

А. М. КОВАЛЕВ, А. С. ТОКАРЕВ  
(НОВОСИБИРСК)

### ШИРОКОПОЛОСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛУЧОМ ЭЛТ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ОТКЛОНЕНИЕМ

Наиболее важными параметрами электроннолучевых трубок (ЭЛТ), применяемых в индикаторах устройств графической взаимосвязи человека с ЭВМ, чаще всего являются размер полезной площади экрана и разрешающая способность, так как они в конечном счете определяют качество и удобство визуального наблюдения изображения. Наиболее полно предъявляемым требованиям удовлетворяют ЭЛТ с магнитным отклонением, что объясняется, во-первых, возможностью (в отличие от ЭЛТ с электростатическим отклонением) достигать значительного угла отклонения электронного луча, благодаря чему диагональ или диаметр экрана может составлять несколько дециметров, и, во-вторых, высоким совершенством фокусирующих линз таких ЭЛТ, способных доводить диаметр светящегося пятна до 0,001 от диаметра или диагонали экрана в любой его части.

Поскольку электронный луч последовательно «рисует» все элементы изображения, его перемещение по экрану не подчиняется какому-либо периодическому закону и вследствие этого каналы вертикального и горизонтального отклонения должны быть достаточно широкополосными. Практически полоса пропускания каналов отклонения должна охватывать область от постоянного тока до некоторой верхней граничной частоты, определяющей быстродействие устройства. Однако на пути достижения высокого быстродействия часто встают определенные трудности. В связи с этим авторами предпринимается попытка проанализировать эти трудности и найти приемлемый вариант их разрешения.

Цепь управления лучом ЭЛТ содержит два основных звена: 1) отклоняющую систему и 2) электронную схему, вырабатывающую отклоняющий ток. В настоящей работе ставится задача определить влияние параметров этих двух звеньев на результирующую переходную характеристику канала отклонения ЭЛТ и найти пути сокращения времени переходных процессов. В соответствии с этим последующее изложение разбито на три части, посвященные соответственно: рассмотрению переходных процессов в отклоняющих катушках, анализу переходной характеристики усилителей, работающих на отклоняющие катушки, и способу сокращения длительности переходного процесса.

**А. Отклоняющие катушки.** Положение луча ЭЛТ определяется величиной тока в отклоняющих катушках, образующих отклоняющую систему [1], точнее — напряженностью отклоняющего магнитного поля. Одна-

ко только часть магнитного потока отклоняющей катушки создает отклоняющее поле, другая его часть создает внешнее (по отношению к ЭЛТ) магнитное поле, т. е. суммарный магнитный поток, определяемый током отклоняющей катушки, можно представить в виде двух параллельных ветвей, и напряженность отклоняющего поля зависит от магнитного сопротивления пространства, окружающего катушку. Поскольку в этом пространстве неизбежно оказываются электропроводящие и ферромагнитные материалы элементов конструкции фокусирующе-отклоняющего комплекса, то в области высоких частот часть магнитного потока уходит на создание вихревых токов в электропроводящих материалах, а на постоянном токе и в области низких частот ферромагнитные материалы конструкции имеют наибольшую начальную магнитную проницаемость  $\mu_0$ , иными словами, наименьшее магнитное сопротивление, на которое бесполезно замыкается часть суммарного потока отклоняющей катушки. Каждое из отмеченных явлений приводит к уменьшению отклоняющего поля, и вследствие этого зависимость напряженности отклоняющего поля от тока отклоняющей катушки имеет более или менее явно выраженную частотную неравномерность.

По той же причине при подаче в отклоняющую катушку прямоугольной ступеньки тока установление луча ЭЛТ происходит в два этапа: скачкообразное перемещение на некоторую величину, после которого следует сравнительно медленный процесс окончательного установления в новое положение. Интенсивность и длительность второй части переходного процесса определяются электрическими и магнитными свойствами, геометрической формой и взаимной ориентацией элементов конструкции, а его направление зависит от того, влияние каких (электропроводящих или ферромагнитных) материалов преобладает.

Влияние электропроводящих материалов проявляется в виде нарастающей, а ферромагнитных — в виде убывающей второй части переходного процесса установления луча. Это дает возможность взаимно скомпенсировать их. На рис. 1. а показан вид переходного процесса уста-

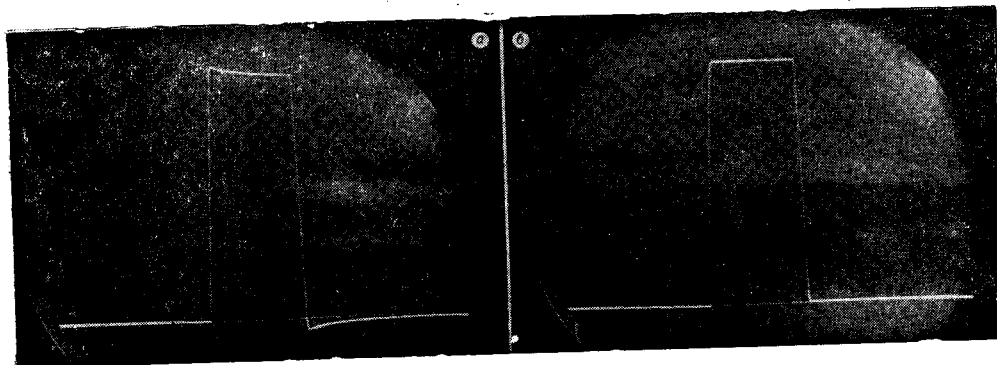


Рис. 1.

новления луча при подаче в отклоняющую катушку прямоугольного импульса тока; можно видеть, что преобладает влияние ферромагнитных материалов. При помещении в поле катушки специально подобранной металлической компенсирующей шайбы переходный процесс принимает вид, изображенный на рис. 1, б.

**Б. Усилители отклонения.** Быстродействие каналов отклонения ЭЛТ является чрезвычайно важным показателем, так как определяет количе-

ство информации, выводимой на экран за время одного кадра. Поскольку перемещение луча по экрану произвольно, то быстродействие определяется временем установления луча в произвольную точку экрана, в худшем случае — временем перевода луча из одной крайней точки экрана в противоположную. Такому переводу соответствует подача в отклоняющую катушку перепада тока  $\Delta I_{\max}$ . Если перевод луча через весь экран происходит за время  $\Delta t$ , то к отклоняющей катушке, имеющей индуктивность  $L$ , необходимо на время  $\Delta t$  приложить напряжение

$$U_{\text{п}} = L \frac{\Delta I_{\max}}{\Delta t}. \quad (1)$$

Напряжение  $U_{\text{п}}$  должна обеспечивать электронная схема, вырабатывающая отклоняющий ток. Очевидно, что напряжение питания выходных каскадов этой схемы должно быть не меньше напряжения  $U_{\text{п}}$ .

В установившемся режиме через отклоняющую катушку течет ток  $I_{\max}$  и падение напряжения на активном сопротивлении ее, равном  $r$ ,

$$U_{\text{у}} = r I_{\max} \quad (2)$$

намного меньше напряжения  $U_{\text{п}}$ . В этом случае на элементах выходных каскадов электронной схемы рассеивается мощность

$$P \approx U_{\text{п}} I_{\max}. \quad (3)$$

Максимально допустимое значение этой мощности и служит ограничивающим фактором при повышении быстродействия.

Найдем связь между  $P$  и  $\Delta t$ . Если число витков отклоняющей катушки обозначить  $\omega$ , то индуктивность ее будет равна

$$L = k\omega^2, \quad (4)$$

где  $k$  — некоторый постоянный коэффициент, зависящий от конструкции отклоняющей системы (ОС).

Ампер-витки максимального отклонения ЭЛТ являются ее постоянным параметром, обозначим его  $a$ :

$$I_{\max} \omega = \text{const} = a. \quad (5)$$

Тогда из (1), (3) — (5) легко вывести

$$P = \frac{1}{\Delta t} ka^2. \quad (6)$$

Так, для реальной ЭЛТ 45ЛМ2У (угол отклонения  $70^\circ$ ; диаметр горловины 36 мм;  $U_{\text{а}} = 14$  кВ) и тороидальной отклоняющей катушки имеем  $k = 5 \cdot 10^{-8}$ ,  $a = 250$  А·вит; значения  $\Delta t$  и  $P$  даны в таблице. Ясно, что

$\Delta t$ , мкс	$P$ , Вт
10	313
20	157
40	78
100	31,3

достижение быстродействия выше 40 мкс обычно сопряжено с чрезмерным увеличением мощности, рассеиваемой на элементах выходных каскадов электронной схемы, питающей отклоняющую систему.

Из (6) видно что мощность  $P$  не зависит от числа витков отклоняющей катушки. Выбор числа витков определяется максимально возможными токами и напряжениями, которые способна

развивать электронная схема, и частотными характеристиками отклоняющей катушки (последнее делает предпочтительным уменьшение  $\omega$ ).

Известные электронные схемы, обеспечивающие отклоняющий ток в ОС, можно разделить на две группы: цифровые и аналоговые.

К первой группе можно отнести цифро-аналоговые преобразователи с токовым выходом, работающие непосредственно на отклоняющую ка-

тушку [2]. Входной величиной таких устройств является цифровой код, соответствующий положению луча на экране. Анализ показывает [3], что такой способ построения изображения является весьма малоинформативным, так как быстродействие устройства накладывает жесткие ограничения на максимальное число точек, одновременно выводимых на экран.

Основной составной частью устройств второй группы является линейный усилитель, нагруженный на отклоняющую катушку, устанавливающий ток в ней, пропорциональный входному аналоговому сигналу. Если вход такого усилителя соединить с выходом цифро-аналогового преобразователя, то целиком реализуются все возможности описанных выше устройств; в то же время подсоединение усилителя к специализированным функциональным генераторам (векторов, окружностей и т. п.) позволяет строить изображение непрерывными линиями, что дает существенный (на один-два порядка) выигрыш в информативной возможности устройства. Это преимущество оказывается достаточно убедительным, чтобы отдать предпочтение аналоговому способу управления лучом ЭЛТ перед цифровым.

Следует заметить, что на оба рассмотренных способа в равной мере распространяется условие (6), т. е. на элементах выходных каскадов может рассеиваться значительная мощность. Но если нагрев по этой причине и температурные неустойчивости в случае линейного усилителя приведут лишь к дрейфу (некоторому смещению изображения на экране) или изменению усиления (масштаба изображения), то в случае цифро-аналогового преобразователя это может вызвать недопустимые нарушения заданных весовых соотношений отдельных разрядов, вследствие чего могут появиться недопустимые искажения изображения, что также говорит в пользу аналогового способа управления лучом.

Итак, остановимся на аналоговом способе. Известны индикаторы на ЭЛТ, в которых отклоняющая катушка является нагрузкой усилителя постоянного тока (УПТ) [4]. Для стабилизации крутизны и повышения выходного сопротивления УПТ часто вводят отрицательную обратную связь по току нагрузки (рис. 2). Здесь дифференциальный УПТ с коэффициентом усиления по напряжению  $K$ , реагирующий на разность напряжений между входными зажимами 1 и 2;  $R_i$  — внутреннее сопротивление УПТ;  $r$  — активное сопротивление;  $L$  — индуктивность;  $C$  — паразитная емкость отклоняющей катушки;  $R_{o,c}$  — сопротивление обратной связи.

Найдем переходную характеристику устройства, изображенного на рис. 2. Если считать усилитель  $K$  безынерционным (т. е. пренебречь его частотными и фазовыми искажениями) и ввести обозначения:

$$R_{\text{вых}} = R_i + (1 + K) R_{o,c} \quad (7)$$

выходное сопротивление усилителя с обратной связью по току;

$$S_0 = \frac{K}{R_{\text{вых}} + r} \quad (8)$$

начальная крутизна;

$$\tau = \sqrt{LC \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + r}} \quad (9)$$

постоянная времени;

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (10)$$

характеристическое сопротивление катушки;

$$d = \frac{r}{\rho} \sqrt{\frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВЫХ}} + r}} + \sqrt{\frac{\rho^2}{R_{\text{ВЫХ}}(R_{\text{ВЫХ}} + r)}} \quad (11)$$

затухание,

то операторное изображение крутизны  $S(p)$  описывается известным выражением для инерционного звена второго порядка:

$$S(p) = \frac{S_0}{p^2 \tau^2 + p d \tau + 1}.$$

Минимальной длительности переходного процесса соответствует случай  $d=2$ . Если пренебречь  $r$  по сравнению с  $R_{\text{ВЫХ}}$  (что допустимо при глубокой отрицательной связи по току) и  $\rho$ , то выражение (11) упрощается:

$$d \approx \frac{\rho}{R_{\text{ВЫХ}}}, \quad (12)$$

т. е. при  $d=2$

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_i + (1 + K) R_{o.c} \approx \frac{\rho}{2}. \quad (13)$$

Как видно из (13), увеличение  $R_{\text{ВЫХ}}$  до нужного значения возможно двумя путями: 1) увеличением  $K$  и 2) увеличением  $R_{o.c}$ . Однако при достаточно большом усилении  $K$  становится неправомерным принятое ранее допущение безынерционности усилителя (по этой причине, кроме всего прочего, устройство в целом трудно сделать устойчивым), а увеличение  $R_{o.c}$  может привести к чрезмерному увеличению мощности, рассеиваемой на нем, к тому же падает крутизна усилителя.

По указанным причинам реальные усилители подобного типа, как правило, имеют затухание много больше 2 и переходный процесс много длиннее оптимального. Если еще принять во внимание рассмотренное ранее ограничение, накладываемое выражением (6), то станут понятными трудности, связанные с повышением быстродействия. Очевидно, что рассмотренная схема линейного усилителя для отклоняющей катушки ЭЛТ нуждается в усовершенствованиях: 1) в уменьшении времени переходного процесса  $S(t)$  и 2) в снижении мощности, рассеиваемой на элементах выходного каскада усилителя.

**В. Усовершенствование линейного усилителя.** Одним из возможных путей достижения оптимального аperiodического переходного процесса может быть увеличение петлевого коэффициента усиления усилителей, но это ухудшает устойчивость устройства. Для реальных примеров понадоби-

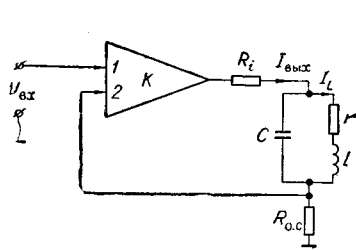


Рис. 2.

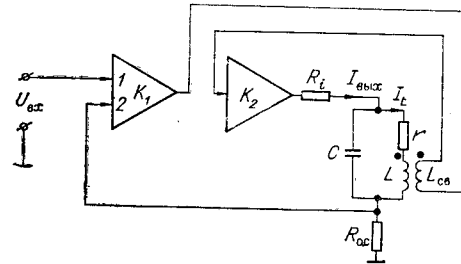


Рис. 3.

лось бы усиление порядка нескольких тысяч, в то время как для обеспечения необходимой линейности и стабильности требуемое петлевое усиление может быть менее ста. В этом смысле желательно было бы иметь переменный петлевой коэффициент усиления, возрастающий на время переходного процесса и уменьшающийся в установившемся режиме. Аналогичного эффекта можно достичь, введя в устройство положительную обратную связь по напряжению на отклоняющей катушке.

Блок-схема практической реализации такого замысла, представленная на рис. 3, содержит предварительный дифференциальный УПТ с коэффициентом усиления по напряжению  $K_1$  и выходной эмиттерный повторитель с коэффициентом передачи напряжения  $K_2$  и внутренним сопротивлением  $R_i$ ,  $L$ ,  $r$  и  $C$  — параметры отклоняющей катушки;  $R_{o.c}$  — сопротивление отрицательной обратной связи. С отклоняющей катушкой индуктивно связана вспомогательная обмотка  $L_{cb}$ , которая включена между выходом предварительного усилителя  $K_1$  и входом выходного повторителя  $K_2$  так, что образует цепь положительной обратной связи, т. е. напряжение на обмотке  $L_{cb}$  всегда складывается с выходным напряжением предварительного усилителя. Поскольку  $L_{cb}$  шунтирована лишь достаточно высоким входным сопротивлением выходного повторителя, то индуктивно связанные обмотки можно рассматривать как ненагруженный трансформатор с коэффициентом трансформации  $n$ , и поэтому напряжение на  $L_{cb}$  пропорционально производной от тока в отклоняющей катушке  $L$ . Таким образом, положительная обратная связь включается лишь на время переходного процесса, когда происходит изменение отклоняющего тока. В установившемся режиме напряжение на  $L_{cb}$  равно нулю и работа устройства не отличается от рассмотренного ранее линейного усилителя. Найдем переходную характеристику такого усилителя.

Введем принятые ранее обозначения:

$$R_{\text{вых}} = R_i (1 + K_1 K_2) R_{o.c}; \quad (14)$$

$$S_0 = \frac{K_1 K_2}{R_{\text{вых}} + r}; \quad \tau = \sqrt{LC \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + r}}; \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}};$$

$$d = \frac{r}{\rho} \sqrt{\frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + r}} + (1 - K_2 n) \sqrt{\frac{\rho^2}{R_{\text{вых}} (R_{\text{вых}} + r)}}, \quad (15)$$

где  $n$  — отношение витков  $\frac{\omega_{L_{cb}}}{\omega_L}$ ; тогда придем к полученному ранее

$$\text{выражению } S(p) = \frac{S_0}{p^2 \tau^2 + pd\tau + 1}.$$

Как легко заметить, отличие рассматриваемого усилителя от линейного без положительной обратной связи состоит лишь в выражении для  $d$ . Если пренебречь  $r$  как величиной, много меньшей  $\rho$  и  $R_{\text{вых}}$ , то получим приближенное значение

$$d \approx (1 - K_2 n) \frac{\rho}{R_{\text{вых}}} \quad (16)$$

или, принимая  $d=2$ :

$$R_{\text{вых}} = R_i + (1 + K_1 K_2) R_{o.c} \approx (1 - K_2 n) \frac{\rho}{2}. \quad (17)$$

Сравнивая выражения (12) и (16), можно заключить, что если усилитель с положительной обратной связью, то легче достичь затухания  $d=2$ , соответствующего оптимальному аperiodическому процессу

(критический режим); для этого не требуется чрезмерного увеличения усиления  $K_1$ , а достаточно получить произведение  $K_2 n$  близким к 1, но не больше 1, так как в этом случае возникает самовозбуждение. Эта опасность, однако, исключена тем, что коэффициент передачи повторителя  $K_2$  никогда не достигает 1, хотя близок к ней, а бифилярная намотка  $L$  и  $L_{св}$  делает  $n$  также весьма близким к единице.

Когда произведение  $K_2 n$  слишком велико, хотя и меньше 1, то затухание  $d$  получается меньше 2, и переходный процесс в отклоняющей катушке имеет колебательный характер; но его легко демпфировать, шунтируя отклоняющую катушку (иными словами, шунтируя  $R_{вых}$  усилителя) активным сопротивлением.

Итак, применение положительной обратной связи при минимальном затухании аperiodического переходного процесса избавляет от необходимости иметь чрезмерно большое петлевое усиление, чем устраняется один из недостатков рассмотренного ранее линейного усилителя. Снизить мощность, рассеиваемую на элементах выходного каскада, представляется возможным, применяя импульсную подпитку. Суть приема сводится к следующему: в установившемся режиме или при сравнительно медленных изменениях тока в отклоняющей катушке выходной каскад получает питание от низковольтного источника, напряжение которого выбрано довольно низким, чтобы мощность на элементах выходного каскада не превышала допустимой. При крутых перепадах тока в отклоняющей катушке, сопровождающихся приложением к ней напряжений, больших напряжения низковольтного источника, выходной каскад на

время переходного процесса обеспечивается повышенным напряжением питания от источника высоковольтной подпитки.

Практическая схема, реализующая изложенный прием, в упрощенном виде представлена на рис. 4. Выходной эмиттерный повторитель, выполненный на транзисторе ПП<sub>3</sub>, в установившемся режиме получает коллекторное питание от низковольтного источника  $+E_n$  через диод  $D_3$ . Так как падение

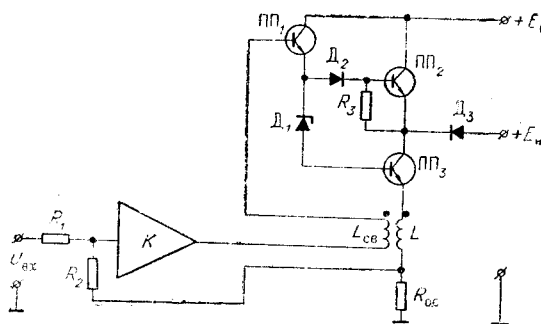


Рис. 4.

напряжения на отклоняющей катушке  $L$  мало, то потенциал базы ПП<sub>3</sub> и потенциал связанного с ней эмиттера предвыходного повторителя ПП<sub>1</sub> ниже потенциала  $+E_n$ , а транзистор ПП<sub>2</sub> (повторитель высоковольтной подпитки) заперт. Во время переходного процесса, например при увеличении тока в отклоняющей катушке, напряжение на обмотке  $L_{св}$  складывается с выходным напряжением предварительного УПТ, суммарное напряжение передается повторителем ПП<sub>1</sub> и потенциал его эмиттера может превысить  $+E_n$ . В этом случае транзистор ПП<sub>2</sub> открывается, обеспечивая выходной повторитель ПП<sub>3</sub> повышенным (вплоть до  $+E_v$ ) напряжением питания. По окончании переходного процесса схема автоматически возвращается в исходное состояние. Цепочка  $D_2-R_3$  защищает от пробоя эмиттерный переход ПП<sub>2</sub>, а кремниевый стабилитрон  $D_1$  создает постоянное напряжение смещения между базой ПП<sub>3</sub> и эмиттером ПП<sub>1</sub>, чем обеспечивается минимально необходимое напряжение коллектор — база для транзистора ПП<sub>3</sub>.

В установившемся режиме напряжение коллектор — эмиттер выходного повторителя ПП<sub>3</sub> равно

$$U_{\text{ПП}_3} = E_n - U_{D_3} - U_L - U_{R_{0.c}},$$

где  $U_{D_3}$ ,  $U_L$ ,  $U_{R_{0.c}}$  — падение напряжения на  $D_3$ , активном сопротивлении отклоняющей катушки и на сопротивлении обратной связи соответственно. В переходном режиме  $U_{\text{ПП}_3} = U_{D_1} - U_{D_2}$ , где  $U_{D_1}$  — напряжение стабилизации стабилитрона  $D_1$ ;  $U_{D_2}$  — падение напряжения на  $D_2$ .

Так как  $U_{D_1}$  целесообразно выбирать несколько меньше  $E_n$ , то наибольшая мощность будет рассеиваться на ПП<sub>3</sub> в установившемся режиме:

$$P_{\text{ПП}_3, \text{max}} \approx E_n I_{\text{max}}, \quad (18)$$

где  $I_{\text{max}}$  — максимальный ток отклоняющей катушки.

Мощность, рассеиваемая на повторителе высоковольтной подпитки, зависит от формы тока в отклоняющей катушке; наибольшего значения эта мощность ( $P_{\text{ПП}_2}$ ) достигает при прохождении через отклоняющую катушку пилообразных импульсов со скоростью изменения тока, близкой к

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{E_n}{L}, \quad (19)$$

так как в этом случае напряжение на коллекторе ПП<sub>3</sub> лишь незначительно превышает  $E_n$ , а через транзистор ПП<sub>2</sub>, у которого напряжение коллектор — эмиттер  $U_{\text{ПП}_2}$  близко к  $E_b - E_n$ , протекает весь ток нагрузки.

Определим максимальное значение  $P_{\text{ПП}_2, \text{max}}$ . Если через отклоняющую катушку проходят пилообразные импульсы тока с наклоном прямого хода, определяемым выражением (19), а наклон обратного хода имеет кругизну

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{E_b}{L} \quad (20)$$

и амплитуда импульсов равна  $I_{\text{max}}$ , то легко показать, что действующее значение такого тока определяется выражением

$$I_d = I_{\text{max}} \sqrt{\frac{E_b}{3(E_b + E_n)}}. \quad (21)$$

Соответственно максимальная мощность, рассеиваемая на транзисторе ПП<sub>2</sub>, составляет

$$P_{\text{ПП}_2, \text{max}} \approx I_d (E_b - E_n). \quad (22)$$

Если предположить, что ПП<sub>2</sub> и ПП<sub>3</sub> — идентичные транзисторы, и максимально допустимые мощности, рассеиваемые на них, принять одинаковыми, то из (18), (21) и (22) получим

$$E_n = \sqrt{\frac{E_b}{3(E_b + E_n)}} (E_b - E_n)$$

или

$$E_b^3 - 2 E_b^2 E_n - 2 E_b E_n^2 - 3 E_n^3 = 0. \quad (23)$$

Уравнение (23) имеет лишь один действительный корень

$$E_b = 3 E_n. \quad (24)$$



Таким образом, если в схеме рис. 4 соотношение между  $E_B$  и  $E_H$  установить в соответствии с выражением (24), то максимальное время установления тока в отклоняющей катушке составит

$$\Delta t = L \frac{I_{\max}}{U_B}, \quad (25)$$

в то время как мощность, рассеиваемая на транзисторах выходного каскада, будет равна

$$P_{\text{ПП}_2} = P_{\text{ПП}_3} = I_{\max} E_H = \frac{1}{3} I_{\max} E_B, \quad (26)$$

что в три раза меньше, чем определено в (3) и (6).

Рассмотренные приемы были использованы при построении усилителей отклонения индикатора системы графического взаимодействия «Экран». При напряжениях питания  $E_H = 17$  В и  $E_B = 60$  В достигнуто быстродействие около 20 мкс, в то время как мощность, рассеиваемая на транзисторах выходных каскадов усилителей, составляет около 50 Вт. Для достижения такого же быстродействия при помощи обычного линейного усилителя без высоковольтной подпитки эта мощность была бы более 150 Вт (в соответствии с таблицей).

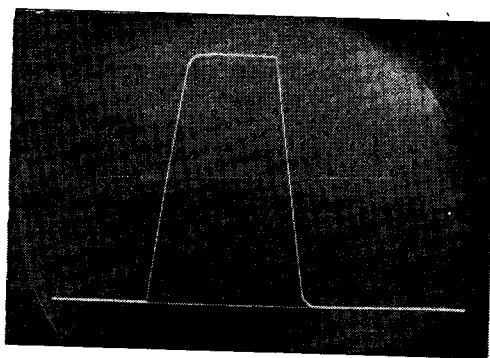


Рис. 5.

На рис. 5 показан вид переходного процесса при подаче на вход канала вертикального отклонения импульса длительностью 50 мкс.

Некоторые другие характеристики упомянутого индикатора: полезная площадь экрана  $30 \times 30$  см<sup>2</sup>; разрешающая способность  $1024 \times 1024$  точек; яркость более 100 нит; линейность около 1%; стабильность положения изображений (дрейф) не более 1 см; чувствительность каналов отклонения 30 см/В.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Э. Бонштедт, М. Г. Маркович. Фокусировка и отклонение пучков в электроннолучевых приборах. М., «Советское радио», 1967.
2. Г. Т. Макаров. Разработка и исследование системы управления электроннолучевой обработкой материалов при изготовлении микросхем («Київ-67»). Автореферат канд. дисс. Киев, 1969.
3. Льюин. О графических оконечных устройствах ЦВМ.— ТИИЭР, 1967, № 9.
4. Л. В. Кутуков, Ю. К. Кушнер, В. В. Лозовой, В. Г. Соколов, Г. А. Судачков, В. С. Чуняев. Специализированная электронновычислительная машина для управления процессами электроннолучевой обработки. М., ИТМВТ, 1967.

Поступила в редакцию  
23 октября 1970 г.