G$  и  $Y_G$  — координаты центрального  $G$ -луча.

Эти выражения можно использовать для приближенного определения абберационных коэффициентов при расчете электронных траекторий лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  решением уравнений (3.3) на ЭВМ. Полученные при этом значения абберационных коэффициентов (отмечены чертой сверху) включают абберации не только 3-го, но и более высоких порядков. Влияние последних заметно увеличивается с ростом угла отклонения.

Интегральные выражения для коэффициентов аббераций 3-го порядка, использующие функции  $H_0(z)$ ,  $H_2(z)$ ,  $V_0(z)$ ,  $V_2(z)$ , приводятся в [18, 89].

Теория аббераций 3-го порядка позволяет получить приемлемые качественные представления о свойствах отклоняющих систем только при малых углах отклонения (до 20...25°). Попытки использовать коэффициенты аббераций 5-го порядка также не дали ясных результатов, так как обилие таких коэффициентов затрудняет анализ сведения лучей кинескопа [89, 90]. Некоторые полезные результаты качественного характера можно получить с помощью методов, использующих криволинейную систему координат, где в качестве оси берется траектория центрального луча [91, 92].

Во всех абберационных методах исследования отклонения лучей наибольшие трудности вызывает попытка установить связь между абберационными коэффициентами и параметрами отклоняющих систем. Поэтому в последнее время наметилась тенденция к отказу от абберационных методов и исследованию траекторий электронных лучей методами численного решения уравнений вида (3.4) на ЭВМ. Развитие вычислительной техники позволяет определить электронные траектории с высокой точностью. Основная задача сводится к определению магнитных полей отклоняющих систем с соизмеримой точностью. Экспериментальные измерения [87] высокой точности не обеспечивают. Более перспективно исследование моделей отклоняющих систем, близких к реальным, но обеспечивающих точный расчет поля в рабочей зоне.

### 3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

**Модель магнитного отклоняющего поля.** Для численного решения уравнений электронных траекторий (3.3) необходимо знать значения составляющих вектора магнитной индукции  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  в каждой точке пространства отклонения, где проходят электронные лучи. Поэтому желательно иметь такую модель отклоняющего поля, которая имеет небольшое число параметров и создает поле, конфигурация которого в зоне отклонения лучей близка к полям реальных систем. Вне рабочей зоны отклонения поле модели может как угодно отличаться от полей реальных систем, так как эта

часть (поле рассеяния) влияет только на чувствительность к отклонению, но не на ход электронных траекторий.

Такая модель является своеобразным «генератором полей» и позволяет количественно оценить влияние основных параметров на сведение трех электронных лучей. При этом из множества вариантов создаваемых полей можно выделить оптимальное, отвечающее заданным требованиям, например условию самосведения компланарных лучей.

Предполагаемая модель состоит из линейных элементов в виде проводников с током. Создаваемое поле определяется суперпозицией полей от отдельных элементов. Каждый такой линейный элемент может иметь произвольную ориентацию в системе координат  $XYZ$ , где  $OZ$  — ось кинескопа (в отличие от частного случая, рассмотренного в [18, 93], когда элемент параллелен оси  $OZ$ ).

Рассмотрим линейный элемент, где течет ток  $I$  в направлении от начальной точки 1 ( $x_1, y_1, z_1$ ) к конечной точке 2 ( $x_2, y_2, z_2$ ), и определим вектор напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  в точке наблюдения  $P(x, y, z)$  — см. рис. 3.9.

Используя закон Био-Савара, можно определить модуль вектора напряженности магнитного поля в точке наблюдения:

$$|\mathbf{H}| = I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) / 4 \pi p_n, \quad (3.18)$$

где  $|\mathbf{H}|$  — модуль вектора напряженности магнитного поля, А/м;  $I$  — сила тока в линейном элементе, А;  $\alpha_1, \alpha_2$  — углы согласно рис. 3.9;  $p_n$  — расстояние от точки наблюдения  $p$  до прямой  $I \dots 2$ , м.

Единичный вектор напряженности магнитного поля  $H_0$  направлен перпендикулярно плоскости треугольника  $P-1-2$  и определяется векторным соотношением

$$\mathbf{H}_0 = \frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)}{\sqrt{[(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)]^2}}, \quad (3.19)$$

где  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}$  — радиус-вектор точек 1, 2,  $P$  соответственно. Используя эти выражения, а также очевидные векторные соотношения

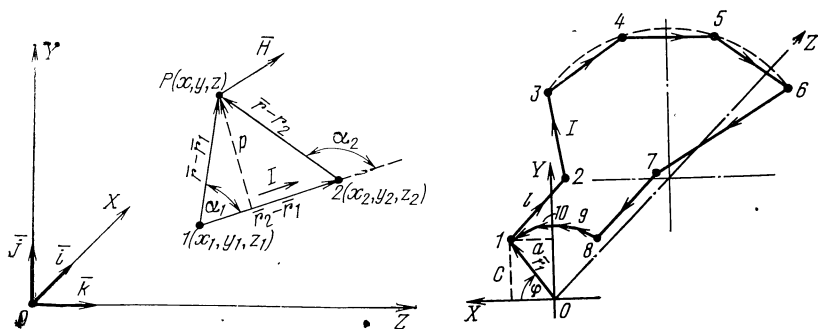


Рис. 3.9. К определению магнитного поля нелинейного элемента с током  $I$

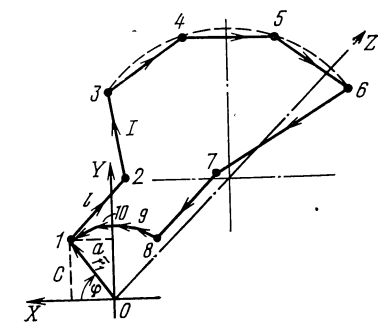


Рис. 3.10. Пример отклоняющей системы, состоящей из линейных элементов

для расстояния  $\rho_n$  и конусов углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , получаем требуемое выражение для напряженности магнитного поля  $H$  в векторной форме:

$$\mathbf{H} = \frac{I}{2\pi} \frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)}{[(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)]^2} \left[ \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)}{\sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_2)^2}} - \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_2) \times (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)}{\sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_2)^2}} \right]. \quad (3.20)$$

Переходя к координатной форме, получаем окончательное выражение для составляющих напряженности магнитного поля  $H$  в точке наблюдения  $P$ , а именно:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= H_x \mathbf{i} + H_y \mathbf{j} + H_z \mathbf{k} = \\ &= \frac{I}{4\pi} \frac{(y_{21} z_{01} - y_{01} z_{21}) \mathbf{i} + (x_{01} z_{21} - x_{21} z_{01}) \mathbf{j} + (x_{21} y_{01} - x_{01} y_{21}) \mathbf{k}}{(y_{21} z_{01} - y_{01} z_{21})^2 + (x_{01} z_{21} - x_{21} z_{01})^2 + (x_{21} y_{01} - x_{01} y_{21})^2} \times \\ &\times \left[ \frac{x_{01} x_{21} + y_{01} y_{21} + z_{01} z_{21}}{\sqrt{x_{01}^2 + y_{01}^2 + z_{01}^2}} - \frac{x_{02} x_{21} + y_{02} y_{21} + z_{02} z_{21}}{\sqrt{x_{02}^2 + y_{02}^2 + z_{02}^2}} \right], \quad (3.21) \end{aligned}$$

где использованы обозначения:

$$x_{01} = x - x_1; \quad x_{02} = x - x_2; \quad x_{21} = x_2 - x_1;$$

$$y_{01} = y - y_1; \quad y_{02} = y - y_2; \quad y_{21} = y_2 - y_1;$$

$$z_{01} = z - z_1; \quad z_{02} = z - z_2; \quad z_{21} = z_2 - z_1.$$

Выражение (3.21) позволяет определить составляющие  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  для любой системы, состоящей из линейных элементов с током  $I$ . Пример такой системы показан на рис. 3.10 (верхняя половина системы горизонтального отклонения седлообразного типа).

Для линейных элементов, параллельных оси  $OZ$  (например, для участков 1—2 и 7—8 на рис. 3.10), предыдущее выражение для  $H$  принимает более простой вид. В частности, для участка 1—2 на рис. 3.10 можно положить:

$$x_1 = x_2 = a = r_1 \cos \varphi; \quad z_1 = 0;$$

$$y_1 = y_2 = c = r_1 \sin \varphi; \quad z_2 = l.$$

и тогда из общего выражения (3.21) получим как частный случай:

$$\begin{aligned} H_{1-2} &= H_x \mathbf{i} + H_y \mathbf{j} + H_z \mathbf{k} = \frac{I}{4\pi} \left[ \frac{(c-y) \mathbf{i} + (x-a) \mathbf{j}}{(c-y)^2 + (x-a)^2} \right] \times \\ &\times \left[ \frac{z}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-c)^2 + z^2}} - \frac{z-l}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-c)^2 + (z-l)^2}} \right]. \quad (3.22) \end{aligned}$$

Составляющая  $H_z$  равна нулю, так как рассматриваемый линейный элемент параллелен оси  $OZ$ . Выражения, аналогичные (3.22), приводятся в [18, 93].

Практически, однако, важнее общее выражение (3.21), так как в современных отклоняющих системах участок с горизонтальными витками (витки 1—2 и 7—8) обычно мал или вовсе отсутству-

ет. Преобладающий эффект на сведение лучей оказывают «косые» витки, соответствующие конусной части оболочки кинескопа.

На рис. 3.11 показаны модели систем вертикального *а* и горизонтального *б* отклонения. Здесь основной эффект достигается за счет «косых» витков, положение которых определяется угловыми параметрами  $\varphi_{V1}$ ,  $\varphi_{V2}$  и  $\varphi_{H1}$ ,  $\varphi_{H2}$ . «Торцевые» витки оказывают сравнительно слабое влияние на отклонение и сведение электронных лучей.

**Вертикальное отклонение.** Рассмотрим модель вертикального отклонения трех компланарных лучей *R*, *G*, *B*, основные геометрические параметры которой показаны на рис. 3.12, *а*. Здесь основную роль играют линейные проводники 1 и 2, параллельные оси *OZ*, положение их определяется угловыми параметрами  $\varphi_{V1}$  и  $\varphi_{V2}$ . При отсутствии отклонения лучи *R*, *G*, *B* сводятся в точке *O*, условной плоскости отклонения *Z<sub>s</sub>* при наклоне  $\chi_0' = 0,02$ .

При угле вертикального отклонения центрального луча около  $22^\circ$  были рассчитаны на ЭВМ численным интегрированием уравнений (3.3) траектории *R*, *G*, *B* для разных сочетаний угловых параметров  $\varphi_{V1}$  и  $\varphi_{V2}$ . Это позволило найти следы лучей *R*, *G*, *B* на плоскости сведения *Z<sub>s</sub>* и расстояния между ними *a<sub>2</sub>* и *b<sub>1</sub>*, которые определяют соответственно аберрации типа астигматизма и кома — см. рис. 3.8 и выражения (3.17).

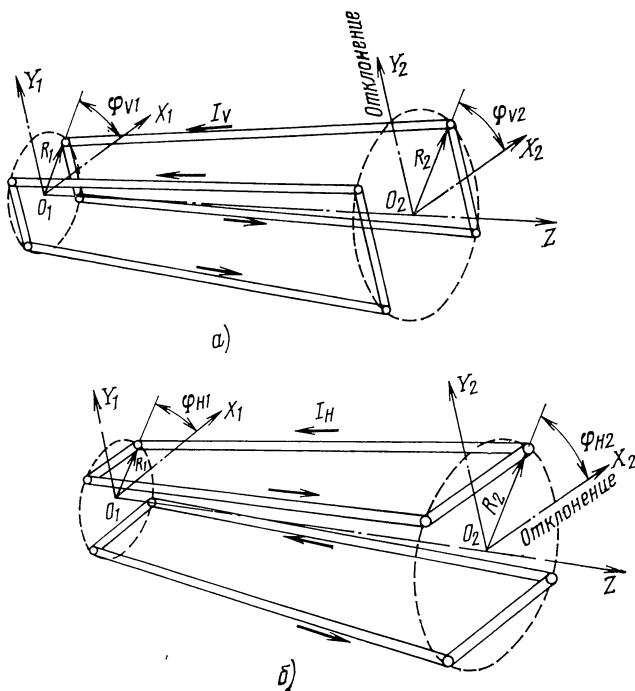
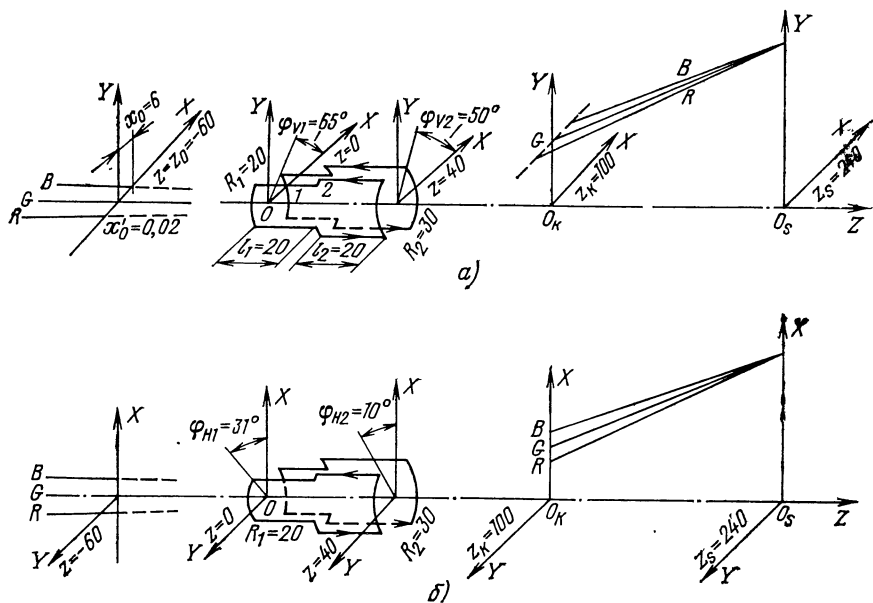


Рис. 3.11. Модели отклоняющих систем с «косыми» витками



**Рис. 3.12.** Модели отклоняющих систем с витками 1 и 2, параллельными оси кинескопа:

*a* — система вертикального отклонения лучей R, G, B; *б* — система горизонтального отклонения лучей R, G, B

На рис. 3.13 по осям координат отложены параметры  $\varphi_{V1}$  и  $\varphi_{V2}$ , а в узлах координатной сетки — значения величин  $a_2$  и  $b_1$ . Эти данные позволяют на рис. 3.13 построить линии нулевых значений астигматизма  $a_2 = 0$  (сплошная линия) и комы  $b_1 = 0$  (пунктир). Пересечение этих линий определяет наилучший выбор угловых параметров данной системы вертикального отклонения, а именно  $\varphi_{V1} = 65^\circ$  и  $\varphi_{V2} = 50^\circ$ .

Эти значения определяют приосевое поле системы вертикального отклонения с самосведением лучей, составляющие кривые  $V_0(z)$  и  $V_2(z)$  показаны на рис. 3.14. Видно, что для кривой  $V_2(z)$  характерны отрицательные участки I и III и форма, близкая к симметричной. Заметим, что полученная форма кривой отличается от рекомендованной в [18] на основе общих качественных соображений, где имеется только один отрицательный участок.

Аналогичное исследование проводилось для системы вертикального отклонения с «косыми» линейными проводниками (см. рис. 3.11, *a*). Угол отклонения G-луча от оси был около  $31^\circ$ , длина проекции проводников на ось OZ равна 40 мм, остальные геометрические параметры соответствуют указанным на рис. 3.12, *a*. Результаты показаны на рис. 3.15.

В отличие от рис. 3.13, линии нулевого астигматизма  $a_2 \approx 0$  и нулевой комы  $b_1 \approx 0$  здесь почти параллельны и поэтому нельзя

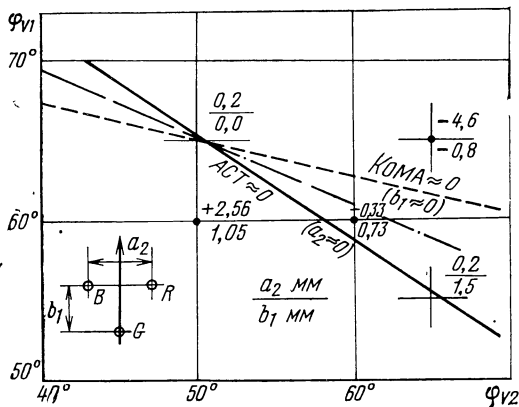


Рис. 3.13

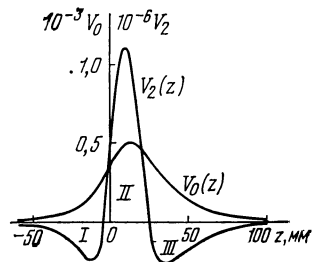


Рис. 3.14

Рис. 3.13. Характеристики сведения компланарных  $R$ ,  $G$ ,  $B$  для системы вертикального отклонения, показанной на рис. 3.12,а

Рис. 3.14. Кривые продольного распределения магнитного поля для системы вертикального отклонения, показанной на рис. 3.12,а

выбрать пару значений  $\varphi_{V1}$  и  $\varphi_{V2}$  в точке пересечения этих линий. Компромиссом может служить выбор значений, соответствующих средней линии (показана штрихпунктиром). На этой линии значения расстояния между следами трех лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  не превышают 1 мм, что можно считать удовлетворительным.

**Горизонтальное отклонение.** Система горизонтального отклонения показана на рис. 3.12,б, здесь основную роль играют линейные проводники 1 и 2, параллельные оси  $OZ$ , положение которых определяется угловыми параметрами  $\varphi_{H1}$  и  $\varphi_{H2}$ . Как и в случае вертикального отклонения, для разных сочетаний этих двух параметров были рассчитаны на ЭВМ траектории лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  и определены расстояния между следами этих лучей на плоскости сведения  $Z_s$  при угле отклонения около  $27^\circ$  (рис. 3.16). Здесь расстояние  $a_1$  между крайними лучами  $B$  и  $R$  связано с астигматиз-

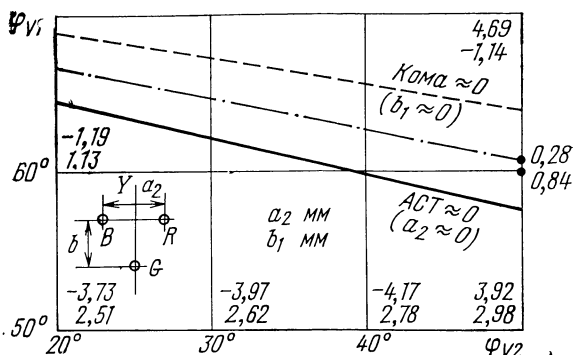


Рис. 3.15. Характеристики сведения компланарных лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  для системы вертикального отклонения, показанной на рис. 3.11,а

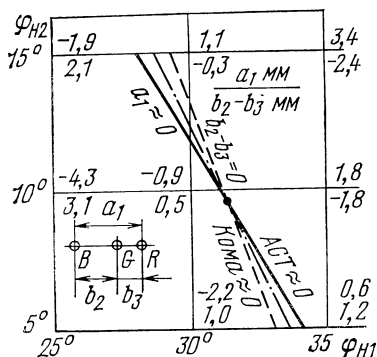


Рис. 3.16. Характеристики сведения компланарных лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  для системы горизонтального отклонения, показанной на рис. 3.12,б

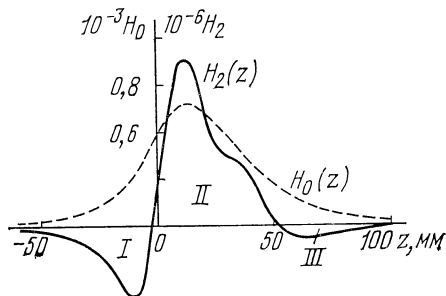


Рис. 3.17. Кривые продольного распределения магнитного поля для системы горизонтального отклонения, показанной на рис. 3.12,б

мом, а асимметрия следа центрального луча  $G$  относительно крайних лучей, определяемая разностью  $b_2 - b_3$ , связана с комой системы горизонтального отклонения (см. рис. 3.8).

По полученным данным  $a_1$  и  $b_2 - b_3$  (указаны в узлах координатной сетки) определялись линия нулевого астигматизма  $a_1 \approx 0$  (сплошная линия на рис. 3.16) и линия нулевой комы  $b_2 = b_3$  (пунктир). Пересечение этих линий определяет оптимальный выбор угловых параметров данной системы горизонтального отклонения, а именно  $\varphi_{H1} = 31^\circ$  и  $\varphi_{H2} = 10^\circ$ .

В соответствии с этими значениями построены кривые продольного поля «самосводящей» системы горизонтального отклонения  $H_0(z)$  и  $H_2(z)$  — см. рис. 3.17. Видно, что кривая  $H_2(z)$  имеет два отрицательных участка I и III, но последний слабо выражен.

Аналогичное исследование проводилось и для систем горизонтального отклонения с «косыми» проводниками (см. рис. 3.11,б). Угол отклонения центрального луча  $G$  был около  $40^\circ$ , длина проекции проводников на ось  $OZ$  равна 40 мм, остальные параметры — как на рис. 3.12,б. Результаты показаны на рис. 3.18.

Пересечение линий нулевого астигматизма  $a_1 \approx 0$  и нулевой комы  $b_2 = b_3$  определяет оптимальный выбор угловых параметров  $\varphi_{H1} = 39^\circ$  и  $\varphi_{H2} = 11^\circ$ . Характеристики, показанные на рис. 3.16 и 3.18, аналогичны. Данные на рис. 3.16 несколько предпочтительнее, так как линии нулевого астигматизма и нулевой комы имеют меньшее угловое расхождение. В идеале, при совпадении этих линий оптимальный выбор угловых параметров значительно расширяется — вместо одной точки получаем целую линию наилучших сочетаний угловых параметров. Напротив, худший случай — когда эти две линии почти параллельны и сравнительно далеки друг от друга.



### 3.4. КОРРЕКЦИЯ СВЕДЕНИЯ ЛУЧЕЙ МНОГОПОЛЮСНЫМИ СИСТЕМАМИ

**Общие положения.** Для дополнительной коррекции сведения лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  в углах растрх приходится использовать дополнительные методы. Весьма желательно, чтобы такие методы, существенно улучшая сведения лучей в углах растра, не влияли на сведения лучей вдоль осей растра. Кроме того, такие средства коррекции должны быть достаточно простыми, чтобы существенно не усложнять оконечные схемы приемников ЦТ.

Такая угловая коррекция может быть реализована за счет нарушения симметрии или антисимметрии отклоняющего поля. Практически она достигается введением в отклоняющие системы дополнительных элементов — корректирующих многополюсников. Наиболее распространены четырехполюсные (квадрупольные) системы.

На рис. 3.20 показано расположение витков модели систем вертикального а и горизонтального б отклонения и указано направление токов, обеспечивающее отклонение лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  в правый верхний угол растра (см. также рис. 3.11). Здесь показаны также четырехполюсные системы, состоящие из четырех проводников, расположенных по осям растра (рис. 3.20, в) или диагонально (рис. 3.20, г). Первый тип будем называть системой осевой коррекции КО, второй — диагональной КД. Общая схема отклоняющей системы для этих двух случаев показана на рис. 3.20 (д и е) соответственно (см. также рис. 1.22).

Можно убедиться, что в системе осевой коррекции направление токов в четырех корректирующих проводниках не изменяется при

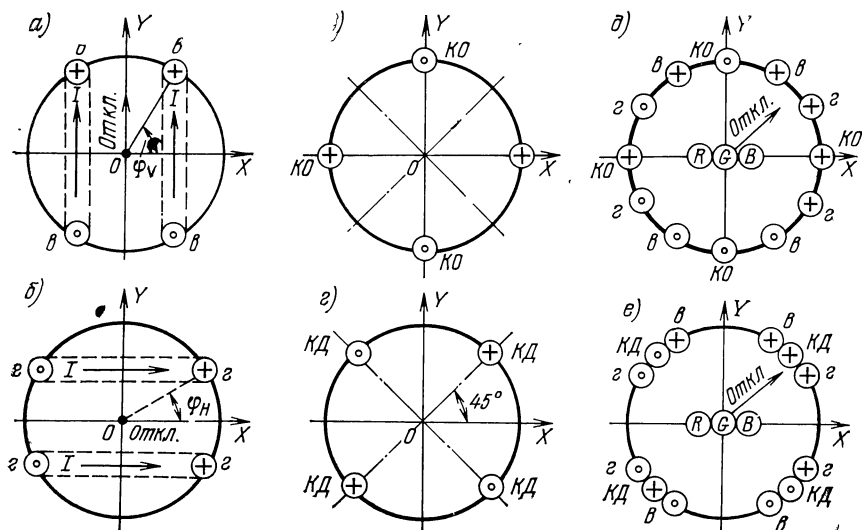


Рис. 3.20. Отклоняющие системы с четырехполюсными корректирующими элементами

отклонении лучей  $R, G, B$  в разные углы раstra. Поэтому при питании таких систем используют обычно мостиковый выпрямитель, обеспечивающий униполярность сигналов коррекции при изменении полярности сигналов развертки (см. рис. 1.23).

Система осевой коррекции практически не влияет на сведение компланарных лучей  $R, G, B$  при их одномерном горизонтальном отклонении, но может влиять на сведение их при одномерном вертикальном отклонении. При отклонении лучей в углы раstra такая система может мало корректировать анизотропный астигматизм, т. е. мало влиять на вертикальное расхождение между следами лучей  $R, G, B$  (см. рис. 3.8).

Система диагональной коррекции, напротив, может эффективно сближать лучи в вертикальном направлении, корректируя анизотропный астигматизм при отклонении лучей на угловые участки экрана. При одномерном отклонении лучей только в горизонтальном или только в вертикальном направлении эта система мало влияет на сведение лучей. При отклонении лучей в разные углы раstra такая система требует изменения направления токов в корректирующих элементах — в чем можно убедиться, построив рисунки, аналогичные рис. 3.20,е для остальных углов. Эффект, аналогичный такой диагональной коррекции, может быть достигнут за счет асимметрии токов в половинах обмоток систем вертикального и горизонтального отклонения, схемы такого рода приводятся в [5] (см. рис. 1.23). При этом четырехполюсная линза образуется двумя парами обмоток горизонтального и вертикального отклонения [1, с. 150].

Общим вопросам квадрупольной оптики посвящена монография [94], содержащая обширную библиографию. Нарушение симметрии отклоняющего поля при одномерном или двумерном отклонении и связанные с этим аберрации четных порядков рассмотрены в [89], основные результаты ее и обозначения аберраций используются ниже.

**Система осевой коррекции.** Эта система имеет двойную симметрию относительно осей раstra  $OX$  и  $OY$ , поэтому для составляющих корректирующего магнитного поля можно записать следующие условия симметрии (см. рис. 3.20,в):

$$\begin{aligned}\tilde{H}_x(x, y, z) &= \tilde{H}_x(-x, y, z) = \tilde{H}_x(x, -y, z); \\ \tilde{H}_y(x, y, z) &= -\tilde{H}_y(-x, y, z) = \tilde{H}_y(x, -y, z); \\ \tilde{H}_z(x, y, z) &= -\tilde{H}_z(-x, y, z) = -\tilde{H}_z(x, -y, z).\end{aligned}\quad (3.23)$$

Записав выражение для скалярного магнитного потенциала (3.9) с учетом условий (3.23) и ограничиваясь членами не выше второго порядка относительно координат  $x, y$ , получим

$$\tilde{\Phi}(x, y, z) = \sum_{i+j=0}^{i+j=n} a_{ij}(z) x^i y^j = a_{11}(z) xy + \dots \quad (3.24)$$

Отсюда можно получить первые члены степенных рядов для составляющих напряженности магнитного поля данной системы коррекции:

$$\begin{aligned}\tilde{H}_x &= \partial \tilde{\Phi} / \partial x = a_{11}(z) y + \dots; \\ \tilde{H}_y &= \partial \tilde{\Phi} / \partial y = a_{11}(z) x + \dots; \\ \tilde{H}_z &= \partial \tilde{\Phi} / \partial z = a'_{11}(z) xy + \dots\end{aligned}\quad (3.25)$$

Общее поле отклоняющей системы с использованием осевой коррекции (см. рис. 3.20, д) выразится суперпозицией полей, определяемых выражениями (3.10) и (3.25), т. е.

$$\bar{H}_x = H_x + \tilde{H}_x; \quad \bar{H}_y = H_y + \tilde{H}_y; \quad \bar{H}_z = H_z + \tilde{H}_z. \quad (3.26)$$

При использовании системы осевой коррекции сохраняется симметрия полей вертикального и горизонтального отклонения, но нарушается антисимметрия. Это приводит к появлению аббераций четных порядков, в частности 2-го порядка.

В результате на условной плоскости сведения (рис. 3.7), помимо расхождений между лучами  $\Delta X_3$  и  $\Delta Y_3$  из-за аббераций 3-го порядка, определяемых выражениями (3.16), появятся дополнительные расхождения  $\Delta X_2$  и  $\Delta Y_2$  из-за аббераций 2-го порядка. Для случая трех компланарных лучей R, G, B (когда  $y'_0 = 0$ ) имеем:

$$\Delta X_2 = A_{201} X_G^2 + B_{203} X_G Y_G + (A_{205} X_G - B_{205} Y_G) x'_0; \quad (3.27a)$$

$$\Delta Y_2 = B_{201} Y_G^2 + A_{203} X_G Y_G, \quad (3.27b)$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты аббераций 2-го порядка с обозначениями, принятыми в [89]; остальные обозначения, как на рис. 3.7.

Коэффициенты при  $X_G^2$ ,  $Y_G^2$  и  $X_G Y_G$  определяют нелинейность отклонения и дисторсию раstra и поэтому не связаны с условиями сведения трех лучей R, G, B. Определяющими являются коэффициенты астигматизма 2-го порядка  $A_{205}$  и  $B_{205}$ . Они зависят от коэффициента  $a_{11}(z)$  при разложении в степенной ряд приосевого поля (3.24) данной корректирующей системы, т. е.

$$A_{205} = -\frac{\mu_0 k_l}{X_G} \int_{z_0}^{z_s} a_{11}(z) (z_s - z)^2 dz; \quad (3.28a)$$

$$B_{205} = \frac{\mu_0 k_l}{Y_G} \int_{z_0}^{z_s} a_{11}(z) (z_s - z)^2 dz, \quad (3.28b)$$

где обозначения соответствуют рис. 3.7.

Из выражений (3.27) видно, что изменение параметров поля данной системы коррекции влияет на сведение лучей R, G, B только в горизонтальном направлении, в вертикальном направлении она практически не действует.

На рис. 3.21 показаны характеристики четырехполюсной системы осевой коррекции, дополняющей систему отклонения, показанную на рис. 3.12 с параметрами  $\varphi_{H1} = 25^\circ$ ,  $\varphi_{H2} = 20^\circ$ ,  $\varphi_{V1} = 65^\circ$ ,  $\varphi_{V2} = 50^\circ$ . Корректирующая система состояла из четырех проводников длиной 40 мм, расположенных между плоскостями  $z = 0$  и  $z = 40$  мм вдоль образующих цилиндра радиуса 40 мм (см. рис.

3.12). Отклонения лучей R, G, В направлены в правый верхний угол растра, углы отклонения соответствовали значениям  $\operatorname{tg} \gamma_V \approx 0,4$  и  $\operatorname{tg} \gamma_H \approx 0,5$ , т. е. условным ампер-виткам  $I_V = I_H = 200$ .

Соответствующая доля ампер-витков корректирующей системы  $K_R$  отложена на горизонтальной оси рис. 3.21. Оптимальная коррекция соответствует  $K_R = 0,27$ . При этом достигается наилучшее сведение лучей R, G, В в горизонтальном направлении — при сведении крайних лучей R и В остаточное несведение центрального G-луча было менее 0,5 мм (верхняя часть рисунка). В то же время такая коррекция практически не влияла на сведение лучей R, G, В в вертикальном направлении — расхождение между лучом G и крайними лучами R и В составило примерно 2 мм при всех значениях коэффициента коррекции  $K_R$  (нижняя часть рисунка).

**Система диагональной коррекции.** Эта система (рис. 3.20,г) имеет двойную антисимметрию относительно осей растра  $OX$  и  $OY$ , поэтому для составляющих напряженности магнитного корректирующего поля можно записать условия:

$$\begin{aligned}\tilde{H}_x(x, y, z) &= -\tilde{H}_x(-x, y, z) = \tilde{H}_x(x, -y, z), \\ \tilde{H}_y(x, y, z) &= \tilde{H}_y(-x, y, z) = -\tilde{H}_y(x, -y, z); \\ \tilde{H}_z(x, y, z) &= \tilde{H}_z(-x, y, z) = \tilde{H}_z(x, -y, z).\end{aligned}\quad (3.29)$$

Выражение для скалярного магнитного потенциала будет содержать только члены четных степеней относительно координат, т. е.

$$\tilde{\Phi}(x, y, z) = \sum_{i+j=n} a_{ij}(z) x^i y^j = a_{20}(z) x^2 + a_{02}(z) y^2 + \dots \quad (3.30)$$

При этом составляющие напряженности магнитного поля корректирующей системы

$$\begin{aligned}\tilde{H}_x &= 2a_{20}(z) x + \dots; \\ \tilde{H}_y &= -2a_{02}(z) y + \dots; \\ \tilde{H}_z &= a'_{20}(z) x^2 - a'_{02}(z) y^2 + \dots,\end{aligned}\quad (3.31)$$

$$\text{где } 2a_{20}(z) = \left. \frac{\partial H_x}{\partial x} \right|_{x=y=0} = - \left. \frac{\partial H_y}{\partial y} \right|_{x=y=0},$$

т. е. соответствует производным составляющих  $\tilde{H}_x$  и  $\tilde{H}_y$  вдоль оси  $OZ$ .

Общее поле определится суперпозицией полей, описываемых выражениями (3.10) и (3.31) — см. рис. 3.20,е. При диагональной

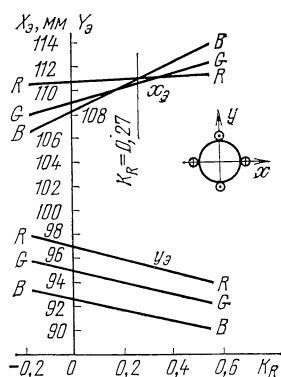


Рис. 3.21. Характеристики четырехполюсной системы осевой коррекции

коррекции сохраняется антисимметрия полей вертикального и горизонтального отклонения, но нарушается симметрия этих полей относительно плоскостей  $OXZ$  и  $OYZ$ . Отсюда ясно, что достигаемый эффект аналогичен тому, который имеет место при нарушении симметрии между половинами обмоток систем горизонтального или вертикального отклонения.

В результате эффектов, вызванных aberrациями 2-го порядка, на условной плоскости сведения  $z=z_s$  будут иметь место дополнительные смещения  $\Delta X_2$  и  $\Delta Y_2$  между реальным и гауссовым лучами — см. рис. 3.7. Для случая трех компланарных лучей  $R, G, B$ :

$$\Delta X_2 = B_{202} Y_G^2 + A_{204} X_G Y_G; \quad (3.32a)$$

$$\Delta Y_2 = A_{202} X_G^2 + B_{204} X_G Y_G + (A_{206} X_G + B_{206} Y_G) x'_0. \quad (3.32b)$$

Для сведения лучей  $R, G, B$  определяющими будут коэффициенты:

$$A_{206} = \frac{\mu_0 k_e}{X_G} \int_{z_0}^z a_{20}(z) (z_s - z)^2 dz; \quad (3.33a)$$

$$B_{206} = -\frac{\mu_0 k_e}{Y_G} \int_{z_0}^z a_{20}(z) (z_s - z)^2 dz. \quad (3.33b)$$

Из выражений (3.32) видно, что система диагональной коррекции влияет на сведение лучей  $R, G, B$  в вертикальном направлении благодаря дополнительному смещению  $\Delta Y_2$ . Это позволяет эффективно корректировать анизотропный астигматизм 3-го порядка. Горизонтальное сведение лучей  $R, G, B$  практически не меняется — в выражении для  $\Delta X_2$  содержатся только члены, определяющие нелинейность отклонения  $B_{202}$  и дисторсию раstra  $A_{204}$ .

Это подтверждается характеристиками, показанными на рис. 3.22. Все условия аналогичны тем, которые были использованы для получения данных на рис. 3.21, различие состоит только в расположении корректирующих витков.

Оптимальная коррекция соответствует значению  $K_R = 0,57$ , при этом сводятся крайние лучи  $R$  и  $B$ , остаточное несведение центрального  $G$ -луча при этом менее  $0,5$  мм (нижняя часть рисунка). Смещение лучей в горизонтальном направлении не происходит (линии  $R, G, B$  в верхней части рисунка идут параллельно).

Для полной коррекции сведения лучей  $R, G, B$  в углах раstra необходимо сочетать оба типа корректирующих устройств — систему осевой коррекции (для смещения лучей в горизонтальном направлении) и

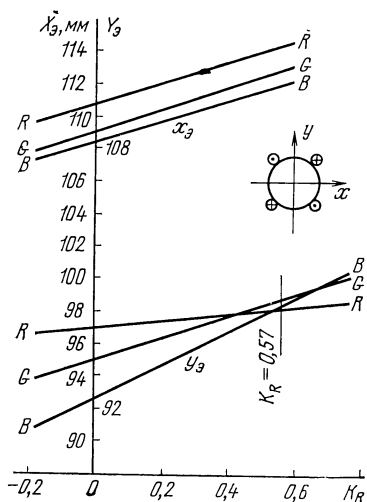


Рис. 3.22. Характеристики четырехполюсной системы диагональной коррекции

систему диагональной коррекции (для вертикального смещения лучей). Обычно используют только одну систему четырехполосной коррекции (осевой), другая система (диагональная) получается за счет дисбаланса токов в половинках обмоток систем горизонтального и вертикального отклонения.

Такие системы используются преимущественно в кинескопах с максимальным углом отклонения  $110^\circ$ . При  $90^\circ$  отклонении нередко обходятся одной из указанных систем коррекции (обычно осевой), а в малогабаритных кинескопах дополнительная коррекция сведения лучей может отсутствовать.

### 3.5. ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОТКЛОНЕНИЯ И СВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛУЧЕЙ

Задача сведения трех электронных лучей R, G, B в трехлучевых кинескопах продолжает оставаться одной из основных, так как она связана не только с качеством изображения, но и с другой важнейшей задачей — чистотой цвета. В кинескопах с динамическим сведением лучей до их входа в отклоняющую систему появляется дополнительное смещение лучей, которое весьма трудно учесть при расчете корректирующей оптики (см. гл. 4).

Вместе с тем динамическое сведение позволяет в принципе получить идеальное сведение лучей по всему растру — трудность здесь состоит только в обеспечении нужной формы сигналов. Отсутствие динамического сведения при использовании планарного расположения лучей R, G, B и специальных самосводящих систем хотя и способствует упрощению расчета корректирующей оптики, но не позволяет получить высокой точности сведения лучей на углах раstra. Поэтому системы «самосведения» можно рекомендовать для массовых телевизоров, а использование динамического сведения — для устройств с повышенными требованиями к качеству изображения (видеоконтрольные устройства, дисплеи и т. п.).

Для дальнейшего усовершенствования систем отклонения и сведения электронных лучей в цветных кинескопах необходимо располагать методами достаточно точного расчета магнитных полей таких систем. Пока такие методы разработаны явно недостаточно и при разработке отклоняющих систем преобладает эмпирический подход. Представляется целесообразным разработку отклоняющих систем разделить на два этапа:

- 1) при помощи моделей, допускающих точный расчет магнитного поля в каждой точке пространства отклонения лучей, определить вариант распределения магнитного поля, при котором достигаются желаемые результаты — например, самосведение лучей на заданной поверхности;

- 2) исследовать возможности создания таких магнитных полей в реальных конструкциях отклоняющих систем при помощи изменения их основных геометрических и конструктивных параметров.

Примером решения первого этапа является рассмотренная выше методика исследования моделей отклоняющих полей. Преимуществом ее является то, что при малом числе основных параметров можно формировать поля, близкие к реальным, полученным при экспериментальных замерах в рабочей зоне отклоняющих систем.

На рис. 3.23 показаны типовые распределения магнитных полей для случаев горизонтального *а*, диагонального *б* и вертикального *в* отклонения самосводящей системы типа ДОК CDY-102А. Эта система предназначена для кинескопов

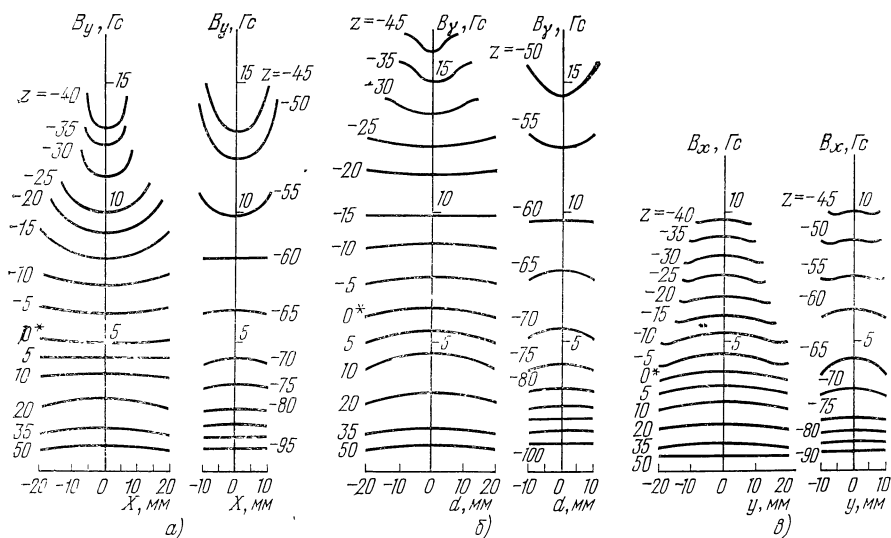


Рис. 3.23. Распределение магнитного поля самосводящей отклоняющей системы типа CDY-102A [95]

с  $90^\circ$  отклонением лучей с расположением прожекторов и горловиной диаметром 29,1 мм японского производства [95]. Система имеет обмотки типа тор-тор с прецизионной укладкой витков в пазах сердечника.

Для каждого из трех направлений отклонения на рис. 3.22 приводятся кривые зависимости основной составляющей индукции магнитного поля  $B$  от соответствующей координаты отклонения. Семейство таких кривых приводится при различных значениях параметра  $z$ , выражающего расстояние вдоль оси кинескопа от переднего края обмоток отклоняющей системы (где  $z=0$ ). Характер искривления показанных на рис. 3.23 линий магнитной индукции  $B$  свидетельствует о величине и типе неоднородности магнитного поля, прямолинейность линий характеризует однородность поля на данном участке. Видно, что эти данные хорошо согласуются с полученными ранее результатами. Действительно, поле системы горизонтального отклонения  $a$  имеет неоднородность поля типа «подушка». Поле системы вертикального отклонения  $b$  имеет неоднородность типа «бочка». Помимо этого соответствия качественного характера можно убедиться и в количественной близости результатов данных рис. 3.23 с рис. 3.14 и 3.17, описывающими приосевое распределение поля самосводящих систем вертикального и горизонтального отклонения соответственно. При диагональном отклонении  $b$  поле ближе к однородному.

При исследованиях моделей полей, состоящих из проводников с током, магнитные сердечники отсутствовали. Это упрощает расчеты полей в рабочей зоне, но создает значительные поля рассеяния вне этой зоны, т. е. снижает эффективность системы отклонения. Для электронно-оптических расчетов траекторий лучей важно только поле в рабочей зоне, которое должно быть близко к реальным. В реальных системах тороидального или седлообразного типа, использующих эффективные магнитные сердечники и экраны, стремятся достичь высокой

концентрации магнитного поля в рабочей зоне отклонения при низкой концентрации полей рассеяния во внешней зоне. Но расчет полей таких систем весьма затруднителен, некоторые подходы к решению описаны в [96, 97]. В целом проблема теоретической базы для разработки отклоняющих систем нуждается в дальнейших исследованиях.

## ГЛАВА 4

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ КОРРЕКЦИИ ЧИСТОТЫ ЦВЕТА

---

#### 4.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦВЕТНЫХ КИНЕСКОПОВ

Проектирование цветных кинескопов тесно связано с проектированием систем коррекции чистоты цвета. Эти системы при нанесении экрана фотоспособом должны обеспечивать точное соответствие хода световых лучей, используемых при экспонировании экрана через маску от точечного источника света, с электронными лучами кинескопа. В идеале след электронного луча должен попадать на элемент экрана так, чтобы центры их совпадали. Несовпадение центров следа луча и элемента экрана может привести к нарушению чистоты цвета. Развитие техники цветных кинескопов определялось состоянием систем коррекции чистоты цвета [1].

Первые масочные кинескопы 21АХР22 (1954 г.) имели круглый экран диаметром 53 см и угол отклонения лучей  $70^\circ$ . При нанесении экрана фотоспособом экспозиция производилась без применения корректирующих линз, а только подбиралось положение точечного источника света. Следующий тип аналогичного кинескопа 21АХР22-А имел экран, при нанесении которого применялась асферическая линза с симметрией вращения, что позволяло корректировать только осевое смещение центров отклонения лучей. При изготовлении аналогичного кинескопа 21СУР22 (1957 г.) начали применять асимметричные линзы, которые также корректировали, и радиальное смещение центров отклонения, вызванное действием систем динамического сведения лучей. Но эти линзы обеспечивали хорошую коррекцию только вдоль горизонтальной и вертикальной осей экрана. На остальных участках экрана (прежде всего угловых) коррекция была недостаточной.

В отечественной практике производства масочных кинескопов, начиная с первых типов 53ЛК4Ц и кончая выпускаемым в настоящее время 61ЛК3Ц, при нанесении точечного экрана ход световых лучей корректируется плоско-вогнутой линзой [2, с. 156]. Пример такой линзы показан на рис. 4.1.

Линза плоской поверхностью обращена к точечному источнику света  $I$ , а вогнутой поверхностью — к узлу маска — экран. Ось линзы имеет наклон под углом  $\omega \approx 4^\circ$  относительно оси кинескопа. В качестве исходных для расчета линзы использовались данные об осевом («продольном»)  $\Delta P(\gamma)$  и радиальном («поперечном»)

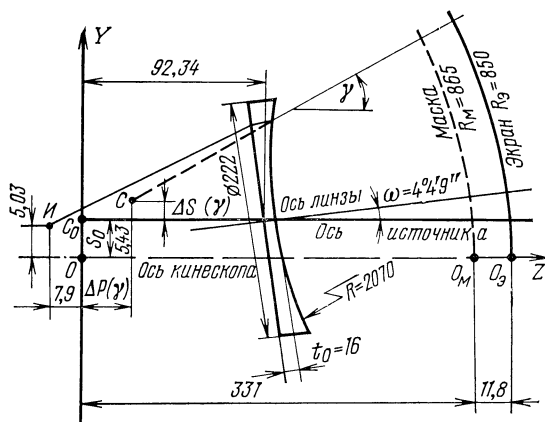


Рис. 4.1. Плоско-вогнутая корректирующая линза

$\Delta S(\gamma)$  смещениях виртуального центра отклонения  $C$  [1, с. 79]. Для малых углов отклонения лучей  $\gamma$  этот центр отклонения считался расположенным в точке  $C_0$ . Подробнее метод расчета линзы рассмотрен в § 4.3. Хотя такие плоско-вогнутые линзы используются до сих пор для кинескопов типа 61ЛК3Ц и обеспечивают приемлемую коррекцию в центральной зоне экрана и вдоль его осей, в остальной зоне экрана (особенно на углах раstra) коррекция чистоты цвета оставляет желать лучшего.

Первая публикация о применении ЭВМ для расчета корректирующих линз относится к 1965 г. [98]. В ней электронные траектории рассчитывались на основании экспериментальных данных о магнитном поле отклоняющей системы, для чего делалось множество замеров датчиками Холла. Это позволило методом сеток определить магнитное поле в 9000 точках пространства отклонения лучей и рассчитать нормали к поверхности линзы в 20 000 точках. При этом линза имела фасеточную («чешуйчатую») поверхность вместо непрерывной — что характерно для всех зарубежных методов расчета линз. Смешение экспериментальных и расчетных методов (т. е. точная обработка неточных исходных данных) не может гарантировать точности и устойчивости полученных результатов.

В последнее время в качестве исходных данных для расчета корректирующих линз используют результаты измерений погрешностей положения центра следа электронного луча  $SE$  относительно центра точечного элемента экрана  $SL$ . Измерения проводятся в контрольных точках на поверхности экрана, расположенных обычно в узлах прямоугольной сетки (всего обычно около 30...40 точек) — см. рис. 4.2.

Измерения проводятся на экране кинескопа, нанесенном с применением некоторой исходной (опорной) корректирующей линзы, например плоско-вогнутого типа. Из-за несовершенства линзы в каждой контрольной точке с координатами  $x, y$  имеет место

ошибка  $V$  с составляющими  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . Зависимости  $\Delta x(x, y)$  и  $\Delta y(x, y)$  используются в качестве исходных данных для расчета более совершенной корректирующей линзы.

Обычно такие измерения проводятся на фотографиях, снятых с отдельных участков экрана при сильном увеличении, что является весьма трудоемкой операцией. Поэтому заслуживает внимания автоматизированный метод получения таких данных, описанный в [99]. Здесь перед экраном на специальной оправке располагают в виде матрицы  $11 \times 9 = 99$  фоточувствительных элементов. Каждый анализирует зону площадью около  $0,3 \text{ см}^2$  с точностью  $\pm 6 \text{ мкм}$  (максимальные погрешности  $\Delta x$  и  $\Delta y$  обычно около  $100 \text{ мкм}$ ). Данные снимаются одновременно со всех элементов.

Измерения обычно проводят на партии однотипных кинескопов (например, 10 шт.) и берут средние значения смещений  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . Практика показывает, что разброс результатов между отдельными кинескопами одной партии все же достаточно велик. Многое зависит от точности юстировки отклоняющей системы и других наружных устройств. Весьма желательно проводить эту юстировку так, чтобы погрешность в центре экрана была близка к нулю. Для кинескопов с динамическим сведением лучей (типа 61ЛКЗЦ) измерения следует проводить после настройки сведения лучей по всему экрану. Здесь понятие оптимальной настройки весьма неопределенно и субъективно, поэтому возможен разброс данных даже при измерениях на одном кинескопе разными операторами.

Значительно проще получение данных для кинескопов с линейным расположением прожекторов, штриховым вертикальным экраном и «самосводящими» отклоняющими системами. Основное преимущество здесь состоит в том, что достаточно определить данные только для  $\Delta x$ , так как смещение электронного луча вдоль полосы экрана  $\Delta y$  не влияет на чистоту цвета. Кроме того, отсутствие регулировок динамического сведения уменьшает вероятность разброса данных за счет разброса в настройке органов регулировки сведения.

Расчет систем коррекции чистоты цвета является важнейшим звеном при проектировании кинескопов. Общий алгоритм проектирования трехлучевого масочного кинескопа показан на рис. 4.3.

Исходные данные определяются основными габаритными размерами кинескопа — размером экрана, углами отклонения, диаметром горловины. Задается обычно и разрешающая способность, что позволяет определить шаг отверстий маски и особенности фокусирующей системы блока прожекторов.

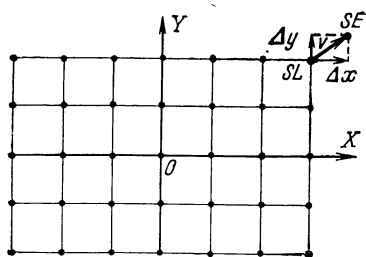


Рис. 4.2. Исходные данные для расчета корректирующей линзы

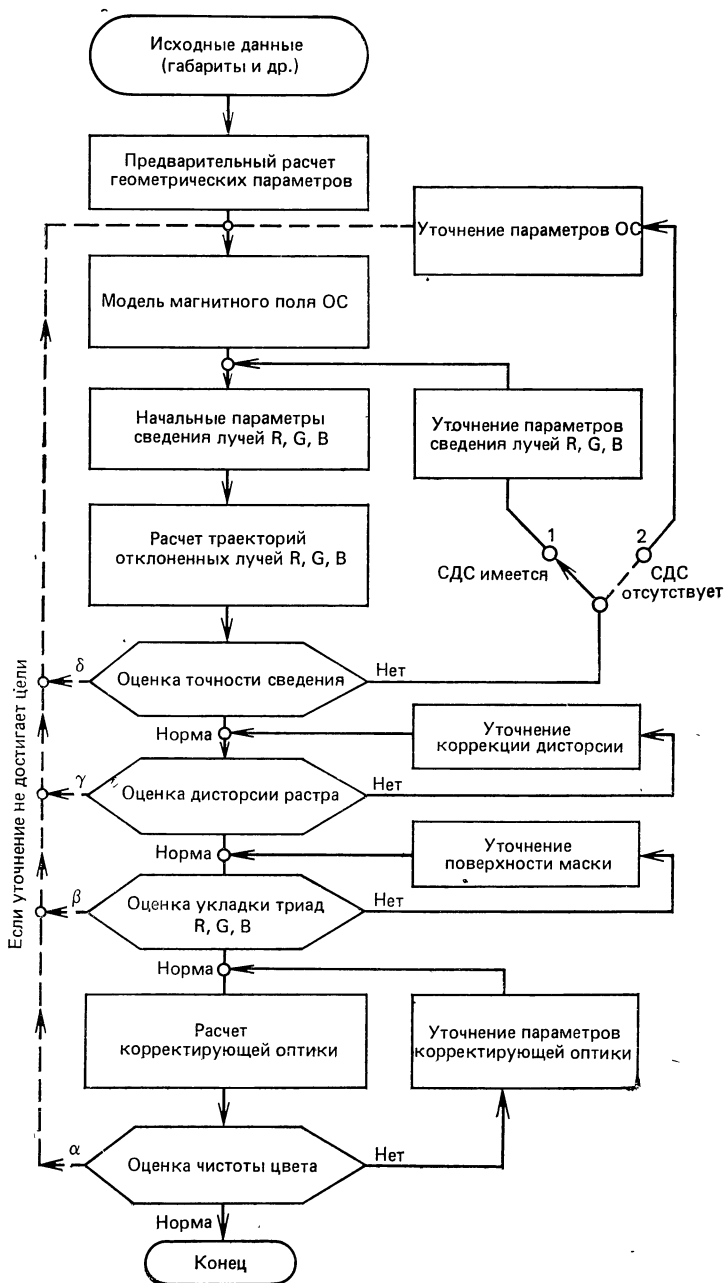


Рис. 4.3. Общий алгоритм проектирования масочного кинескопа

*Предварительный расчет геометрических параметров* определяет угол начального (статического) сведения лучей, расстояние маска — экран, а также форму поверхности маски (при заданной поверхности экрана), обеспечивающую хорошую укладку триад R, G, B [1, с. 65—78].

Создание модели магнитного поля отклоняющей системы является весьма важным звеном при проектировании кинескопа. Однако эта задача пока полностью не решена, так как трудно установить связь между параметрами конструкции отклоняющей системы и структурой магнитного поля (см. гл. 3).

*Начальные параметры сведения лучей R, G, B* необходимы в качестве начальных условий при численном решении дифференциальных уравнений траекторий электронных лучей. Для кинескопов с самосводящими отклоняющими системами эти параметры не меняются и соответствуют начальным параметрам сведения лучей R, G, B.

*Расчет траекторий отклоненных лучей* — важный и трудоемкий этап. Методика расчета должна определить положение следов R, G, B на экране с достаточно высокой точностью (несколько микрон). При использовании описанных в гл. 3 моделей отклоняющих полей, допускающих точный расчет составляющих магнитного поля в любой точке рабочей зоны отклонения, особых трудностей при расчете траекторий не возникает. Расчет траекторий электронов, доведенный до поверхностей масочно-экранного узла, позволяет дать оценку точности сведения электронных лучей на различных участках раstra. Если расхождение следов лучей R, G, B превышает установленные нормы, то изменяют параметры сведения лучей (для кинескопов, имеющих систему динамического сведения СДС) или параметры отклоняющей системы («самосводящего» типа). Оба варианта показаны на рис. 4.3 переключателем с позициями 1 и 2.

*Оценка дисторсии раstra* может повлиять на органы ее коррекции. Если коррекция производится электрическими методами (как в большинстве приемников ЦТ), то это не вызывает трудностей. Но попытка соответствующей ревизии отклоняющей системы [36] может оказаться не всегда выполнимой, так как последняя окажется перегруженной разными требованиями, и, удовлетворяя нормам дисторсии, не сможет отвечать другим, принципиально более важным условиям.

*Оценка укладки триад RGB* (следов электронных лучей на экране) весьма важна для получения нужного резерва по чистоте цвета. Некоторое улучшение плотности укладки триад можно достигнуть изменением расстояния маска — экран, т. е. уточнением формы маски. Но сферическая форма поверхности маски ограничивает эти возможности. Основным фактором, определяющим форму триады RGB, является магнитное поле отклоняющей системы. Для точечного экрана идеальной является форма триады RGB в виде равностороннего треугольника, но на краях и

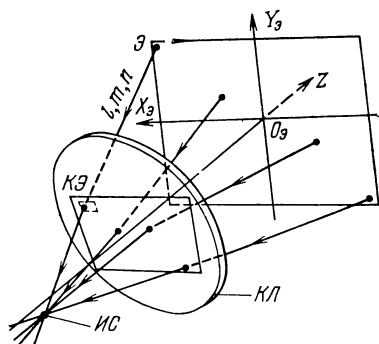


Рис. 4.4. К расчету корректирующей линзы:

ИС — источник света; КЛ — корректирующая линза, КЭ — корректирующий элемент; Э — условная плоскость экрана

углах растра она обычно не соблюдается (подробнее этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе).

Расчет корректирующей оптики является важнейшим этапом проектирования кинескопа, так как от него зависит оценка чистоты цвета.

Эта оценка определяется расхождением следов электронных лучей и световых лучей на поверхности экрана.

Для расчета корректирующей линзы необходимо знать ход электронных лучей в области маска — экран. Практически удобнее использовать не сферу экрана, а условную плоскость, перпендикулярную оси кинескопа  $OZ$  и касательную к центру экрана  $O_s$  (рис. 4.4). Для каждой точки Э этой условной плоскости, имеющей координаты  $X_s$  и  $Y_s$ , надо знать направляющие косинусы электронного луча  $l, m, n$  относительно осей  $X, Y, Z$  соответственно.

Требуется определить рабочую поверхность корректирующей линзы КЛ так, чтобы все заданные лучи сошлись в общей точке источника света ИС. При этом искомая поверхность линзы должна быть непрерывной. Конечно, для каждого заданного луча можно определить плоский корректирующий элемент КЭ, выбрав направление нормали  $N$  так, чтобы свести заданные лучи в точке ИС.

Задав точку пересечения корректирующего элемента КЭ на рассматриваемом луче, можно определить его наклон, т. е. направление нормали так, чтобы направить рассматриваемый луч в точку ИС. Элементарные соотношения, определяющие положение нормали элемента КЭ, приводятся в [3, с. 93]. Но положения всех корректирующих элементов должны быть увязаны так, чтобы они составляли набор элементарных касательных плоскостей к идеальной непрерывной поверхности. Нужная стыковка элементарных площадок КЭ при этом не гарантируется — вместо модели непрерывной поверхности можно получить модель ступенчатой поверхности. Отсюда следует, что задача сглаживания фасеточной поверхности оказывается достаточно сложной и не всегда выполнимой. Поэтому для расчета корректирующих линз следует предпочесть методы, обеспечивающие получение непрерывной поверхности линзы.



го или точного. Заметим, что одно из трех смещений (например,  $\Delta B=0$ ) можно сделать равным нулю выбором расстояния маска — экран. Точное нанесение штрихового экрана (рис. 4.5,з), при котором ширина полосок  $R$  и  $G$  уменьшена за счет увеличения ширины  $B$ -полоски, вряд ли целесообразно с точки зрения допусков на чистоту цветов.

Рассмотрим теперь особенности точного нанесения точечного экрана. Под влиянием магнитных полей систем отклонения и сведения лучей центры следов лучей  $R$ ,  $G$ ,  $B$  образуют неравносторонние треугольники (рис. 4.6). Изменением расстояния маска — экран можно добиться соприкосновения одного из элементов точечного экрана с двумя соседними. На рис. 4.6 элемент  $R$  соприкасается с элементом  $G$  той же триады и с элементом  $B_1$  другой триады (т. е.  $RG=RB_1$ ).

Проведем через центры ближайших элементов  $G$  и  $R$  прямые под углом  $\pm 30^\circ$  к горизонтальной оси и точку пересечения  $O$  выберем за начало системы координат. Тогда из элементарных геометрических соотношений определится шаг одноцветных элементов экрана  $A$ :

$$A = r_R/2 + r'_G + \sqrt{r_R^2/4 + r_G r_R + r_G^2 + 1,5 r_R \Delta_B + \Delta_B^2}, \quad (4.1)$$

где обозначения ясны из рис. 4.6.

Для практически важного случая, когда  $\Delta_B=0$ ,

$$A = r_R + r_G + r_B = r_m + r_n + r_6. \quad (4.2)$$

Здесь и далее обозначения  $r_6$ ,  $r_n$ ,  $r_m$  соответствуют большему, промежуточному и меньшему значениям  $r$ . При выполнении условия (4.2) треугольник  $RGB$  — равносторонний, что обеспечивает соприкосновение трех элементов точечного экрана (рис. 4.7,а). В частных случаях могут получаться равнобедренные треугольники «узкого» типа (когда  $r_n=r_m$ ) или «широкого» типа (когда  $r_n=r_6$ ). Последний случай показан на рис. 4.7,б. При этом каждый точечный элемент экрана соприкасается с четырьмя соседними.

Расстояние маска — экран следует выбирать так, чтобы соблюдалось соотношение (4.2). Диаметр точечного элемента экрана определяется длиной наименьшей стороны треугольника  $RGB$ , т. е.

$$d = \sqrt{r_n^2 + r_n r_m + r_m^2}. \quad (4.3)$$

Для идеального точечного экрана предельное значение диаметра элементов  $D = A/\sqrt{3}$ . Учитывая соотношение (4.2), можно оценить относительное уменьшение диаметра элемента при точном нанесении экрана

$$\frac{d}{D} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{(r_n/r_m)^2 + r_n/r_m + 1}}{r_6/r_m + r_n/r_m + 1}. \quad (4.4)$$

На рис. 4.8 показаны рассчитанные по формуле (4.4) зависимости отношения  $d/D$  от отношения  $r_6/r_m$  для двух случаев, когда  $r_n=r_6$  (треугольник  $RGB$  «широкого» типа — кривая 1) и когда

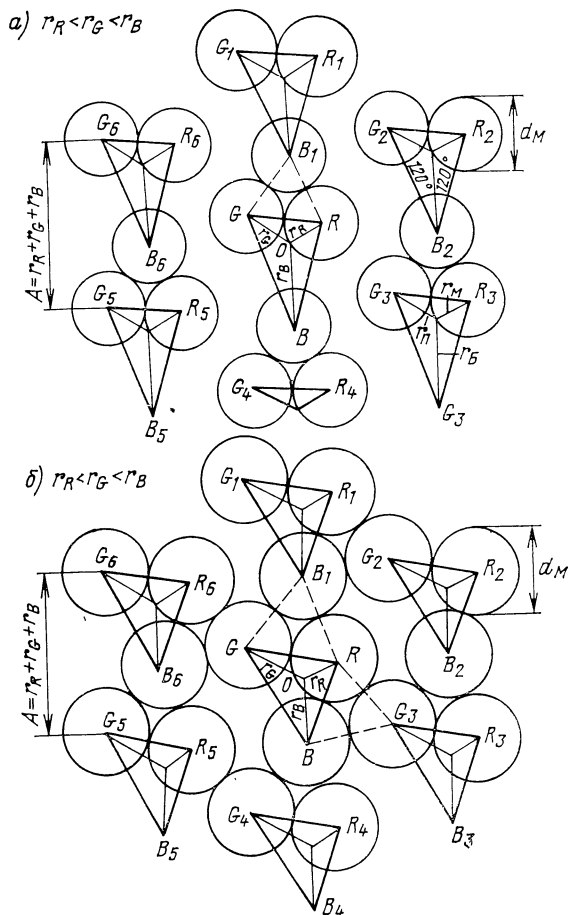


Рис. 4.7. Примеры укладки триад точечного экрана:

а — каждый элемент соприкасается с двумя соседними; б — каждый элемент соприкасается с четырьмя соседними

$r_p = r_m$  (треугольник RGB «узкого» типа — кривая 3). Из кривой 1 видно, что при треугольниках RGB «широкого» типа диаметр элементов экрана составляет около 90% предельного значения и мало зависит от отношения  $r_6/r_m$ . При треугольниках «узкого» типа кривая 3 заметно падает с ростом отношения  $r_6/r_m$ . Поэтому «широкий» тип треугольника RGB выгоднее «узкого».

Рассмотрим теперь особенности равномерного нанесения точечного экрана. Попытаемся вписать триаду круглых следов электронных лучей RGB в пределах триады соприкасающихся элементов RGB идеального точечного экрана. При этом используется смещение центра триады электронных пятен  $T$  (с координатами  $x_0, y_0$ ) относительно центра  $O$  триады точек экрана (рис. 4.9).

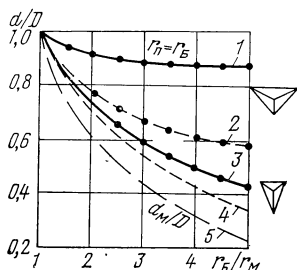


Рис. 4.8. Зависимость относительного диаметра  $d/D$  элемента точечного экрана от параметра триады  $r_6/r_m$

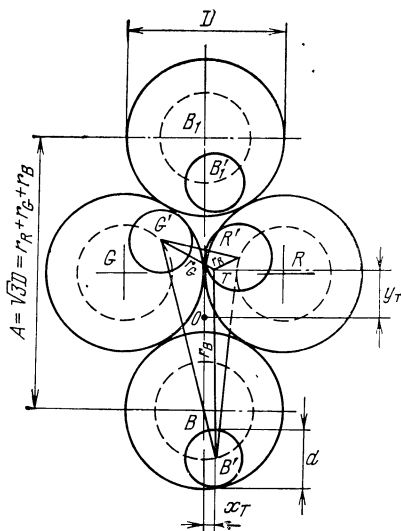


Рис. 4.9. Триады следов электронных лучей  $R, G, B$  внутри триад  $R, G, B$  точечных элементов экрана с равномерным нанесением

Из геометрии рис. 4.9 можно написать уравнения:

$$\begin{aligned} \left(x_t - \frac{\sqrt{3}}{2} r_n + \frac{D}{2}\right)^2 + \left(y_t + \frac{r_n}{2} - \frac{D}{2\sqrt{3}}\right)^2 &= \frac{(D-d)^2}{4}; \\ x_t^2 + \left(y_t - r_6 - \frac{D}{\sqrt{3}}\right)^2 &= \frac{(D-d)^2}{4}; \\ \left(x_t + \frac{\sqrt{3}}{2} r_m - \frac{D}{2}\right)^2 + \left(y_t + \frac{r_m}{2} - \frac{D}{2\sqrt{3}}\right)^2 &= \frac{(D-d)^2}{4}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Из этих трех уравнений можно определить неизвестные  $x_t, y_t, d$ , зная остальные параметры и учитывая соотношение (4.2). Полученные зависимости  $d/D$  от  $r_6/r_m$  показаны на рис. 4.8 пунктиром для случаев, когда  $r_n = r_6$  (кривая 2) и  $r_n = r_m$  (кривая 4). Видно, что при треугольниках RGB «широкого» типа точное нанесение экрана дает заметное преимущество перед равномерным (ср. кривые 1 и 2), а при «узком» типе треугольников RGB точное и равномерное нанесение экрана практически равноценны (ср. кривые 3 и 4).

Если вписывать триаду пятен точек так, чтобы центры этих триад совпадали (т. е.  $x_t = y_t = 0$ ), то получим соотношение

$$\frac{d}{D} = 1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r_6/r_m - 1}{r_6/r_m + 1}, \quad (4.6)$$

показанное на рис. 4.8 кривой 5. Эта кривая быстро падает с ростом отношения  $r_6/r_m$ , что явно невыгодно.

Следовательно, для точечного экрана точное нанесение предпочтительнее равномерного, хотя различие между этими типами экранов в частном случае для треугольников следов лучей RGB «узкого» типа невелико. Последнее объясняет тот факт, что на кинескопах типа 61ЛК3Ц (где равномерное нанесение экрана достигается поворотом источника света на  $120^\circ$  при одной общей плоско-вогнутой линзе) получается приемлемая чистота цветов. При равномерном нанесении экрана пятно расположено эксцентрично относительно точки экрана (рис. 4.9), поэтому ширина охранный зоны здесь неодинакова в разных направлениях.

#### 4.3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОСТЫХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЛИНЗ

**Исходные данные.** При разработке отечественных масочных кинескопов 53ЛК4Ц, 59ЛК3Ц и 61ЛК3Ц исходные данные для расчета простой корректирующей линзы плоско-вогнутого типа были получены методом, использующим представления об осевом  $\Delta P$  и радиальном  $\Delta S$  смещениях виртуального центра отклонения, впервые описанным в [100]. При этом методе считается, что точка виртуального центра отклонения  $C$  расположена на пересечении входящего в отклоняющее поле луча  $ДС$  с условной плоскостью отклонения  $ПО$  (рис. 4.10). Положение последней определяется осевым смещением  $\Delta P(\gamma)$ , зависящим только от угла отклонения луча  $\gamma$ , и обычно представляется формулой

$$\Delta P = \frac{l_H}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2}, \quad (4.7)$$

справедливой только для однородного магнитного поля с эффективной длиной  $l_H$ .

Радиальное смещение  $\Delta S$  пропорционально изменению угла сведения  $\Delta\theta$  и является функцией координат точки  $\mathcal{E}$  на поверхности экрана. Угол сведения  $\Delta\theta$  можно для каждой точки экрана  $\mathcal{E}$  определить экспериментально. Для этого сводят лучи в точке  $\mathcal{E}$  системой динамического сведения, а затем выключают развертки и измеряют для каждого из трех лучей децентровку  $\Delta y_0$ . С учетом соотношения (3.1) измерения можно ограничить только получением данных вдоль осей раstra. Реальные сигналы динами-

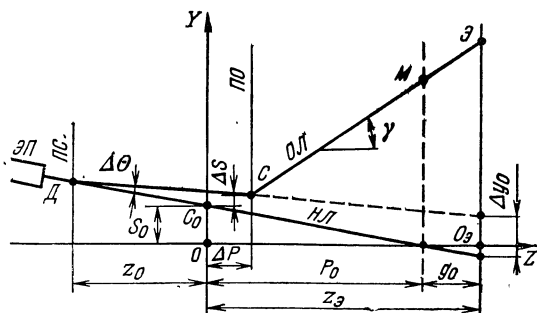


Рис. 4.10. К определению осевого  $\Delta P$  и радиального  $\Delta S$  смещений центра отклонения  $C$ :

ЭП — электронный прожектор; ПС — плоскость сведения; ПО — плоскость отклонения; ОЛ — отклоненный луч; НЛ — неотклоненный луч

ческого сведения содержат только пилообразные и параболические составляющие сигналов строчной и полукадровой частоты. С учетом этого радиальное смещение можно выразить через координаты точки Э ( $x_э$ ,  $y_э$ ) в виде

$$\Delta S(x_э, y_э) = H_1 x_э + H_2 x_э^2 + V_1 y_э + V_2 y_э^2, \quad (4.8)$$

где  $H_1$ ,  $V_1$  — амплитуды пилообразных составляющих;  $H_2$ ,  $V_2$  — амплитуды параболических составляющих. Эти коэффициенты определяют из данных эксперимента, где измеряют  $\Delta y_0$  (рис. 4.10).

Вместо прямоугольных координат можно использовать полярные, подставляя в (4.8)  $x_э = r_э \sin \psi_э$  и  $y_э = r_э \cos \psi_э$ , получаем

$$\Delta S(r_э, \psi_э) = r_э (H_1 \sin \psi_э + V_1 \cos \psi_э) + r_э^2 (H_2 \sin^2 \psi_э + V_2 \cos^2 \psi_э), \quad (4.9)$$

где  $\psi_э$  — угол азимута относительно вертикальной оси ОУ (см. далее рис. 4.12). Соответствующие кривые для В- и R-лучей показаны на рис. 4.11. Они аналогичны кривым, приведенным в [2, с. 159], и соответствующим выражениям из [101], но выражения (4.9) не дают разрывов производных этих функций и учитывают реальную форму сигналов сведения.

**Погрешность метода.** Описанный метод предполагает пересечение отклоненного и неотклоненного лучей в общей точке С условной плоскости отклонения. Но уже из простейшего примера однородного магнитного отклоняющего поля видно, что указанные лучи не могут пересекаться, являясь касательными к пространственной кривой — винтовой линии.

В результате можно оценить погрешность метода и определить поправки для простейшей модели однородного отклоняющего магнитного поля. На основании формул для однородного поля [1, с. 144] можно определить расхождение между продолжениями отклоненного и неотклоненного лучей в центральной плоскости, расположенной на расстоянии  $l_H/2$  от входной плоскости однородного поля. Тогда в направлении отклонения центрального луча (меридиональном) это расхождение

$$\Delta x = \frac{l_H}{2} \left[ 2 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} - \operatorname{tg} \gamma + \theta \cos \psi_э (\sec^3 \gamma + 1 - 2 \sec \gamma) \right], \quad (4.10)$$

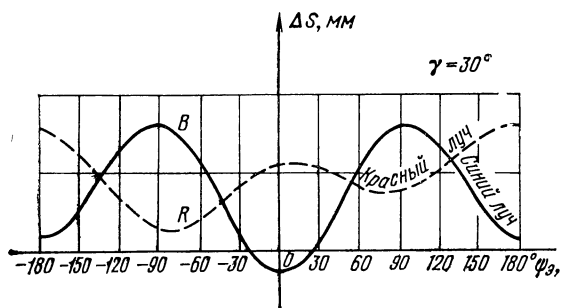


Рис. 4.11. Зависимость радиального смещения центра отклонения от азимутального угла

а для направления, перпендикулярного отклонению (тангенциального)

$$\Delta y = 0,5 l_H \theta \sin \psi_0 [\sec \gamma - 1 - (\sin^2 \gamma)/3], \quad (4.11)$$

где  $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$  — угол сведения.

Выражения (4.10) и (4.11) определяют расхождение неотклоненного и отклоненного лучей в центральной плоскости однородного поля, т. е. в плоскости, где расположены центры отклонения при малых углах.

**Аберрационные фигуры простых линз.** Рассмотрим аберрационные фигуры простых корректирующих линз, например плоско-вогнутой линзы, показанной на рис. 4.1. Аберрации 3-го порядка для оптической системы с симметрией вращения описываются выражениями [7, с. 219]:

$$\delta G' = Ar_0^3 \sin \psi_0 + Blr_0^2 \sin 2\psi_0 + Dl^2 r_0 \sin \psi_0; \quad (4.12a)$$

$$\delta g' = Ar_0^3 \cos \psi_0 + Blr_0^2 (2 + \cos 2\psi_0) + Cl^2 r_0 \cos \psi_0 + El^3, \quad (4.12б)$$

где  $\delta G'$  и  $\delta g'$  — горизонтальные и вертикальные смещения точки В аберрационной фигуры относительно центральной точки  $C_0$  (рис. 4.12,б);  $r_0, \psi_0$  — полярные координаты точки Э (рис. 4.12,а);  $l$  — расстояние точечного источника света И от оси системы; А, В, С, D, E — аберрационные коэффициенты 3-го порядка.

На рис. 4.12 показано, как семейство задаваемых лучей (а) образует в плоскости центральной точки  $C_0(z=0)$  аберрационную фигуру (б). Для электронных лучей из точки Э условной плоскости экрана и виртуальный центр отклонения С проводим прямую продолжение луча ЭС до пересечения в точке В с плоскостью  $z=0$  (где находится точка  $C_0$  — центр отклонения при малых углах). Окружности радиуса  $r_0$  на плоскости экрана  $z_0$  в плоскости аберраций  $z=0$  соответствует некоторая аберрацион-

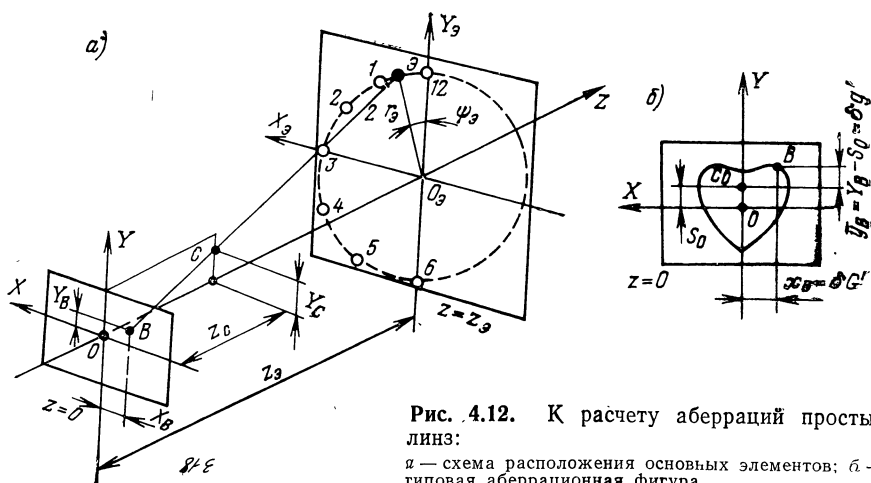


Рис. 4.12. К расчету аберраций простых линз:

а — схема расположения основных элементов; б — типовая аберрационная фигура

ная фигура. Очевидно, что в идеале абберационная фигура системы электронных лучей должна соответствовать абберационной фигуре системы световых лучей, прошедших через корректирующую линзу.

В выражениях для аббераций (4.12) можно пренебречь членами, содержащими  $l^2$  и  $l^3$ , т. е. учитывать только сферическую абберацию (коэффициент А) и кому (коэффициент В). Это можно допустить ввиду малости расстояния  $l$  по сравнению с расстоянием от источника света до линзы (см. рис. 4.1). С учетом этих обстоятельств, а также полагая  $l \approx S_0$  и используя принятые на рис. 4.12 обозначения, можно написать:

$$\begin{aligned}\bar{x}_B &= \sin \psi_0 (Ar_0^3 + 2Br_0^2 S_0 \cos \psi_0); \\ \bar{y}_B &= y_B - S_0 = \cos \psi_0 (Ar_0^3 + 2Br_0^2 S_0 \cos \psi_0) + Br_0^2 S_0.\end{aligned}\quad (4.13)$$

Из формул (4.13) можно убедиться, что они в параметрической форме описывают абберационную фигуру типа улитки Паскаля, а именно

$$\begin{aligned}x &= \sin \psi_0 (a + b \cos \psi_0); \\ y &= \cos \psi_0 (a + b \cos \psi_0) + l/2,\end{aligned}\quad (4.14)$$

где  $a = Ar_0^2$  — сферическая абберация;  $b = 2BS_0r_0^2$  — кома;  $b/2$  — смещение центра фигуры вдоль оси  $OY$ .

**Абберационные фигуры системы электронных лучей. Условия симметрии.** Если заданная система электронных лучей, исходящих из окружности радиуса  $r_0$  условной плоскости экрана  $z = z_0$  (рис. 4.12), образует в плоскости аббераций  $z = 0$  кривую типа улитки Паскаля (или близкую к ней — в пределах заданной точности), то это указывает на возможность коррекции такой системы лучей простыми линзами.

Необходимым условием при этом является симметрия абберационных фигур электронных лучей относительно меридиональной плоскости, проходящей через ось кинескопа, и источник света. Поэтому такой симметрией должны обладать функции  $\Delta S(r_0, \psi_0)$ , определяемые формулой (4.9), выражающие радиальное смещение виртуального центра отклонения для всех трех лучей R, G, В кинескопа. Для В-луча это выполняется, если  $H_1 = 0$ . Для R-луча (или G-луча) условия симметрии требуют, чтобы  $H_1 = \sqrt{3}V_1$  и  $H_2 = V_2$ . Из рис. 4.11 видно, что условия симметрии выполняются для В-луча и не выполняются для R- и G-лучей.

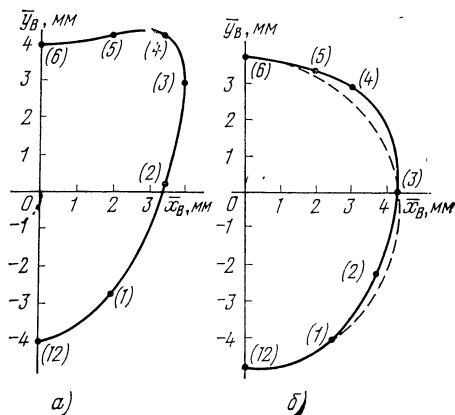
Указанные условия симметрии необходимы, но недостаточны для реализации коррекции простыми линзами. Важную роль играет форма абберационной кривой. Например, даже для В-лучей (где условия симметрии соблюдаются) различие параболических составляющих  $H_2$  и  $V_2$  приводит к тому, что абберационные кривые принимают характерную «сердцевидную» форму (рис. 4.13,а), отличную от улитки Паскаля.

Положение можно улучшить, если использовать уточнения по формулам (4.10) и (4.11). Тогда при постоянном угле сведения

$\theta$  получаются кривые типа улитки Паскаля (рис. 4.13, б — пунктир), а при изменении угла сведения  $\Delta\theta$  отличие кривой (рис. 4.13, б — сплошная линия) от улитки Паскаля невелико. Все же коррекция простыми линзами недостаточна и поэтому их следует заменить асимметричными линзами, рассматриваемыми далее.

Рис. 4.13. Аберрационные фигуры для электронных лучей

а — при методе смещений виртуального центра отклонения; б — при отклонении лучей в однородном магнитном поле (нумерация точек соответствует рис. 4.12, а)



#### 4.4. ОБЩИЙ МЕТОД РАСЧЕТА АСИММЕТРИЧНЫХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЛИНЗ

В литературе по оптике известны методы расчета асферических линз с симметрией вращения [102, 103]. Методы расчета асимметричных корректирующих линз в литературе не рассматривались, но отмечались некоторые особенности и трудности такого расчета [4, с. 67]. Ниже приводится метод расчета, предложенный автором [104].

Основная трудность состоит в следующем. Семейство световых лучей должно иметь волновую поверхность, ортогональную к этим лучам, т. е. представлять нормальную конгруэнцию лучей. Но семейство электронных лучей кинескопа, отклоненных магнитным полем, этим свойством обладать не обязано и поэтому оно может представлять косую конгруэнцию лучей. Последнее характерно для электронных лучей, прошедших магнитное поле [8, с. 812]. Поэтому аппроксимация электронных лучей кинескопа соответствующими световыми лучами в общем случае может быть выполнена только приблизительно, в пределах заданной точности.

Простой расчет показывает, что угловому расхождению между электронными и световыми лучами в пределах минуты соответствует линейное расхождение между следами этих лучей на экране порядка нескольких микрон. Поэтому требования к точности расчета корректирующей линзы достаточно высокие.

Задача может быть поставлена следующим образом (рис. 4.14). Пусть в отдельных точках  $S$  условной плоскости экрана УПЭ (касательной к экрану в его центре) заданы направляющие косинусы электронных лучей  $l, m, n$ . Требуется между точечным источником света  $O$  и экранно-масочным узлом кинескопа поместить такую линзу, чтобы световые лучи при экспонировании экрана совпали с заданными электронными лучами в пределах требуемой точности. Для наглядности ход лучей можно обратить и



Если в качестве исходной поверхности взять условную плоскость экрана УПЭ  $z=z_0$ , то для луча  $LS$  с направляющими косинусами  $l, m, n$  условие нормальной конгруэнции имеет вид

$$\partial l / \partial y = \partial m / \partial x. \quad (4.18)$$

При этом скалярный параметр волновой поверхности

$$\lambda(x, y) = C - \int_0^x l(x, y) dx - \int_0^y m(0, y) dy, \quad (4.19)$$

где постоянная  $C = P_0 - S_0$  определяет расстояние вдоль оси между волновой и исходной поверхностями (рис. 4.14).

Искомые конгруэнции световых лучей можно представить полиномами степени  $n$ , а именно:

$$\begin{aligned} l &= \sum_{i+j=1}^{i+j=n} a_{ij} x^i y^j; \\ m &= \sum_{i+j=1}^{i+j=n} b_{ij} x^i y^j. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Тогда условие нормальной конгруэнции (4.18) определит связь между коэффициентами полиномов

$$(j+1) a_{i, j+1} = (i+1) b_{i+1, j}. \quad (4.21)$$

Общее число независимых коэффициентов (полагая  $a_{00} = b_{00} = 0$ ) для полиномов степени  $n$

$$N = n(n+5)/2. \quad (4.22)$$

Используя полиномы (4.20) в выражении (4.19), можно получить для скалярного параметра волновой поверхности выражение

$$\lambda(x, y) = C - \sum_{i+j=1}^{i+j=n} \frac{a_{ij}}{i+1} x^{i+1} y^j - \sum_{j=1}^{j=n} \frac{b_{0j}}{j+1} y^{j+1}. \quad (4.23)$$

Это позволит для каждого луча определить координаты соответствующей точки  $P$  волновой поверхности:

$$x_P = x + \lambda l; \quad y_P = y + \lambda m; \quad z_P = z_0 + \lambda n, \quad (4.24)$$

где  $\lambda < 0$ .

Важно отметить, что выполнение условия нормальной конгруэнции (4.18) позволяет получить непрерывные волновые поверхности, а также непрерывные поверхности линзы. При несоблюдении условия (4.18) эти поверхности могут оказаться ступенчатыми.

После того как известна волновая поверхность  $P(x, y)$ , можно перейти к расчету поверхности линзы. Рассмотрим линзу с плоской поверхностью, обращенной к экранно-масочному узлу и расположенной на расстоянии  $z_L$  от источника света  $O$  перпендикулярно оси кинескопа. Требуется определить противоположную поверхность линзы, обращенную к источнику света  $O$  (рис. 4.14).

Оптическая длина всех лучей между точечным источником и волновой поверхностью должна быть постоянна, т. е.

$$|OK| + \mu |KL| + |LP| = A = \text{const}, \quad (4.25)$$

где  $OK$  — участок источника — линза;  $KL$  — участок внутри линзы;  $LP$  — участок от линзы до волновой поверхности;  $\mu$  — показатель преломления материала линзы.

Для определения постоянной  $A$  используем соотношение вдоль оси  $OZ$ , т. е.

$$A = z_0 + (\mu - 1) T_L, \quad (4.25a)$$

где  $T_L$  — толщина линзы вдоль оси  $OZ$ .

Остальные величины, входящие в (4.25):

$$\begin{aligned} |LP| &= (z_P - z_L)/n; \quad |KL| = (z_L - z_K)/n'; \\ |OK| &= \sqrt{x_K^2 + y_K^2 + z_K^2}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Используя уравнение луча  $KL$ , можно исключить  $x_K$  и  $y_K$ , оставив неизвестную  $z_K$ . Последняя определится из решения квадратного уравнения в виде

$$z_K = \frac{b + \sqrt{b^2 - ac}}{a}, \quad (4.27)$$

где  $a = \mu^2 - 1$ ;

$$b = z_L (\mu^2 - 1 + n'^2) + n' (l' x_L + m' y_L - B_1 \mu);$$

$$c = z_L^2 (\mu^2 - 1 + n'^2) + 2 z_L n' (l' x_L + m' y_L - B \mu) + n'^2 (B^2 - x_L^2 - y_L^2);$$

$$B = A - (z_P - z_L)/n.$$

Все входящие в эти выражения величины можно представить через параметры рассматриваемого луча  $x, y, l, m$ . Действительно, координаты точки  $L$  определяются уравнением прямой  $LS$ , а направляющие косинусы луча  $KL$  (внутри линзы) — из закона преломления, т. е.

$$x_L = x + \frac{l}{n} (z_L - z_0); \quad y_L = y + \frac{m}{n} (z_L - z_0);$$

$$l' = l/\mu; \quad m' = m/\mu; \quad n' = \sqrt{\mu^2 - l^2 - m^2}/\mu.$$

Определив из (4.27) координату  $z_K$  искомой поверхности линзы, остальные координаты находим из уравнения луча  $KL$ , т. е.

$$x_K = x_L + \frac{l'}{n'} (z_K - z_L); \quad (4.28)$$

$$y_K = y_L + \frac{m'}{n'} (z_K - z_L).$$

Определив координаты точки  $K$  неплюской поверхности линзы, можно при необходимости найти направляющие косинусы  $l_n, m_n$  единичного вектора нормали  $\mathbf{n}$  к этой поверхности в данной точ-

ке  $K$ . Используя закон преломления в векторной форме [106], находим

$$l_n = \frac{\mu l' - l_0}{\sqrt{(\mu l' - l_0)^2 + (\mu m' - m_0)^2 + (\mu n' - n_0)^2}}; \quad (4.29)$$

$$m_n = \frac{\mu m' - m_0}{\sqrt{(\mu l' - l_0)^2 + (\mu m' - m_0)^2 + (\mu n' - n_0)^2}}, \quad (4.30)$$

где  $l_0 = x_K / |OK|$ ;  $m_0 = y_K / |OK|$ ;  $n_0 = z_K / |OK|$ ;  $|OK| = \sqrt{x_K^2 + y_K^2 + z_K^2}$  — см. рис. 4.14.

Практически в определении нормалей к точкам неплоской поверхности линзы при рассматриваемом методе нет необходимости. Действительно, если конгруэнцию лучей удастся описать аналитически, например в виде полиномов (4.20), то это дает возможность определить любое число точек на искомой поверхности линзы. Это число точек определяется обычно возможностями инструмента для изготовления линзы, работающего от ЭВМ с заданной программой. Поэтому выражения (4.29) и (4.30) могут быть использованы для контроля расчета хода лучей, а не для изготовления линзы.

#### 4.5. ОСОБЕННОСТИ АППРОКСИМАЦИИ КОНГРУЭНЦИИ ЛУЧЕЙ

В рассмотренном выше общем методе расчета линзы могут возникнуть трудности при определении коэффициентов полиномов (4.20), связанные с особенностями задач аппроксимации функций двух переменных. Задача аппроксимации нормальной конгруэнции лучей решается значительно проще, если использовать особенности аналитических функций, т. е. аппарат теории функций комплексного переменного.

С этой целью направляющие косинусы лучей, заданных в контрольных точках условной плоскости экрана  $УПЭ$ , представим в виде суммы двух составляющих:

$$l = l_s + \Delta l; \quad m = m_s + \Delta m. \quad (4.31)$$

Первые составляющие  $l_s$  и  $m_s$  выражают направляющие косинусы для гомоцентрических лучей, соединяющих источник света  $O$  с рассматриваемой точкой плоскости экрана  $S(x, y)$ . Они определяются из геометрических соотношений (рис. 4.15):

$$l_s = x / |OS|; \quad m_s = y / |OS|, \quad (4.32)$$

где  $|OS| = \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}$ .

Вторые составляющие представляют собой разности  $\Delta l$  и  $\Delta m$  между направляющими косинусами рассматриваемых и гомоцентрических лучей. В дальнейшем для этих величин примем обозначения, обычно используемые в теории функций комплексного переменного, т. е.

$$u(x, y) = \Delta m(x, y); \quad v(x, y) = \Delta l(x, y) \quad (4.33)$$

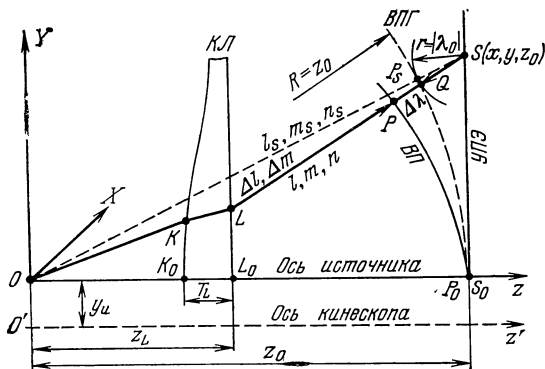


Рис. 4.15. К расчету линзы с использованием отклонений направляющих косинусов  $\Delta l$  и  $\Delta m$  от гомоцентрического луча  $OS$ :

ВПГ — волновая поверхность гомоцентрических лучей (остальные обозначения, как на рис. 4.14)

На условной плоскости экрана УПЭ, в каждой контрольной точке координаты которой можно выразить комплексной величиной

$$z = x + iy, \quad (4.34)$$

задан вектор погрешности направляющих косинусов в виде функции комплексного переменного

$$w(z) = u(x, y) + iv(x, y). \quad (4.35)$$

На рис. 4.16 показан пример, используемый в дальнейшем. Здесь в четырех контрольных точках, расположенных в углах первого квадранта плоскости экрана, заданы составляющие  $u$  (числитель) и  $v$  (знаменатель). Разбив этот квадрант прямоугольной сеткой и пронумеровав узловые точки ( $k=1 \dots 25$ ), можно по заданным значениям составляющих  $u$  и  $v$  в контрольных точках ( $k=1, 5, 21, 25$ ) при помощи интерполяции определить значения этих составляющих в остальных точках. На рис. 4.16 координаты точек выражены в условных единицах (в скобках даны координаты в миллиметрах, полагая, что одна условная единица соответствует 200 мм).

Следовательно, задача сводится к определению плоского поля векторов на основании заданных значений их составляющих в нескольких контрольных точках условной плоскости. Составляющие векторов выражают «возмущения» направляющих косинусов данной конгруэнции лучей относительно гомоцентрического пучка лучей, исходящих из точечного источника света. Линза должна скорректировать эти «возму-

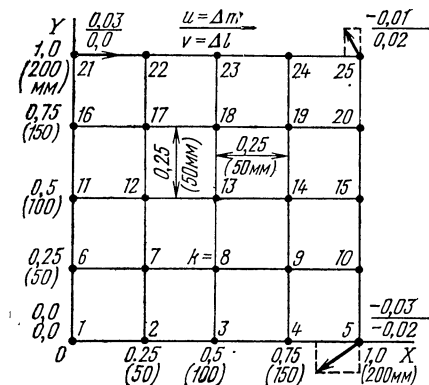


Рис. 4.16. Пример расчета векторного поля погрешностей в 25 точках

щения», т. е. сфокусировать лучи данной конгруэнции в точке источника света.

Представление вектора погрешности направляющих косинусов рассматриваемой конгруэнции лучей в виде функции комплексного переменного  $w(z)$ , т. е. в соответствии с формулой (4.35), имеет определенный физический смысл. Действительно, из уравнений Коши — Римана

$$\frac{du}{dx} = \frac{dv}{dy}; \quad \frac{du}{dy} = -\frac{dv}{dx} \quad (4.36)$$

можно видеть, что первое из них соответствует условию нормальной конгруэнции (4.18), т. е. условию, что данное векторное поле должно быть потенциальным или безвихревым.

Второе из этих уравнений определяет условие соленоидальности данного векторного поля. Это соответствует тому, что линза не вносит дополнительных источников света — помимо существующего в данной системе точечного источника. Иначе говоря, гомоцентрический пучок лучей создает несоленоидальное поле (составляющие  $l_s$  и  $m_s$  выражений (4.31)), но изменения  $\Delta l$  и  $\Delta m$  (вторые составляющие выражений (4.31)) соответствуют составляющим соленоидального векторного поля.

Рассмотрим интеграл от функции комплексного переменного (4.35)

$$P(z) = \int_0^z w(z) dz = \int_0^z u dx - v dy + i \int_0^z v dx + u dy. \quad (4.37)$$

Это выражение соответствует комплексному потенциалу в плоских электростатических задачах, мнимая часть которого характеризует эквипотенциальные линии [107].

В нашем случае мнимая часть (4.37) характеризует отклонение  $\Delta\lambda$  волновой поверхности рассматриваемой системы лучей от сферы сравнения (волновой поверхности гомоцентрических лучей ВПГ — см. рис. 4.15). Тогда скалярный параметр волновой поверхности по аналогии с (4.19) определится выражением

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = \lambda_0 - \text{Im} \int_0^z w(z) dz = C + z_0 - \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2} - \\ - \int_0^x v(x, y) dx - \int_0^y u(0, y) dy, \quad (4.38)$$

где константа  $C$  определяет значение параметра  $\lambda_0$  при  $x=y=0$  (на рис. 4.15  $C=0$ ).

Для гомоцентрического пучка лучей волновой поверхностью будет сфера с центром в точке источника  $O$ . На рис. 4.15 выбран радиус этой сферы  $R=z_0$ . На гомоцентрическом луче  $OS$  показана точка  $P_s$  пересечения этого луча со сферой сравнения ВПГ. Расстояние от точки  $P_s$  до точки  $S$

$$\lambda_0 = z_0 - \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2} \quad (\lambda_0 < 0). \quad (4.39)$$

Если из рассматриваемой точки плоскости экрана  $S$  провести, как из центра, сферу радиуса  $r = |\lambda_0|$ , то на рассматриваемом луче  $SL$  (с направляющими косинусами  $l = l_s + \Delta l$ ,  $m = m_s + \Delta m$ ) определится точка  $Q$ , координаты которой

$$\begin{aligned}x_Q &= x + l \lambda_0; \\y_Q &= y + m \lambda_0; \\z_Q &= z_0 + n \lambda_0.\end{aligned}\quad (4.40)$$

Искомая точка волновой поверхности  $P$  находится от точки  $Q$  на расстоянии  $\Delta\lambda$ , характеризующем отклонение волновой поверхности от сферы сравнения. На основании формулы (4.38) имеем

$$\Delta\lambda = -\operatorname{Im} \int_0^z \mathbf{w}(z) dz = \int_0^x v(x, y) dx - \int_0^y u(0, y) dy. \quad (\Delta\lambda < 0). \quad (4.41)$$

Тогда координаты искомой точки  $P$  волновой поверхности

$$\begin{aligned}x_P &= x + l(\lambda_0 + \Delta\lambda); \\y_P &= y + m(\lambda_0 + \Delta\lambda); \\z_P &= z_0 + n(\lambda_0 + \Delta\lambda), \\(l^2 + m^2 + n^2 &= 1).\end{aligned}\quad (4.42)$$

Таким образом находятся точки  $P$  волновой поверхности заданной системы лучей, т. е. для контрольных точек на плоскости экрана. Для нахождения волновой поверхности для всех остальных точек необходимо решить задачу интерполяции в комплексной области.

Для выполнения интегрирования в соответствии с (4.41) следует искомую функцию (4.35) представить многочленом по степеням комплексного аргумента  $z = x + iy$ .

Пусть на условной плоскости экрана заданы  $n$  контрольных точек  $z_k = x_k + iy_k$  (где  $k = 1, 2, \dots, n$ ). В каждой такой точке известны значения функции  $\mathbf{w}_k = u_k + iv_k$ . Тогда для определения значений функции в любой точке  $z = x + iy$  плоскости  $XOY$  можно использовать интерполяционный полином Лагранжа в комплексной области

$$\mathbf{w}(z) = \sum_{k=1}^n \prod_{j=1 \atop (j \neq k)}^n \frac{z - z_j}{z_k - z_j} \mathbf{w}_k. \quad (4.43)$$

Но такая форма не удобна для интегрирования, поэтому для наших целей интерполяционный полином следует представить в явном виде

$$\mathbf{w}(z) = \sum_{l=1}^n \mathbf{B}_l z^{l-1}, \quad (4.44)$$

где  $\mathbf{B}_l$  — комплексные коэффициенты, подлежащие определению. Для нахождения этих коэффициентов используем соотношения, вытекающие из формул Вьета [108], а именно

$$\mathbf{B}_l = \sum_{k=1}^n (-1)^l A_{lk} \mathbf{w}_k = \sum_{k=1}^n \frac{a_{lk}}{c_k} \mathbf{w}_k (-1)^l, \quad (4.45)$$

Т а б л и ц а 4.1. Коэффициенты формулы (4.45) при  $n=4$

Коэффициент	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$B_l$
$a_{1k}$	$a_{11} = z_2 z_3 z_4$	$a_{12} = z_1 z_3 z_4$	$a_{13} = z_1 z_2 z_4$	$a_{14} = z_1 z_2 z_3$	$B_1 = - \sum_{k=1}^4 \frac{a_{1k}}{c_k} w_k$
$a_{2k}$	$a_{21} = z_2 z_3 + z_2 z_4 + z_3 z_4$	$a_{22} = z_1 z_3 + z_1 z_4 + z_3 z_4$	$a_{23} = z_1 z_3 + z_1 z_4 + z_2 z_4$	$a_{24} = z_1 z_2 + z_1 z_4 + z_2 z_3$	$B_2 = \sum_{k=1}^4 \frac{a_{2k}}{c_k} w_k$
$a_{3k}$	$a_{31} = z_2 + z_3 + z_4$	$a_{32} = z_1 + z_3 + z_4$	$a_{33} = z_1 + z_2 + z_4$	$a_{34} = z_1 + z_2 + z_3$	$B_3 = - \sum_{k=1}^4 \frac{a_{3k}}{c_k} w_k$
$a_{4k}$	$a_{41} = 1$	$a_{42} = 1$	$a_{43} = 1$	$a_{44} = 1$	$B_4 = \sum_{k=1}^4 \frac{a_{4k}}{c_k} w_k$
$c_k$	$c_1 = (z_1 - z_2) \times (z_1 - z_3) (z_1 - z_4)$	$c_2 = (z_2 - z_1) \times (z_2 - z_3) (z_2 - z_4)$	$c_3 = (z_3 - z_1) \times (z_3 - z_2) (z_3 - z_4)$	$c_4 = (z_4 - z_1) \times (z_4 - z_2) (z_4 - z_3)$	

где  $A_{lh}$  — элементы квадратной матрицы размерности  $n \times n$ , зависящие только от выбора координат  $(x_h, y_h)$  контрольных точек на условной плоскости экрана  $XOY$ ,  $c_h = \prod_{j=1 \atop (j \neq k)}^n (z_h - z_j)$  — коэффициенты в знаменателях;  $a_{lh}$  — элементы матрицы, представляющие сумму всевозможных произведений из  $z_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ; кроме  $j=k$ ) по  $n-l$  множителей в каждом слагаемом. Число таких слагаемых будет определяться числом соответствующих сочетаний, т. е.  $M_1 = C^{n-l}_{n-1}$ . Подпрограмма для определения суммы произведений из  $N$  чисел по  $M$  множителей в каждом слагаемом приводится далее.

Полученное выражение для полинома Лагранжа в виде (4.44) позволяет найти интеграл (4.37) в виде

$$P(z) = \int_0^z \omega(z) dz = \sum_{l=1}^n B_l \frac{z^l}{l}, \quad (4.46)$$

мнимая часть которого определяет величину  $\Delta\lambda$  согласно (4.41).

Поясним изложенное примером, когда  $n=4$ . Тогда в обычной форме (4.43) интерполяционный полином Лагранжа имеет вид

$$\begin{aligned} \omega = & \frac{(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} \omega_1 + \frac{(z-z_1)(z-z_3)(z-z_4)}{(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} \omega_2 + \\ & + \frac{(z-z_1)(z-z_2)(z-z_4)}{(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} \omega_3 + \frac{(z-z_1)(z-z_2)(z-z_3)}{(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} \omega_4. \end{aligned} \quad (4.47)$$

Нам нужно представить его в виде

$$\omega = B_4 z^3 + B_3 z^2 + B_2 z + B_1. \quad (4.48)$$

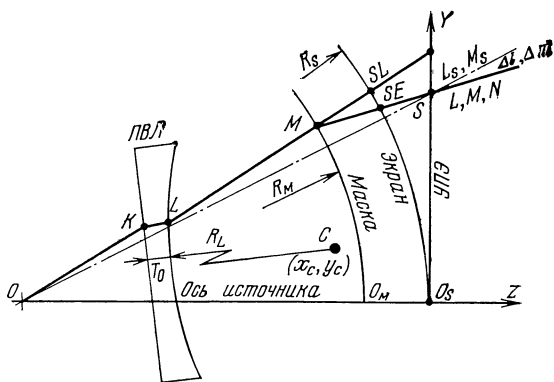
Соответствующие выражения для элементов матрицы  $a_{lh}$ , а также коэффициентов  $c_h$  и  $B_l$  представлены в табл. 4.1.

#### 4.6. ПОРЯДОК РАСЧЕТА АСИММЕТРИЧНОЙ ЛИНЗЫ

Расчет линзы изложенным выше методом проводится в два этапа. Первый этап — подготовительный, сводится к получению данных  $\Delta l$ ,  $\Delta m$  в контрольных точках на условной плоскости экрана УПЭ (рис. 4.17).

На сфере экрана радиуса  $R_s$  заданы точки  $SL$  (следы световых лучей) и точки  $SE$  (следы электронных лучей). Кроме того, известны геометрия системы и параметры плоско-вогнутой линзы ПВЛ, используемой при первом (некорректированном) нанесении элементов экрана. Определим ход светового луча из источника  $O$  через линзу  $ПВЛ$  в точку  $SL$ . Вначале направляем световой луч из точки  $O$  в точку  $SL$ . Но так как луч преломляется в линзе ПВЛ, то он при этом попадет в другую точку экрана. Внося поправку и повторяя итерационный процесс расчета лучей через плоско-вогнутую линзу [8], можно добиться попадания луча в точку  $SL$  с точностью  $\varepsilon$  (обычно около 0,2 мкм). Это позволит определить точку  $M$  пересечения луча со сферой маски радиуса

*ПВЛ* — плоско-вогнутая линза; *УПЭ* — условная плоскость экрана



$R_m$ . Соединяя точку М с точкой SE (следом электронного луча), получаем соответствующую точку S на условной плоскости УПЭ, а также значения направляющих косинусов L, M, N луча MS. Проведя из точки источника O прямую в точку S, получим направляющие косинусы  $L_s M_s$  гомоцентрического луча OS. Отсюда находим требуемые значения  $\Delta l = l - l_s$  и  $\Delta m = m - m_s$  в каждой контрольной точке S на условной плоскости экрана УПЭ. Этот подготовительный этап выполняется на основе простых геометрических соотношений и поэтому не требует пояснений.

Второй этап расчета линзы соответствует алгоритму, показанному на рис. 4.18. На основании первого этапа в каждой из  $M$  контрольных точек экрана известны значения  $u=\Delta m$  и  $v=\Delta l$ , а также координаты этих контрольных точек  $x$  и  $y$ . Эти данные представим в комплексной форме, т. е.  $z=x+iy$  и  $w=u+iv$  — в соответствии с (4.34) и (4.35). Вводятся также геометрические параметры и другие исходные данные (блок № 1).

В блоке № 2 вычисляются коэффициенты интерполяционного полинома (4.44). При этом используется подпрограмма *ANG*, вычисляющая элементы матрицы  $A_{ik}$  согласно (4.45). Эта подпрограмма использует подпрограмму *LG* для вычисления сумм произведений из  $N$  элементов по  $M$  сомножителей.

Зная коэффициенты интерполяционного полинома, можно перейти к вычислению данных в расчетных точках линзы. Число этих точек достаточно велико (порядка нескольких тысяч) и зависит от характеристик станка, управляемого от ЭВМ по нашей программе. Обычно эти точки задают в узлах матрицы  $IK \times JK$  (блок № 3).

В каждой расчетной точке вычисляются значения полиномов вида (4.44) и (4.46), что выполняется в блоке № 4 с помощью подпрограммы WAA, вычисляющей эти полиномы по схеме Горнера. Это позволяет определить значения  $UM=u$ ,  $VL=v$  и  $DMM=\Delta\lambda$  для каждой расчетной точки  $z=x+iy$ .

Теперь можно определить координаты точки  $P$  волновой поверхности в блоке № 5 по формулам (4.42). Затем окончательно

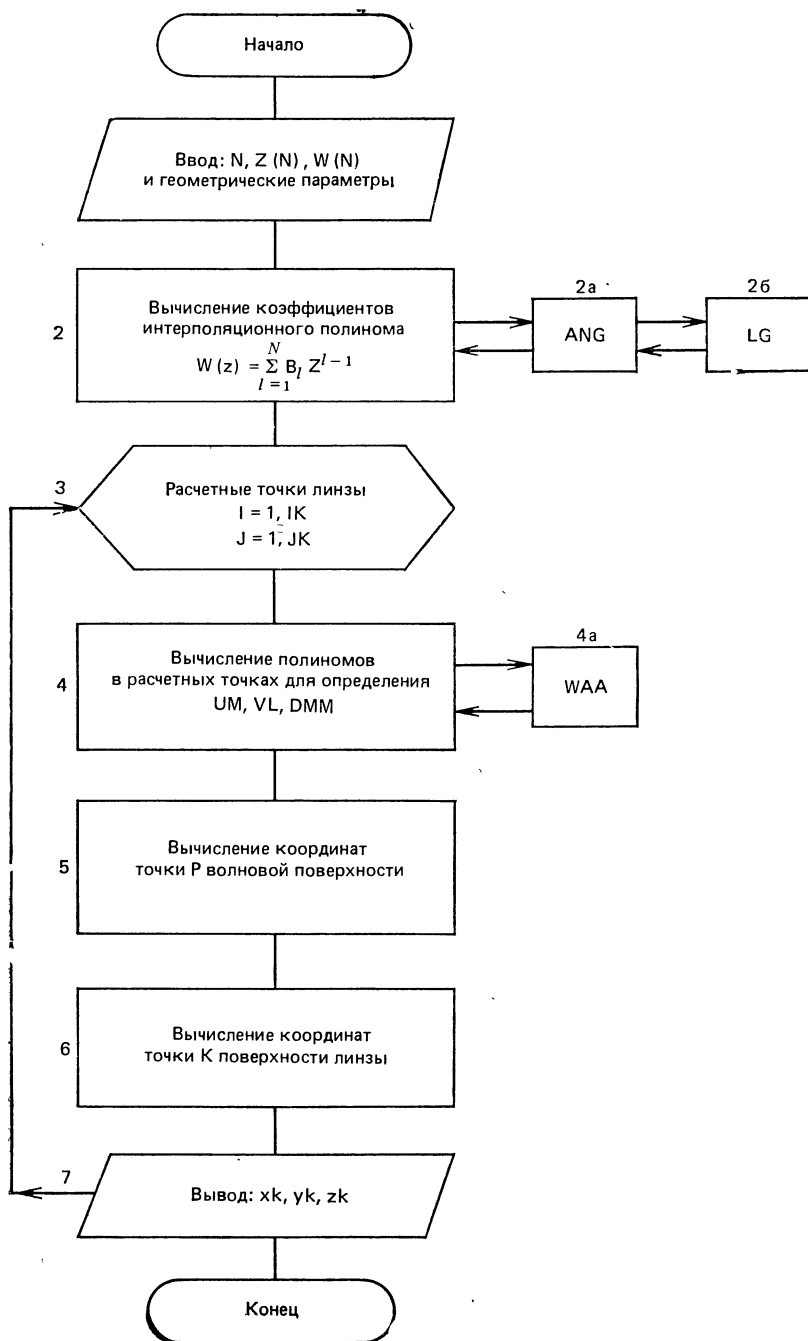


Рис. 4.18. Общий алгоритм расчета асимметричной линзы

определяются искомые координаты точки  $K$  поверхности линзы (блок № 6), используя выражения (4.25 ... 4.28). Соответствующие значения координат поверхности линзы в расчетных точках выводятся и поступают на станок для изготовления линзы, управляемый от ЭВМ по данной программе.

Алгоритму на рис. 4.18 и исходным данным, представленным на рис. 4.16, соответствует программа на языке Фортран-ЕС (Пр. 1).

Первая часть (первые четыре оператора) соответствует блоку № 1 алгоритма и связана с вводом исходных данных. В данном примере исходные данные соответствуют четырем точкам, но нетрудно сделать изменения для ввода данных при любом числе контрольных точек. Далее идет участок (блок № 2 алгоритма), где производится вызов подпрограммы  $ANG$ , в результате вычисляются коэффициенты  $A(4, 4)$ , соответствующие  $A_{lk}$  в выражении (4.45), см. также табл. 4.1.

Подпрограмма  $ANG$  в свою очередь использует подпрограмму  $LG$  для вычисления сумм произведений, число слагаемых в которых  $N1 = C^M_N$ . При этом нумерация сомножителей идет в возрастающем порядке, пока текущий набор сомножителей  $IT$  не станет равным конечному  $IK$ . Значения коэффициентов  $A(L, K)$  зависят только от координат контрольных точек  $z$ . Значения коэффициентов  $B(I)$  интерполяционного полинома зависят также и от заданных значений  $W$  в контрольных точках — в соответствии с выражением (4.45). Вычисления коэффициентов  $B(I)$  в программе заканчиваются оператором с меткой 16.

Далее операторы цикла устанавливают координаты расчетных точек (блок № 3 алгоритма). В соответствии с рис. 4.16 в данном примере всего 25 таких точек (включая 4 контрольные). В каждой точке (кроме центральной точки № 1) вызывается подпрограмма  $WAA$ .

Эта подпрограмма вычисляет по схеме Горнера значения полиномов (4.44) и (4.46) — см. блок № 4 алгоритма на рис. 4.18. Подпрограмма  $WAA$  использует комплексные координаты  $z = x + iy$  контрольных и расчетных точек в условных единицах. Поэтому далее в программе нужно перейти к обычным единицам длины, умножив значения координат  $X$  и  $Y$  на 200 (так как одна условная единица равна 200 мм — см. рис. 4.16).

Первый полином (4.44), обозначаемый  $WR$ , определит значения  $UM$  и  $VL$ , как реальную и мнимую часть соответственно. Этим определяются составляющие векторного поля  $u = \Delta m$  и  $v = \Delta l$  во всех расчетных точках с заданными координатами  $x$  и  $y$  (см. рис. 4.16). Второй полином определит комплексную величину  $DW$ , соответствующую интегралу (4.46). Здесь мнимая часть  $DMM$  соответствует приращению  $\Delta l$  скалярного параметра волновой поверхности согласно (4.41). Для каждой расчетной точки с номером  $k$  и координатами  $x$  и  $y$  полученные значения  $UM$ ,  $VL$ ,  $DMM$  приводятся в табл. 4.2.

# Программа Пр.1

```

COMPLEX Z(4),W(4),A(4,4),ZN(4)
COMPLEX C(3),B(4),ZZ,WR,DW
INTEGER IT(3), IK(3)
READ(5,3)(Z(I),I=1,4),(W(I),I=1,4)
3  FORMAT (8F5.2)
CALL ANG(4,3,Z,C,ZN,IT,IK,A)
K = 0
DO 16 I = 1,4
  B(I) = (0.0,0.0)
  DO 15 J = 1,4
15  B(I) = B(I) + A(I,J)* W(J)
16  B(I) = B(I) * (-1)**I
    DO 20 I = 1,5
      DO 20 J = 1,5
        K = K + 1
        IF(K.EQ.1) GO TO 20
        X = (J-1)*0.25
        Y = (I-1)*0.25
        ZZ = CMPL(X,Y)
        CALL WAA(4,ZZ,A,W,B,WR,DW)
        X = X * 200.0
        Y = Y * 200.0
        UM = REAL(WR)
        VL= AIMAG(WR)
        DMM = AIMAG(DW) * 200.0
        WRITE(6,18) K,X,Y,UM,VL,DMM
18  FORMAT(1X,I4,2F8.2,3E16.7)
20  CONTINUE
END

```

# Подпрограмма Пр.2

```

SUBROUTINE ANG(N,M,Z,C,ZN,IT,IK,A)
COMPLEX Z(N),C(M),ZN(N),A(N,N),S
INTEGER IT(M),IK(M)
DO 40 K = 1,N
  ZN(K) = (1.0,0.0)
  DO 20 I = 1,N
    IF (I.LT.K) C(I) = Z(I)
    IF (I.GT.K) C(I-1) = Z(I)
    IF (I.EQ.K) GO TO 20
    ZN(K) = ZN(K) * (Z(K) - Z(I))
20  CONTINUE
  DO 40 L = 1,N
    IF (L.EQ.N) GO TO 30
    CALL LG(N-1, N-L, C,IT,IK,S,N1)
    A(L,K) = S/ZN(K)
    GO TO 40
30  A (L,K) = 1.0 / ZN(K)
40  CONTINUE
    RETURN
END

```

# Подпрограмма Пр.3

```

SUBROUTINE LG(N,M,C,IT,IK,S,N1)
COMPLEX C(N),P,S
INTEGER IT(M),IK(M)
S = (0.0,0.0)
N1 = 0
DO 10 J = 1,M
  IT(J) = J
10  IK(M+1-J) = N+1-J
15  P = (1.0,0.0)

```

DO 20 J = 1,M	SUBROUTINE WAA(N,Z,A,W,B,WR,DW) ·
L = IT(J)	COMPLEX A(N,N),W(N),WR,DW,Z,B(N)
20 P = P*C(L)	WR = B(N)
S = S + P	DW = B(N) / N*Z
N1 = N1+1	DO 35 I = 2,N
IF (IT(1).EQ.IK(1)) GO TO 40	J = N-I+1
DO 25 K = 2,M	WR = WR*Z+B(J)
IT (K-1) = IT (K-1)+1	DW = (DW + B(J)/J)*Z
DO 24 J = K,M	35 CONTINUE
24 IT(J) = IT(J-1)+1	RETURN
GO TO 15	END
25 CONTINUE	
IT(M) = IT(M)+1	
GO TO 15	
40 RETURN	
BND	

Остальная часть программы расчета линзы, соответствующая блокам № 5 и 6 алгоритма на рис. 4.18, здесь не приводится, так как она реализует вычисления по формулам (4.25 ... 4.28) и не может вызвать затруднений.

В качестве примера была рассчитана линза для коррекции «зеленых» лучей (соответствующих центральному лучу масочного кинескопа с линейным расположением прожекторов). При этом использовались следующие исходные данные (см. рис. 4.15):  $z_L = 120$  мм;  $z_0 = 350$  мм;  $T_L = 21,8$  мм;  $\mu = 1,4586$  (коэффициент преломления материала линзы). Точечный источник света находился в точке  $O$  на оси кинескопа (т. е.  $y_u = 0$ ). Ниже приведены результаты расчета координат  $x_k$ ,  $y_k$ ,  $z_k$  для упомянутых расчетных точек ( $k$  от 2 до 25), определяющих поверхность линзы (табл. 4.3).

В центральной точке ( $K=1$ ) координаты неплоской поверхности линзы заданы и равны соответственно  $x_k = y_k = 0$ ;  $z_k = 98,2$  мм. Наибольший перепад по координате  $z$  составляет около 5 мм, что характерно для всех линз данного типа, где одна поверхность плоская, а другая мало отличается от плоской. Толщина линзы уменьшается от центра к периферии. Это характерно и для линзы, не нарушающей хода лучей гомоцентрического пучка. Можно считать, что рассматриваемая линза состоит как бы из двух частей, одна из которых не нарушает гомоцентричность лучей, а другая — вносит поправки, связанные с отклонением за-

Таблица 4.2

K	X	Y	UM	VL	DM
2	50.0	0.0	-0.1640623E-02	0.8359373E-02	0.2347003E 00
3	100.0	0.0	-0.1062498E-01	0.9374999E-02	0.7135417E 00
4	150.0	0.0	-0.2179686E-01	0.7031271E-03	0.1010741E 01
5	200.0	0.0	-0.2999998E-01	-0.1999994E-01	0.5833335E 00
6	0.0	50.0	-0.5390625E-02	0.5390622E-02	-0.1819661E 00
7	50.0	50.0	-0.3437500E-02	0.5000006E-02	0.8203119E-01
8	100.0	50.0	-0.6484367E-02	0.2421881E-02	0.2815754E 00
9	150.0	50.0	-0.9374991E-02	-0.4687488E-02	0.2486983E 00
10	200.0	50.0	-0.6953109E-02	-0.1867187E-01	-0.3017569E 00
11	0.0	100.0	-0.6250180E-03	0.1062500E-01	-0.3697919E 00
12	50.0	100.0	-0.2343813E-03	0.3828132E-02	-0.2571624E-01
13	100.0	100.0	-0.2499999E-02	0.9313226E-08	0.6249994E-01
14	150.0	100.0	-0.2265621E-02	-0.3203113E-02	-0.1529939E-01
15	200.0	100.0	0.5624972E-02	-0.8125033E-02	-0.2864582E 00
16	0.0	150.0	0.1195310E-01	0.1054687E-01	-0.1142583E 00
17	50.0	150.0	0.5624969E-02	-0.3124764E-03	0.1028642E 00
18	100.0	150.0	-0.1015631E-02	-0.3046864E-02	-0.1009120E-01
19	150.0	150.0	-0.2812500E-02	0.1955777E-07	-0.1054695E 00
20	200.0	150.0	0.5390622E-02	0.6484356E-02	0.4720008E-01
21	0.0	200.0	0.2999993E-01	0.3725290E-08	0.9166650E 00
22	50.0	200.0	0.1179685E-01	-0.1257811E-01	0.5419922E 00
23	100.0	200.0	-0.4375011E-02	-0.1187498E-01	-0.1197906E 00
24	150.0	200.0	-0.1335938E-01	-0.2343766E-03	-0.4632156E 00
25	200.0	200.0	-0.9999994E-02	0.2000003E-01	0.1490116E-05

данных лучей от гомоцентрических. Поэтому для линзы характерна поверхность, где толщина линзы уменьшается от центра к краю.

Описанный выше метод полностью решает задачу расчета асимметричной корректирующей линзы. Но возможны различные варианты корректирующей оптики, а также различные представления исходных данных. Например, вместо линзы, показанной на рис. 4.15, где плоская поверхность обращена к экрану, можно рассчитать линзу, где плоская поверхность обращена к источнику света. Можно также рассчитать линзу типа мениск, где сферическая поверхность концентрична с точечным источником света.

Таблица 4.3

К	УК	УК	ЗК
2	0.1287346E 02	0.4066653E 00	0.9787642E 02
3	0.2735648E 02	0.2716813E 01	0.9739369E 02
4	0.4496454E 02	0.5801603E 01	0.9784163E 02
5	0.6872366E 02	0.8271296E 01	0.1006931E 03
6	-0.1330054E 01	0.1643648E 02	0.9883545E 02
7	0.1378976E 02	0.1589642E 02	0.9836525E 02
8	0.2956062E 02	0.1675436E 02	0.9841254E 02
9	0.4726483E 02	0.1783493E 02	0.9931221E 02
10	0.6890425E 02	0.1785849E 02	0.1017281E 03
11	-0.2691760E 01	0.3055989E 02	0.9970259E 02
12	0.1414126E 02	0.3030489E 02	0.9900121E 02
13	0.3043793E 02	0.3109439E 02	0.9924965E 02
14	0.4704018E 02	0.3139557E 02	0.1000491E 03
15	0.6474686E 02	0.2960577E 02	0.1013723E 03
16	-0.2806553E 01	0.4199612E 02	0.9978987E 02
17	0.1521540E 02	0.4388857E 02	0.9933356E 02
18	0.3154825E 02	0.4635281E 02	0.1000084E 03
19	0.4638080E 02	0.4717593E 02	0.1006977E 03
20	0.5897673E 02	0.4407483E 02	0.1008762E 03
21	-0.1065071E-05	0.4957520E 02	0.9899258E 02
22	0.1865648E 02	0.5701059E 02	0.9941965E 02
23	0.3478882E 02	0.6405782E 02	0.1012149E 03
24	0.4782516E 02	0.6759192E 02	0.1023585E 03
25	0.5518066E 02	0.6453502E 02	0.1019169E 03

При обработке исходных данных для расчета линзы можно попытаться предварительно уменьшить погрешности  $\Delta x$  и  $\Delta y$  (рис. 4.2) изменением положения точечного источника света [109]. Но делать это не обязательно, так как линза скорректирует достаточно большие погрешности (100 ... 200 мкм и более). Поэтому при обработке исходных данных гораздо важнее, чтобы они не имели случайных разбросов и соответствовали физическому смыслу хода лучей кинескопа — условиям симметрии, нулевым погрешностям в центре экрана и т. п., что достигается тщательной юстировкой при измерениях, которые желательно автоматизировать [99].

Хотя за последние 15 лет количество производимых и эксплуатируемых цветных кинескопов значительно возросло, прогресс в области повышения качества кинескопов и оконечных устройств приемников был за это время не очень заметным. Единственным достижением можно считать появление трехлучевых кинескопов со щелевой маской, штриховым экраном и линейным расположением прожекторов, допускающих применение отклоняющих систем «самосводящего» типа. Но и здесь имеются свои трудности: меньшая прочность маски (по сравнению с маской, использующей круглые отверстия), высокие требования к блоку электронных прожекторов, остаточное несведение лучей в углах раstra и т. п. Поэтому освоение и массовый выпуск этих кинескопов затягиваются, для стационарных приемников продолжают применяться кинескопы типа 61ЛК3Ц.

Столь скромные достижения в области цветных кинескопов, где пока не видно принципиально новых решений, объясняется разными причинами. Не последнюю роль играет коммерческая политика ведущих капиталистических фирм, вложивших большие капиталы в производство масочных кинескопов и неохотно идущих на переоборудование налаженного производства.

Но одной из основных причин является то, что при разработке цветных кинескопов основное внимание уделяется организационно-технологическим вопросам, связанным с освоением ограниченного числа известных прототипов кинескопов, а обеспеченность разработок прочным научным фундаментом еще далека от идеала. Количество и качество научных публикаций в области цветных кинескопов все еще недостаточно высоки. Попытки обойти научные исследования путем эмпирических решений приводят нередко к затягиванию сроков разработок и снижению качества изделий.

В то же время круг научных задач, связанных с цветными кинескопами, весьма обширен, разнообразен и интересен. В первую очередь следует выделить проблемы оптического характера, затрагивающие вопросы электронной и геометрической оптики, а также оптики дискретных систем и физиологической оптики цветного зрения.

Представляется, что удалось улучшить корректирующую линзу для нанесения экранов цветных кинескопов. Основные принципы и методы расчета таких линз можно считать разрешенными, но остаются вопросы, связанные с получением достаточно точных и надежных исходных данных. Существующая практика экспериментальных замеров вручную на малых пробных партиях кинескопов приводит к заметному разбросу этих данных даже в пределах одной партии. Поэтому следует не только автоматизировать процесс получения данных [99], но и искать более обоснованные методы, основанные на расчетах электронных траекторий.

Здесь основные трудности связаны с расчетом магнитных полей реальных отклоняющих систем с высокой точностью. Публикации по этому вопросу пока единичны [97]. Основным путем представляется здесь типизация отклоняющих полей, обладающих нужными свойствами (например, самосведения лучей) путем достаточно простого и точного моделирования. При разработке кинескопов и отклоняющих систем необходимо иметь надежный фундамент для внедрения систем автоматизированного проектирования (САПР).

Немало вопросов предстоит решить при определении качества воспроизводимого цветного изображения — в связи с дискретной структурой экранов кинескопов, а также высокими требованиями к электронно-оптическим системам фокусировки электронных лучей. При разработке электронных прожекторов пока преобладают эмпирические методы, теория таких систем развита мало [27, 30].

Вопросы теоретической и практической метрики цветных кинескопов также заслуживают большего внимания. В частности, представляют интерес автоматизированные системы контроля основных параметров качества цветных кинескопов [110, 111]. В этой связи нужно также указать на вопросы, которые возникают при разработке цветных кинескопов для систем отображения цветной информации и для систем телевидения с повышенным стандартом качества [40, 41]. Важно иметь в виду, что именно кинескоп является оконечным звеном системы отображения информации или телевизионной системы, поэтому параметры качества кинескопа определяют параметры качества всей системы.

Снижение внимания к однолучевым кинескопам (индексным и хроматронам) автор считает неоправданным. Индексные кинескопы могут быть незаменимыми как в специальной аппаратуре (из-за невосприимчивости этих кинескопов к магнитным полям), так и в системах отображения информации (где основное значение имеет высокая разрешающая способность индексных кинескопов, а некоторое снижение насыщенности основных цветов не играет роли). Однолучевые хроматроны могут быть незаменимы для устройств с малыми размерами изображения, где экономичность питания, простота эксплуатации и низкая стоимость имеют решающее значение (видеотелефоны, прикладное телевидение и др.).

Наконец, представляются необходимыми разработки как принципиально новых типов цветных кинескопов, так и воспроизводящих устройств (электролюминесцентных, лазерных и др.), которые могли бы конкурировать с существующими кинескопами.

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ НОВЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЦВЕТНЫХ КИНЕСКОПОВ

[9, 31]

25ЛК2Ц

Трехлучевой кинескоп со щелевой маской, штриховым экраном и линейным расположением электронных прожекторов.

Общие данные

Максимальный угол отклонения лучей — 90°.

Размер изображения на экране — 138×185 мм.

Основные размеры — см. рис. 1.27,б.

Разрешающая способность в белом и основных цветах — не менее 300 линий.

Оформление — стеклянное, взрывобезопасное, бесцокольное.

Вывод модулятора — общий для всех трех прожекторов.

Масса — 2,5 кг.

Основные параметры

при  $U_H = 12,6$  В;  $U_a = 16$  кВ;  $U_{\text{уск.эл.}} = 400$  В;  $U_{\text{фок.эл.}}$  — соответствующем наилучшей фокусировке 1,8 ... 2,8 кВ

	Не менее	Номинальное значение	Не более
Ток накала, А . . . . .	0,17	0,2	0,22
Напряжение записания (для каждого прожектора), В . . . . .	35	—	70
Разброс напряжений записания для трех прожекторов ЭОС, В . . . . .	—	—	15
Ток утечки между катодом и подогревателем (при напряжении подогревателя — 150 В относительно катода), мкА . . . . .	—	—	50
Ток утечки между катодом и модулятором (при напряжении катода 100 В относительно модулятора), мкА . . . . .	—	—	5
Яркость экрана в белом, кд/м <sup>2</sup> . . . . .	—	200	—
Неравномерность яркости в белом, % . . . . .	—	—	50
Координаты цветности основных цветов в системе МКО:			
красный цвет $x$ . . . . .	0,61	0,64	—
красный цвет $y$ . . . . .	—	0,33	0,35
зеленый цвет $x$ . . . . .	0,27	0,29	0,31
зеленый цвет $y$ . . . . .	0,57	0,60	—
синий цвет $x$ . . . . .	—	0,15	0,17
синий цвет $y$ . . . . .	—	0,06	0,08
Величина $\gamma$ (катодная модуляция) . . . . .	2,6	2,8	3,3
Напряжение модуляции, В . . . . .	—	—	40
Емкость между наружным покрытием и вторым анодом, пФ . . . . .	200	—	—
Отношение тока красного прожектора к току зеленого прожектора . . . . .	0,8	—	2,1
Отношение тока красного прожектора к току синего прожектора . . . . .	1,0	—	2,5
Контраст в крупных деталях на белом поле . . . . .	60	—	—
Время готовности, мин . . . . .	—	—	1
Долговечность, ч . . . . .	3000	—	—
Критерии долговечности:			
яркость экрана в белом, кд/м <sup>2</sup> . . . . .	165	—	—
напряжение модуляции, В . . . . .	—	—	45
разрешающая способность в белом и в основных цветах . . . . .	250	—	—

Примечание. Напряжения на электродах указаны по отношению к модулятору.

## Предельные эксплуатационные данные

	Не менее	Не более
Напряжение накала, В . . . . .	11,34	13,86
Напряжение анода (постоянное), В . . . . .	14 400	17 600
Напряжение фокусирующего электрода (постоянное), В . . . . .	1500	3000
Напряжение ускоряющих электродов (постоянное), В . . . . .	200	550
Напряжение катода по отношению к модулятору, В . . . . .	0	100
Среднее значение тока анода (катода), мкА . . . . .	—	500

### 32ЛК1Ц-1

Трехлучевой кинескоп со целевой маской, штриховым экраном и линейным расположением электронных прожекторов.

#### Общие данные

Максимальный угол отклонения лучей — 90°.

Размер изображения на экране — 182×244 мм.

Основные размеры — см. рис. 1.27, а.

Разрешающая способность в линиях:

в центре в белом по вертикальному клину — не менее 300;

в центре в белом по горизонтальному клину — не менее 350;

по углам в основных цветах — не менее 300.

Оформление — стеклянное, взрывобезопасное, бесцокольное.

Выводы модуляторов — отдельные для каждого прожектора.

Масса — 6 кг.

#### Основные параметры

при  $U_n=6,3$  В;  $U_a=18$  кВ;  $U_{\text{ук.эл.}}=400$  В;  $U_{\text{фок.эл.}}$  — соответствующем наилучшей фокусировке 3,2 ... 4 кВ.

	Не менее	Номинальное значение	Не более
Ток накала, А . . . . .	0,28	0,31	0,34
Напряжение запираия (для каждого прожектора), В . . . . .	—100	—	—50
Ток утечки между катодом и подогревателем (при напряжении подогревателя — 200 В относительно катода), мкА . . . . .	—	—	50
Ток утечки между катодом и модулятором (при напряжении модулятора — 120 В относительно катода), мкА . . . . .	—	—	5
Яркость экрана в белом, кд/м <sup>2</sup> . . . . .	150	—	—
Неравномерность яркости в белом, % . . . . .	—	—	40
Координаты цветности основных цветов в системе МКО:			
красный цвет $x$ . . . . .	0,61	0,64	—
красный цвет $y$ . . . . .	—	0,33	0,35
зеленый цвет $x$ . . . . .	0,27	0,29	0,31
зеленый цвет $y$ . . . . .	0,57	0,60	—
синий цвет $x$ . . . . .	—	0,15	0,17
синий цвет $y$ . . . . .	—	0,06	0,08
Величина $\gamma$ (сеточная модуляция) . . . . .	2,6	2,8	3,3
Емкость между наружным покрытием и вторым анодом, пФ . . . . .	400	—	800
Отношение тока красного прожектора к току зеленого прожектора . . . . .	0,95	—	1,8
Отношение тока красного прожектора к току синего прожектора . . . . .	1,2	—	2,5
Напряжение модуляции:			
сеточная модуляция, В . . . . .	—	—	50
катодная модуляция, В . . . . .	—	—	45

Время готовности, с . . . . .	—	—	20
Долговечность, ч . . . . .	3500	—	—
Критерий долговечности: яркость экрана в белом, кд/м <sup>2</sup> . . . . .	84	—	—
Напряжение модуляции:			
сеточная модуляция, В . . . . .	—	—	50
катодная модуляция, В . . . . .	—	—	45

#### Предельные эксплуатационные данные

	Не менее	Не более
Напряжение накала, В . . . . .	5,7	6,9
Напряжение анода (постоянное), В . . . . .	15 000	20 000
Напряжение фокусирующих электродов (постоянное), В . . . . .	2500	5500
Напряжение ускоряющих электродов (постоянное), В . . . . .	200	650
Напряжение модулятора по отношению к катоду, В . . . . .	—400	—5
Пиковое напряжение между катодом и подогревателем:		
а) при подогревателе, отрицательное по отношению к катоду:		
в течение первых 15 с после включения напряжения накала, В . . . . .	—	400
в течение всего последующего времени для постоянной составляющей, В . . . . .	—	200
для постоянной и переменной составляющих совместно, В . . . . .	—	200
б) при подогревателе, положительное по отношению к катоду:		
для переменной составляющей, В . . . . .	—	200
для постоянной составляющей, В . . . . .	—	0
Сопротивление в цепи фокусирующих электродов, МОм . . . . .	—	7,5
Полное сопротивление в цепи модулятора каждого прожектора, МОм . . . . .	—	0,75
Максимальное значение среднего тока анода, мкА . . . . .	—	650

#### 51ЛК1Ц

Трехлучевой кинескоп со щелевой маской, штриховым экраном и линейным расположением электронных прожекторов.

#### Общие данные

Максимальный угол отклонения лучей — 90°.

Размер изображения на экране — 303×404 мм.

Основные размеры:

общая длина — 423 мм; длина конусной части — 289 мм; радиус кривизны переднего стекла — 803 мм; диаметр горловины — 29,1 мм; расстояние между отверстиями рамы — 337×434 мм.

Разрешающая способность в линиях:

в центре в белом по вертикальному клину — не менее 400;  
в центре в белом по горизонтальному клину — не менее 450;  
по углам в основных цветах — не менее 300.

Оформление — стеклянное, взрывобезопасное, бесцокольное.

Выводы модуляторов — отдельные для каждого прожектора.

Масса — 13 кг.

#### Основные параметры

Номинальный электрический режим:  $U_a = 25$  кВ;  $U_{\text{фок.эл}} = 4,2 \dots 5,1$  кВ;  $U_{\text{уск.эл}} = 200 \dots 500$  В.

Ток анода — не более 700 мкА.

Яркость экрана в белом — не менее 110 кд/м<sup>2</sup>

Координаты цветности основных цветов в системе МКО — см. данные для кинескопов 25ЛК2Ц и 32ЛК1Ц-1.

Остаточное несведение лучей:

внутри круга 0,75 Н — не более 1 мм;

между кругами 0,75Н и 1,1Н — не более 2 мм;

за пределами круга 1,1 Н — не более 2,5 мм.

Отношение токов прожекторов для получения белого цвета 6550° К ( $x=0,313$ ;  $y=0,329$ );

$I_R/I_G$  — не более 1,3;  $I_R/I_B$  — не более 1,2;

Число градаций яркости — не менее 8.

Контраст в крупных деталях на белом поле — не менее 100.

Долговечность — не менее 3000 ч.

Критерии долговечности:

яркость экрана в белом — не менее 80 кд/м<sup>2</sup>;

разрешающая способность в центре в белом по вертикальному и горизонтальному клину — не менее 400 линий

## 61ЛК4Ц

Трехлучевой масочный кинескоп с точечным экраном и треугольным расположением электронных прожекторов (улучшенный вариант кинескопа 61ЛК3Ц)

### Общие данные

Максимальный угол отклонения лучей — 90°.

Размер изображения на экране — 362×482 мм.

Основные размеры:

общая длина — 519 мм; длина конусной части — 333 мм; радиус кривизны

переднего стекла — 967,5 мм; диаметр горловины — 36,5 мм;

расстояние между отверстиями рамы — 395×552 мм.

Разрешающая способность в линиях:

в центре в белом по вертикальному клину — не менее 600;

в центре в белом по горизонтальному клину — не менее 550;

по углам в основных цветах — не менее 500.

Масса — 20 кг. Оформление — стеклянное, взрывобезопасное, бесцокольное.

### Основные параметры

Номинальный электрический режим:  $U_a=25$  кВ;  $U_{\text{фок эл}}=4,7 \dots 5,5$  кВ;  $U_{\text{уск.эл}}=400$  В

Напряжение запирания — от —190 до —100 В.

Яркость экрана в белом — не менее 160 кд/м<sup>2</sup>.

Неравномерность яркости экрана в белом — не более 65 кд/м<sup>2</sup>.

Координаты цветности в системе МКО:

зеленый цвет  $x=0,32 \dots 0,36$ ;  $y=0,55 \dots 0,57$  (для красного и синего цвета — см. данные кинескопа 25ЛК2Ц)

Неравномерность цветности на белом и основных цветах:

$\Delta x \leq 0,02$ ;  $\Delta y \leq 0,02$ .

Значение «гамма» (сеточная модуляция)  $\gamma=2,8 \begin{smallmatrix} +0,5 \\ -0,2 \end{smallmatrix}$

Отношение токов прожекторов для получения белого цвета

$I_R/I_G$  и  $I_R/I_B$  — не более 1,3

Контраст в крупных деталях на белом поле — не менее 120.

Долговечность — не менее 5000 ч.

Критерии долговечности:

яркость экрана в белом — не менее 84 кд/м<sup>2</sup>;

разрешающая способность в центре в белом по вертикальному клину — не менее 500 линий, по горизонтальному клину — не менее 400 линий.

### Предельные эксплуатационные данные 51ЛК1Ц/61ЛК4Ц

	Не менее	Не более
Напряжение накала, В . . . . .	5,7	6,9
Напряжение анода (постоянное), В . . . . .	20 000	27 000/27 500
Напряжение фокусирующих электродов, В . . . . .	3500/3000	6000
Напряжение ускоряющих электродов, В . . . . .	100/200	600/1000
Напряжение модулятора по отношению к катоду, В . . . . .	—400	0

1. Ангафоров А. П. Оконечные устройства приемников цветного телевидения. — М.: Связь, 1971. — 238 с.
2. Производство цветных кинескопов/В. И. Барановский, Б. Н. Гусев, В. Н. Иванов и др.; Под ред. В. И. Барановского. — М.: Энергия, 1978. — 368 с.
3. Малкиель Б. С., Марченко И. С., Мизюк М. Г. Кинескопы для цветного телевидения. — Киев: Техника, 1979. — 144 с.
4. Morrel A. M. Color television picture tubes. — N.-Y.: Academic Press, 1974. — 225 p.
5. Kania J. Kineskopy kolorowe i ich zespolu. — Warszawa: WKŁ, 1978. — 180 p.
6. Кэй М. Прогресс в области люминесцентных дисплеев. — Тэрэбидзен, 1982, т. 36, № 11, с. 970—976.
7. Турыгин И. А. Прикладная оптика. Ч. 2. — М.: Машиностроение, 1966. — 432 с.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970. — 856 с.
9. Пароль Н. В. Кинескопы: Справочное пособие. — М.: Радио и связь, 1984. — 65 с.
10. Пономаренко И. Е., Филимонов Н. И. Яркость и контраст экранов цветных кинескопов. — Электронная техника. Сер. 4, 1981, вып. 4, с. 23—30.
11. Техника цветного телевидения/С. В. Новаковский, Е. З. Сорока, Б. Н. Хохлов и др.; Под ред. С. В. Новаковского. — М.: Связь, 1976. — 496 с.
12. Новаковский С. В. Цветное телевидение: Основы теории цветовоспроизведения. — М.: Связь, 1975. — 378 с.
13. Нисимура Т., Такахара Т. Тенденция развития люминофоров для ЭЛТ. — Эрекуторнику сэрамикусу, 1981, т. 12, № 64, с. 51—56.
14. Матсухара С. Новый люминофор зеленого свечения. — Тосиба рэбю, 1978, т. 33, № 6, с. 515—518.
15. Ильшеницкий В. В., Малкиель Б. С., Мизюк М. Г. Пигментированные экраны цветных электронно-лучевых трубок. — Техника кино и телевидения, 1981, № 6, с. 48—49.
16. Кавамура Т. 110° — кинескоп ЦТ. — Хитати херон, 1971, т. 53, № 8.
17. Ямауши М. Разработка 10" кинескопа с малой мощностью отклонения. — Хитати херон, 1973, т. 55, № 5, с. 43—48.
18. Naanties J., Lubben G. Errors in magnetic deflection. — Pt. 1, 2. — Philips Res. Rep., 1957, v. 12, N 1, p. 46—68, 1959, v. 14, N 1, p. 65—97.
19. Оиси И. Характеристики кинескопов. — Тэрэбидзен, 1973, т. 27, № 5.
20. Naguse Y. An improved shadow-mask design for in-line three-beam color picture tubes. — IEEE Trans. 1971, v. ED-18, № 9, p. 697—702.
21. Адрианова Л. Н. Кинескопы для цветного телевидения. — Итоги науки и техники. Сер. Электроника и ее применения. — М.: 1978, т. 10, с. 10—20.
22. Сугихара Х., Симомо Т. Система самосведения для приемников ЦТ. — Тэрэбидзен, 1979, т. 33, № 2, с. 88—93.
23. Barbin R., Hughes R. New color picture tube system for portable TV receivers. — IEEE Trans. on Broadcast. and Telev. Receivers, 1972, BTR-18, Aug, N 3, p. 193—200.
24. Morrel A. M. Design principles of the RCA large screen 110° precision in-line color picture tube. — IEEE Trans., 1976, CE-22, N 1, p. 1—7.
25. Ямадзакэ Е., Кавашима М. Современные цветные кинескопы. — Тэрэбидзен, 1979, т. 33, № 5, с. 373—379.
26. Polac K. A new approach to shadow mask color picture tube construction. — IEEE Trans., 1976, CE-22, p. 289—292.
27. Mac Gregor D. M. Computer-aided design of color picture tubes with a three-dimensional model — IEEE Trans., 1983, CE-29, p. 318—321.
28. Вейль И. Р., Овчинников А. В., Тренева С. Н. Определение траекторий параксиальных электронов в ЦЭЛТ. — Электронная техника, сер. 4, 1982, вып. 3, с. 19—21.
29. Румянцев Н. Г., Тумаркин Ю. Б. Статическое сведение пучков на экране цветного кинескопа. — Электронная техника, ср. 4, 1981, вып. 1, с. 10—14.
30. Wilson I. M. Theoretical and practical aspects of electron gun design color picture tubes. — IEEE Trans. Consum. Electron., 1975, CE-21, N 2, p. 32—38.

31. Котовщиков Г. С. Новые электронно-лучевые приборы. — Электронная промышленность, 1984, № 1, с. 29—32.
32. Пономаренко И. Е. Цветовые воспроизводящие устройства ТВ приемников. — Техника кино и телевидения, 1979, № 3, с. 41—45.
33. Barten R. G. The 20AX system and picture tube. — IEEE Trans. on Broadcast and Telev. Receivers, 1974, BTR-20, N 4, p. 286—292.
34. Ота Я. 26"-кинескоп ЦТ с большим углом отклонения. — Тосиба рэбю, 1975, т. 30, № 11, с. 950—955.
35. Ота Я. 26" цветной кинескоп планарного типа с самосведением и углом отклонения 110°. — Тосиба рэбю, 1977, т. 32, № 9, с. 777—780.
36. Симома Т. Цветной кинескоп без дисторсии раstra. — Тосиба рэбю, 1979, т. 34, № 4, с. 348—351.
37. Фикида К. Цветной 110"-кинескоп с диагональю экрана 66 см и горловиной диаметром 22,5 мм. — Тосиба рэбю, 1983, т. 38, с. 445—448.
38. Симома Т. Цветной кинескоп с диагональю экрана 10 см. — Тосиба рэбю, 1982, т. 37, № 9, с. 741—744.
39. Вейль И. Р., Новик М. А., Рысаков О. М. Цветные электронно-лучевые трубки или дисплеев. — Электронная промышленность, 1984, № 3, с. 16—18.
40. Сорока Е. З. Многострочное телевидение. — Техника кино и телевидения, 1983, № 5, с. 42—51.
41. Новаковский С. В. Некоторые проблемы создания системы телевидения с повышенной четкостью изображения. — Техника кино и телевидения, 1983, № 6, с. 53—55.
42. Говоров В. С. Отображение машинных решений на экранах ЭЛТ. — М.: Советское радио, 1975. — 192 с.
43. Носака Е. Кинескоп с ультра-высокой разрешающей способностью для отображения цветной символической информации. — Мицубиси дэнки гихо, 1975, т. 49, № 2, с. 178—181.
44. 12" (30 см) 90° цветной кинескоп для дисплеев. — NEC гихо, 1982, т. 35, № 8, с. 189.
45. Кеньти Д. Цветные кинескопы для устройств отображения знаковой и графической информации. — Дэнси гидзюцу, 1982, т. 24, № 10, с. 22—25.
46. Кеньти Д. Развитие кинескопов для цветных дисплеев. — ОНМ, 1983, т. 70, № 1, с. 25—26.
47. Накамото М., Хиробаяши К. Цветной кинескоп с высокой разрешающей способностью. — Тэрэбидзен, 1976, т. 30, № 5, с. 369—376.
48. Минору Т. Воспроизводящие устройства для систем ТВ с высоким разрешением. — Тэрэбидзен, 1982, т. 36, № 10, с. 926—935.
49. Ямадзаки Е. Современные тенденции развития проекционных телевизионных приемников. — Тэрэбидзен, 1983, т. 37, № 2, с. 82—89.
50. Фуджисава С. Проекционные системы с ЭЛТ для большого экрана. — Тэрэбидзен, 1984, т. 38, № 1, с. 11—16.
51. Тагуши С. Проекционные устройства для ТВ с высокой разрешающей способностью. — Тосиба рэбю, 1983, т. 38, № 7, с. 611—614.
52. Ютака Т. Анализ явления локального вспучивания маски. — Тэрэбидзен, 1977, т. 31, № 6, с. 484—490.
53. Рыхлинская С. И. Влияние теневой маски на стабильность чистоты цвета кинескопа. — Электронная промышленность, 1981, № 7—8, с. 76—78.
54. Готра З. Ю., Рыхлинская С. И. Расчет допусков на геометрические размеры экранно-масочного узла цветного кинескопа. — Электронная техника, с. 4, 1981, вып. 1, с. 21—23.
55. Готра З. Ю., Рыхлинская С. И. Прозрачность маски и однородность цветности экрана масочного кинескопа. — Техника кино и телевидения, 1981, № 3, с. 51—52.
56. Готра З. Ю., Рыхлинская С. И. Влияние маски экрана кинескопа на качество цветного изображения. — Техника кино и телевидения, 1983, № 3.
57. Козлов В. П., Родин А. Н. Прозрачность маски и ее влияние на светотехнические параметры кинескопа. — Электронная техника, сер. 4, 1983, вып. 2, с. 33—35.
58. Ишин Т., Уэба И. Влияние структуры люминофорного покрытия на чистоту цветов в цветном кинескопе. — Мицубиси дэнки гихо, 1983, т. 57, № 6.

59. **Hiromi K.** A new high-performance color picture tube: the mask-focusing color tube. — IEEE Trans. on Electron Dev., 1976, ED-23, N 1, p. 45—49.
60. **Каору Т.** Однолучевой индексный кинескоп. — Тэрэбидзен, 1981, т. 35, № 5, с. 418—424.
61. **Бриллиантов Д. П., Водычко В. Р., Борноволоков Э. П.** Однолучевой хроматрон — хромоскоп 25ЛК1Ц. — Техника кино и телевидения, 1976, № 12, с. 59—61.
62. **Ангафоров А. П., Смирнов А. В.** Качество изображений цветного телевидения при поэлементной системе воспроизведения. — Труды РПТИ (Рязань), 1976, вып. 71, с. 50—55.
63. **Телевидение.** Общий курс/П. В. Шамаков, В. В. Однолько, В. Е. Джакобия и др.; Под ред. П. В. Шамакова. — М.: Связь, 1970. — 540 с.
64. **Bedford A. V.** Mixed highs in color television. — Proc. IRE, 1950, v. 38, N 9, p. 1003—1009.
65. **Певзнер Б. М.** Качество цветных телевизионных изображений. — М.: Связь, 1980. — 136 с.
66. **Ramberg E. G.** Elimination of moire effects in tri-color kinescopes — Proc. IRE, 1952, v. 40, N 8, p. 916—923.
67. **Гофайзен О. В., Серебрин В. Л.** О воспроизведении изображений масочными кинескопами. — Вопросы радиоэлектроники, 1970, сер. ТТ, вып. 4.
68. **Пономаренко И. Е.** Образование муара при наложении дискретных структур. — Электронная техника, 1981, сер. 4, вып. 4 (87), с. 17—22.
69. **Баран М. А., Готра З. Ю., Рыхлинская С. И.** Исследование факторов, влияющих на разрешающую способность масочных кинескопов. — Техника кино и телевидения, 1981, № 7, с. 49—50.
70. **Стейн С., Джонс Дж.** Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. — М.: Связь, 1971. — 308 с.
71. **Латхи Б. П.** Система передачи информации. — М.: Связь, 1971. — 320 с.
72. **Теоретические основы электрической передачи изображений (том 1)/Е. Л. Орловский, Г. Д. Заварин, Б. В. Круссер и др.; Под ред. А. В. Таранцова.** — М.: Советское радио, 1962. — 727 с.
73. **Основы электронного телевидения/Под ред. Ф. Шретера.** — М. — Л.: Энергия, 1965. — 536 с.
74. **Рыфтин Я. А.** Телевизионная система. — М.: Сов. радио, 1967. — 272 с.
75. **Mashida H., Fuse Y.** The gain in the definition of color CRT image display by aperture-grille — IEEE Conf. Rec. Display Dev., N.-Y., 1972, p. 101—108.
76. **Антипин М. В.** О частном спектре видеосигналов вертикального и горизонтального клиньев испытательной таблицы. — Электросвязь, 1958, № 9, с. 7—17.
77. **Ангафоров А. П., Смирнов А. В.** Анализ искажений, обусловленных принципом последовательного смещения цветов в однолучевых кинескопах ЦТ. — Тр. ЛИАП, 1973, вып. 79, с. 66—71.
78. **Антипин М. В.** Интегральная оценка качества телевизионного изображения. — Л.: Наука, 1970. — 155 с.
79. **Игнатьев Н. К.** Спектральное исследование биений между двумерными растровыми системами. — Кристаллография, 1960, т. 5, вып. 3, с. 383—389.
80. **Криксунов Л. З., Усольцев И. Ф.** Инфракрасные системы обнаружения, пеленгации и автоматического сопровождения движущихся объектов — М.: Советское радио, 1968. — 280 с.
81. **Ангафоров А. П., Смирнов А. В.** Исследование разрешающей способности кинескопов ЦТ со штриховым экраном. — Тр. ЛИАП, 1971, вып. 69.
82. **Цуккерман И. И.** Преобразование электронных изображений. — Л.: Энергия, 1972. — 184 с.
83. **Кибардин Н. П.** К вопросу о положении точки сведения пучков в масочном цветном кинескопе. — Электронная техника, сер. 4, 1971, вып. 1, с. 80—88.
84. **Родин А. И., Травин А. А.** Совмещение изображений в цветных трехлучевых кинескопах. — М.: Связь, 1978. — 97 с.
85. **Ангафоров А. П.** О сведении электронных пучков в масочных кинескопах. — Электронная техника, сер. 4, 1973, вып. 6, с. 116—118.

86. Бонштедт Б. Э., Маркович М. Г. Фокусировка и отклонение пучков в электронно-лучевых приборах. — М.: Советское радио, 1967. — 272 с.
87. Ангафоров А. П., Горчакова М. А., Романов Г. Е. К определению электронных траекторий и магнитных полей в широкоугольных отклоняющих системах. — Тр. ЛИАП, 1976, вып. 98, с. 105—109.
88. Смирнов В. И. Курс высшей математики (том II). — М.: Наука, 1974. — 656 с.
89. Kaashoek J. A study of magnetic deflection errors. — Philips Res. Rep. (Suppl.), 1968, N 11, p. 1—114.
90. Kaashoek J. Deflection system design for 110° shadowmask tubes. — Mullard Techn. Communic., 1974, v. 13, N 121, p. 15—30.
91. Цуккерман И. И. Электронная оптика в телевидении. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1958. — 248 с.
92. Hutter R. Deflection defocusing effects in cathode-ray tubes at large deflection angles. — IEEE Trans. Electron Dev., 1970, v. ED-17, N 12, p. 1022—1034.
93. Бриллиантов Д. П. Проектирование эффективных систем магнитного отклонения. — М.: Связь, 1975. — 248 с.
94. Hawkes P. W. Quadrupole Optics. — Berlin, N.-Y.: Heidenberg Verlag, 1966. — 408 p.
95. Садайочи С. Современное состояние отклоняющих систем для цветных кинескопов. — Тэрэбидзен, 1975, т. 29, № 6, с. 466—472.
96. Цырлин Л. Э. Избранные задачи расчета электрических и магнитных полей. — М.: Советское радио, 1977. — 320 с.
97. Фрейнкман Б. Г. Расчет на ЭВМ отклоняющей системы ЦЭЛТ. — Электронная техника, сер. 4, с. 1980, вып. 1 (78), с. 31—42.
98. Bloomsburgh R. A computer program for color tube screen design. — IEEE Trans. on Broadcast and Telev. Receivers, 1965, BTR-11, N 2, p. 50—61.
99. Kautz A. D. Automatic misregistration testing apparatus for line screen color CRT's. — IEEE Trans. Consum. Electron, 1983, v. CE-29, p. 326—333.
100. Оиси И. Анализ чистоты цвета в масочном кинескопе. — Тэрэбидзен, 1960, № 12, с. 537—546.
101. Кузьмина Т. А. Расчет корректирующей линзы для изготовления экранов цветных кинескопов. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 1, с. 25—28.
102. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1969. — 670 с.
103. Русинов М. М. Техническая оптика. — Л.: Машиностроение, 1969. — 488 с.
104. Ангафоров А. П. О расчете корректирующих линз для нанесения экранов цветных кинескопов. — Математические методы исследования приборов и систем управления (Межвузовский сборник), 1982, вып. 159, ЛИАП, с. 115—118.
105. Фиников С. П. Теория конгруэнций. — М.—Л.: Гостехиздат, 1950. — 550 с.
106. Герцбергер М. Современная геометрическая оптика. — М.: Иностранная литература, 1962. — 488 с.
107. Смирнов В. И. Курс высшей математики (т. III, ч. 2). — М.: Наука, 1974. — 672 с.
108. Курош А. Г. Курс высшей алгебры. — М.: Наука, 1971. — 432 с.
109. Гурский Н. М. Использование моделирования хода световых лучей для определения оптимальных координат источника света в установке фотоэкспонирования цветных кинескопов. — Электронная техника, сер. 4, 1984, вып. 2, с. 11—15.
110. Ивamoto А. Аппаратура для контроля характеристик масочных цветных кинескопов. — Тосиба рэбю, 1983, т. 38, № 12, с. 1079—1082.
111. Уно С., Доджи Р., Иноуэ М. Автоматическая система контроля параметров качества изображений цветных кинескопов. — Тосиба рэбю, 1983, т. 38, № 12, с. 1083—1086.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
ГЛАВА 1	
<b>СОВРЕМЕННЫЕ ЦВЕТНЫЕ КИнесКОПЫ</b> . . . . .	6
1.1. Основные требования к цветным кинескопам . . . . .	6
1.2. Масочные кинескопы с треугольным расположением прожекторов . . . . .	14
1.3. Масочные кинескопы с линейным расположением прожекторов . . . . .	19
1.4. Кинескопы с повышенной разрешающей способностью . . . . .	33
1.5. Другие типы кинескопов . . . . .	38
ГЛАВА 2	
<b>ВОПРОСЫ КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ</b> . . . . .	39
2.1. Воспроизведение мелких деталей цветных изображений (состояние вопроса) . . . . .	39
2.2. Влияние структуры вертикального штрихового экрана на качество воспроизведения изображений . . . . .	41
2.3. Сравнительный анализ кинескопов с вертикальным штриховым экраном . . . . .	46
2.4. Особенности двумерной дискретизации цветных изображений . . . . .	51
2.5. Особенности синтеза трехцветных изображений при пространственном смещении цветов . . . . .	58
ГЛАВА 3	
<b>ВОПРОСЫ ОТКЛОНЕНИЯ И СВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛУЧЕЙ В ТРЕХЛУЧЕВЫХ КИнесКОПАХ</b> . . . . .	64
3.1. Основные особенности систем отклонения и сведения . . . . .	64
3.2. Аберрации при отклонении электронных лучей в магнитном поле . . . . .	68
3.3. Исследование модели магнитного поля отклоняющей системы . . . . .	72
3.4. Коррекция сведения лучей многополюсными системами . . . . .	80
3.5. Возможности дальнейшего усовершенствования систем отклонения и сведения электронных лучей . . . . .	85
ГЛАВА 4	
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ КОРРЕКЦИИ ЧИСТОТЫ ЦВЕТА</b> . . . . .	87
4.1. Общие принципы проектирования цветных кинескопов . . . . .	87
4.2. О равномерном и точном нанесении элементов экрана . . . . .	93
4.3. Методы расчета простых корректирующих линз . . . . .	97
4.4. Общий метод расчета асимметричных корректирующих линз . . . . .	101
4.5. Особенности аппроксимации конгруэнции лучей . . . . .	105
4.6. Порядок расчета асимметричной линзы . . . . .	110
Заключение . . . . .	118
Приложение . . . . .	120
Список литературы . . . . .	124

