

ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗВЕРТОК С УЧЕТОМ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ЭКРАНА И ЕМКОСТИ ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

В осциллографических приборах и устройствах отображения информации, использующих электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим отклонением, искажения отклонения в значительной степени связаны с неоптимальной формой поверхности экрана и паразитной емкостью отклоняющих пластин.

Для электростатического отклонения луча при малых углах отклонения α и однородном отклоняющем поле в области параллельных пластин можно записать [1, 2]:

$$\operatorname{tg} \alpha = Mu, \quad (1)$$

где M — постоянный коэффициент для выбранной ЭЛТ; u — отклоняющее напряжение.

Линейное перемещение пятна по плоскому экрану

$$x'' = R_0 \operatorname{tg} \alpha = R_0 Mu, \quad (2)$$

где R_0 — расстояние от центра отклонения O до экрана — радиус отклонения (рис. 1).

Чувствительность к отклонению

$$S_0 = \frac{x''}{u} = R_0 M. \quad (3)$$

Таким образом, с точки зрения линейности отклонения, как видно из выражения (2), плоский экран является идеальным: чувствительность к отклонению постоянна и равна $R_0 M$.

В общем случае для перемещения пятна, отсчитанного по хорде, можно записать

$$x = (L_1 + L_2) \operatorname{tg} \alpha' = R_0 \cos \alpha' \operatorname{tg} \alpha' = R_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_1 + L_2}{L_2}\right)^2 \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha}}}, \quad (4)$$

где R_0 — радиус кривизны экрана.

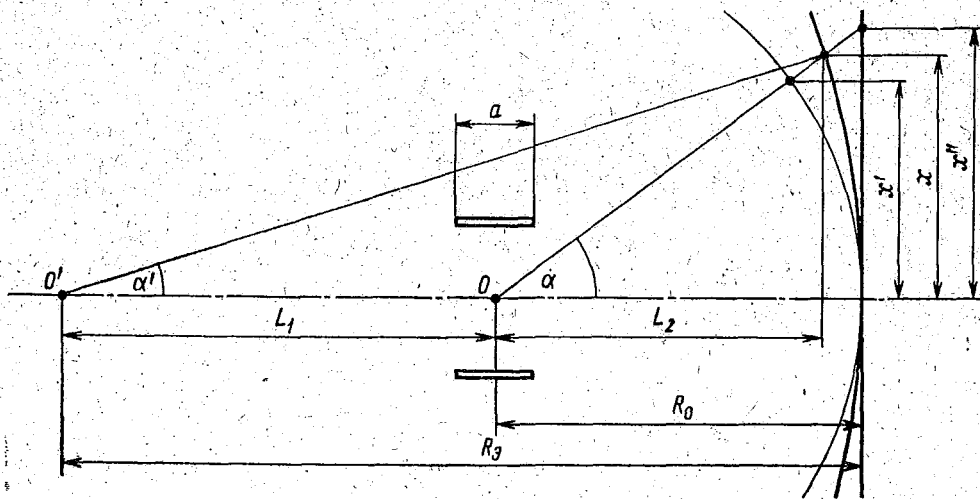


Рис. 1. Геометрические соотношения в ЭЛТ для анализа искажений при отклонении

Для сферического экрана ($R_3 = R_0, L_1 = 0$) имеем

$$x' = R_0 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} = R_0 \frac{Mu}{\sqrt{1 + M^2 u^2}}, \quad (5)$$

что в явном виде отражает нелинейную зависимость величины отклонения x' от приложенного к пластинам напряжения u .

Нелинейность отклонения может быть выражена через относительную ошибку отклонения

$$\gamma' = \frac{x'' - x'}{x'} = \frac{R_0 \operatorname{tg} \alpha - \frac{R_0 \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}}{\frac{R_0 \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} - 1 = \frac{1 - \cos \alpha}{\cos \alpha}. \quad (6)$$

Для сферического экрана ошибки γ' при углах отклонения α , близких к максимальным, как нетрудно подсчитать, могут превышать 5%.

Для плоского экрана $L_2 = R_0, L_1 + L_2 = R_0 = \infty$, и выражение (4) превращается в $x'' = R_0 \operatorname{tg} \alpha$, что совпадает с (2). Для плоского экрана ошибка отклонения $\gamma'' = \frac{x'' - x'}{x''}$ равна нулю.

Обратимся теперь к представляющему наибольший практический интерес случаю выпуклого экрана.

Подставляя в общее выражение (4) $\frac{L_1 - L_2}{L_3} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{x} (R_3 - R_0) + 1$, получаем квадратное уравнение

$$x^2 + \frac{2R_0(R_3/R_0 - 1)}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \frac{R_0^2(2R_3/R_0 - 1)}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \operatorname{tg}^2 \alpha = 0, \quad (7)$$

решением которого является

$$x = R_0 \operatorname{tg} \alpha \left[- \left(\frac{R_3/R_0 - 1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) + \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \sqrt{(R_3/R_0 - 1)^2 + (2R_3/R_0 - 1)(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)} \right]. \quad (8)$$

Относительная ошибка отклонения

$$\gamma = \frac{x'' - x}{x} = \frac{R_0 \operatorname{tg} \alpha}{x} - 1 = \frac{1}{- \left(\frac{R_3/R_0 - 1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) + \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \sqrt{(R_3/R_0 - 1)^2 + (2R_3/R_0 - 1)(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)}} - 1. \quad (9)$$

На рис. 2 показаны зависимости $\gamma(\alpha)$, рассчитанные по формуле (9) для некоторых типов ЭЛТ, имеющих различные значения R_3/R_0 .

Теоретически наибольшие ошибки отклонения (около 7% при $\alpha = 18^\circ$) присущи трубкам 13ЛЮ36В и 13ЛЮ37И, имеющим $R_3/R_0 \approx 0,78$.

Нелинейность отклонения здесь больше, чем в случае сферического экрана при $R_3/R_0 = 1$.

Если учесть, что у этих трубок $\alpha_{\max} = \operatorname{arctg} \left(\frac{D_{\text{раб}}}{2R_0} \right) \approx 12^\circ$, где $D_{\text{раб}}$ — рабочий диаметр экрана, ошибки отклонения не выходят за пределы 3%.

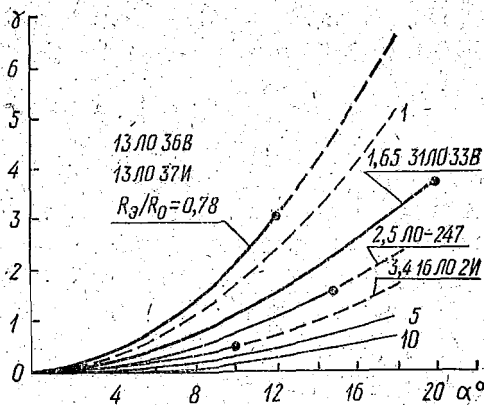


Рис. 2. Графики зависимостей $\gamma(\alpha)$ для некоторых типов ЭЛТ

Предельные углы отклонения для других типов ЭЛТ помечены на рис. 2 точками.

Нужно заметить, что геометрические соотношения в ЭЛТ для $R_3/R_0 < 1$ не полностью будут соответствовать рис. 1: центр отклонения O сместится левее (дальше от экрана) центра кривизны O' . Сохранив те же обозначения, что и на рис. 1, и взяв L_1 с минусом, для отклонения x и относительной ошибки γ получим полностью совпадающие с (8) и (9) расчетные формулы.

Для остальных типов ЭЛТ, имеющих $R_3/R_0 > 1$, ошибки отклонения при α_{\max} находятся в пределах 0,5—3,5%, уменьшаясь с ростом R_3/R_0 . При $R_3/R_0 = 5$ и $\alpha_{\max} = 18^\circ$ $\gamma \approx 1\%$, а при $R_3/R_0 = 10$ $\gamma = 0,5\%$, т. е. начиная с $R_3/R_0 = 5$ нелинейностью отклонения можно вполне пренебречь.

При малых предельных углах α и $R_3/R_0 \gg 1$, что характерно для ЭЛТ с почти плоским экраном, $L_2 \approx R_0$ и $L_1 + L_2 \approx R_3$.

После подстановки значений L_2 и $L_1 + L_2$ в формулу (4) при $R_3/R_0 \gg 1$ получаем более простые выражения для отклонения и относительной ошибки:

$$x \approx \frac{R_3 \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + (R_3/R_0)^2}} = \frac{R_0 \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{(R_3/R_0)^2}}} = \frac{x''}{\sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{(R_3/R_0)^2}} \quad (10)$$

$$\gamma \approx \frac{x'' - x}{x} = \sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{(R_3/R_0)^2}} - 1. \quad (11)$$

Для выяснения характера зависимости отклонения от приложенного напряжения в выражение (8), или в более простое выражение (10) при $R_3/R_0 \gg 1$, нужно подставить из формулы (1) $\operatorname{tg} \alpha = Mu$.

Во втором упрощенном случае связь между отклонением и напряжением будет описываться выражением

$$x = \frac{R_0 Mu}{\sqrt{1 + \frac{M^2 u^2}{(R_3/R_0)^2}}}, \quad (12)$$

что при подстановке линейного отклоняющего напряжения $u = k_1 t$ ($k_1 = \frac{D_{\text{раб}}}{2S_3 \cdot t_p}$; $D_{\text{раб}}$ — рабочий диаметр экрана, S_3 — чувствительность к отклонению; t_p — длительность линейной развертки) дает

$$x = \frac{R_0 M k_1 t}{\sqrt{1 + \frac{(M k_1)^2 t^2}{(R_3/R_0)^2}}}. \quad (13)$$

Подставив $\operatorname{tg} \alpha = Mu = M k_1 t$ в выражение (11), получим относительную ошибку отклонения во времени при линейной развертке:

$$\gamma = \sqrt{1 + \frac{(M k_1)^2 t^2}{(R_3/R_0)^2}} - 1. \quad (14)$$

На рис. 3 приведены зависимости $x(t)$ и $\gamma(t)$, построенные по формулам (13) и (14), из которых следует, что за счет кривизны поверхности экрана отклонение x нарастает медленнее, чем линейно изменяющееся напряжение $k_1 t$, и стремится к асимптоте R_3 при $t \rightarrow \infty$ (рис. 3, а).

Ошибка отклонения также нарастает во времени, приближаясь к асимптоте $\frac{M k_1 t}{R_3/R_0} - 1$. При $t \rightarrow \infty$ ошибка отклонения уходит в бесконечность, так как при этом теоретически стремится к бесконечности отклонение по плоскому экрану x'' ($t \rightarrow \infty$ соответствует $\operatorname{tg} \alpha \rightarrow \infty$ или $\alpha \rightarrow 90^\circ$).

Решив уравнение (12) относительно u и подставив затем $x = k_2 t$, найдем форму отклоняющего напряжения для получения линейной развертки:

$$u = \frac{k_2 \frac{R_3}{R_0} t}{M \sqrt{R_3^2 - k_2^2 t^2}}, \quad (15)$$

где $k_2 = \frac{D_{\text{раб}}}{2t_p}$.

Таким образом, для линейного перемещения пятна по экрану отклоняющее напряжение должно нарастать с увеличивающейся скоростью, стремясь при $t = t_1 = R_3/k_2 = \frac{2R_3}{D_{\text{раб}}} t_p$ к бесконечности (рис. 3, а). Это означает, что для трубки 13Л037И, в частности, $u = \infty$ при $t_1 = 3,76t_p$ или, по-другому, $t_p \approx 0,27t_1$, т. е. развертка занимает примерно 1/4 часть интервала t_1 .

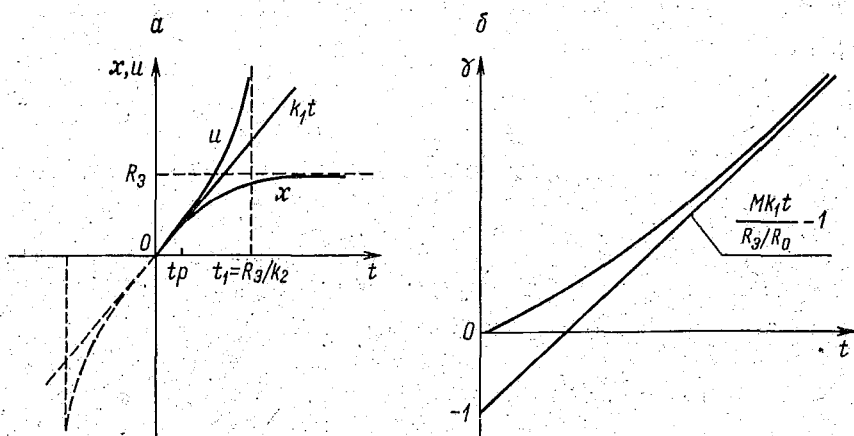


Рис. 3. Временные диаграммы для линейной развертки: а — графики зависимости $x(t)$ и $u(t)$; б — график зависимости $\gamma(t)$

При развертке на рабочий диаметр экрана необходимая форма напряжения получается симметричным продолжением графика u в область отрицательных значений напряжения (на рис. 3, а показана пунктиром).

Заметим, что расчеты по формулам (13) и (14) дают заниженные значения искажений и соответственно меньшую нелинейность отклоняющего напряжения в выражении (15) для реально существующих ЭЛТ, у которых условие $R_3/R_0 \gg 1$, как правило, не выполняется.

Если ставится задача получить высоко линейную развертку, нужно обратиться к более точному выражению (8), выполнив последующие громоздкие расчеты на ЭВМ.

Для оценки влияния емкостей пластин на процессы отклонения луча воспользуемся схемой на рис. 4, в которой $R_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление усилителя (или генератора) напряжения развертки, $C_{\text{вых}}$ — выходная емкость усилителя; C_p , R_p — разделительная цепь, $C_{\text{пл}}$ — емкость отклоняющей пластины на корпус; $C_{\text{пл}}''$ — взаимная емкость между пластинами.

Выходное напряжение $u_{\text{вых}}$ усилителя прикладывается к отклоняющей пластине X_1 через цепь $R_{\text{вых}} C_0$, где $C_0 = C_{\text{вых}} + C_{\text{пл}}'$, а $C_{\text{пл}} = C_{\text{пл}}' + 2C_{\text{пл}}''$ — эквивалентная емкость пластины на корпус (обычно $R_p \gg R_{\text{вых}}$ и $C_p \gg C_0$).

Напряжение, непосредственно приложенное к пластине, оказывается равным

$$u_{\text{пл}} = u_{\text{вых}} (1 - e^{-t/\tau}), \quad (16)$$

где $\tau = R_{\text{вых}} C_0$ — постоянная времени цепи.

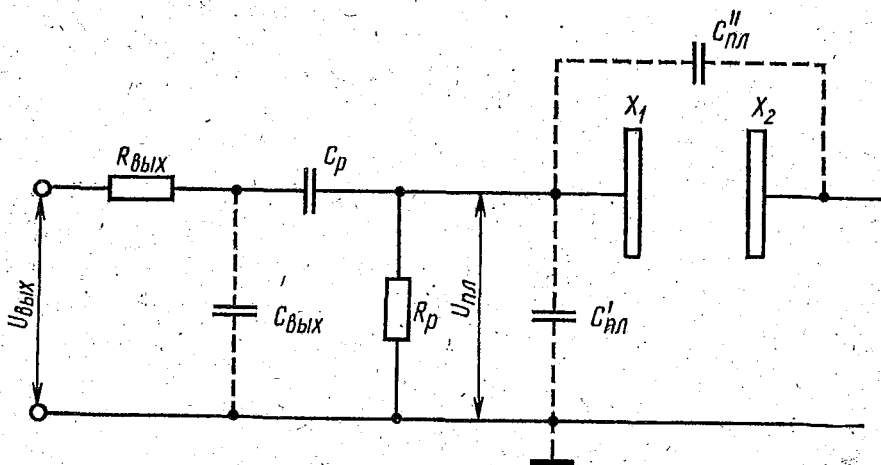


Рис. 4. К оценке искажений, вносимых емкостью отклоняющих пластин

Таким образом, паразитная емкость пластины совместно с выходным сопротивлением и выходной емкостью усилителя вызывает искажение начала развертки в течение времени $t_0 \approx 4\tau$.

Задавая время t_0 и определив суммарную емкость C_0 , можно рассчитать максимально допустимую величину $R_{\text{вых}}$:

$$R_{\text{вых}} \leq \frac{t_0}{4C_0}. \quad (17)$$

Если принять $t_0 \leq 0,01t_p$, для $R_{\text{вых}}$ получим

$$R_{\text{вых}} \leq 0,0025 \frac{t_p}{C_0}. \quad (18)$$

Для большинства ЭЛТ $C'_{\text{пл}} = 10 - 15$ пФ, $C''_{\text{пл}} = 1 - 4$ пФ. Приняв $C_0 = C_{\text{вых}} + C_{\text{пл}} = 25 + 25 = 50$ пФ и $t_p = 100$ мкс, найдем, что выходное сопротивление не должно превышать 5 кОм.

При той же эквивалентной емкости для $t_p = 10$ мкс получим $R_{\text{вых}} \leq \leq 500$ Ом, для $t_p = 1$ мкс — $R_{\text{вых}} \leq 50$ Ом.

Следовательно, даже при весьма строгих требованиях к протяженности искаженного участка t_0 (1% от длительности развертки) и значительной суммарной емкости C_0 величина $R_{\text{вых}}$ получается не очень малой и вполне реализуемой в практических схемах.

В противном случае необходимо ввести коррекцию сигналом, т. е. найти $u_{\text{вых}}$ из выражения (16):

$$u_{\text{вых}} = \frac{u_{\text{пл}}}{1 - e^{-t/\tau}}. \quad (19)$$

Здесь $u_{\text{пл}}$ — напряжение, которое непосредственно нужно приложить к пластине для получения линейной развертки с учетом влияния кривизны поверхности экрана.

Разработанная для линейной развертки методика оценки искажений может быть распространена и на случаи формирования специальных электростатических разверток (неравномерной линейной, логарифмической, кольцевой и др.).

Подробное освещение этих достаточно сложных вопросов выходит за рамки данной статьи, но общая схема метода, независимо от закона отклонения луча, представляется в следующем виде.

1. При выбранной ЭЛТ для заданного закона перемещения пятна $x(t)$ оцениваются искажения развертки за счет кривизны экрана: в формулу (8) подставляется $\text{tg } \alpha = Mu$, где u пропорционально $x(t)$, и нахо-

дятся ошибки отклонения во времени аналогично (12), (13) и (14) для упрощенного анализа линейной развертки.

2. Если ошибки отклонения превышают допустимые, определяется форма напряжения развертки, корректирующая искажения отклонения: после подстановки $\operatorname{tg} \alpha = Mu$ уравнение (8) решается относительно u , а затем делается подстановка подобно выражениям (12), (15) для линейной развертки.

3. Оцениваются искажения, вносимые емкостью отклоняющих пластин, т. е. определяется при заданных искажениях максимально допустимое выходное сопротивление оконечного каскада канала развертки по формуле (17).

Если найденное значение $R_{\text{вых}}$ практически обеспечить невозможно, вводится дополнительная коррекция сигналом в соответствии с выражением (19), где $u_{\text{пл}}$ — найденная форма напряжения по п. 2.

4. В результате расчетов по пп. 2 и 3 может получиться очень сложная форма напряжения развертки. В этом случае целесообразно ввести аппроксимацию напряжения и дать оценку ошибкам.

5. Проектируются схемы формирования напряжения развертки, корректирующего искажения за счет кривизны экрана и емкости пластин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миллер В. А., Куракин Л. А. Приемные электроннолучевые трубки. М., 1971.

2. Красноголовый Б. Н. Проектирование и расчет элементов индикаторных устройств. Минск, 1971.

Поступила в редакцию
1/IX 1977 г.

Кафедра ЭММ

УДК 535.33/34:539.193:539.194

Е. В. БАРКОВСКИЙ, Н. А. ПРОКОШИНА,
Н. Н. ХОВРАТОВИЧ, С. Н. ЧЕРЕНКЕВИЧ

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ТРОМБИНА

Тромбин — важнейший фермент системы свертывания крови. В результате ряда исследований показано [1], что молекула тромбина содержит ряд цепей с различными молекулярными весами и первичной структурой, однако пространственная структура тромбина изучена недостаточно, и поэтому целесообразно привлечение различных физико-химических методов для исследования молекул этого белка.

В настоящей работе анализируются колебательные спектры — инфракрасные спектры поглощения (ИК) и комбинационного рассеяния (КР) — твердой фазы тромбина, полученного в результате лиофильной сушки растворов с различными рН. Интерпретация экспериментального материала основана на литературных данных по колебательным спектрам простых пептидов, полипептидов и белков [2—9].

Использован коммерческий препарат тромбина, выпускаемый Каунасским предприятием бакпрепаратов. Очистка тромбина производилась методом колоночной гель-хроматографии на сефадексах G-75 и G-100. Растворы тромбина готовили в трис-HCl буфере; рН растворов изменяли добавлением соляной кислоты или гидроксида натрия. ИК-спектры твердой фазы тромбина записывали на спектрофотометре UR-20.

Скорость регистрации ИК-спектров $64 \text{ см}^{-1}/\text{мин}$. Спектральная ширина щели в области 1600 см^{-1} составляла 7 см^{-1} , в области 3300 см^{-1} — 4 см^{-1} . Лиофильно высушенный тромбин спрессовывался с КВг в вакууме в прозрачные таблетки (3—4 мг на 2 г КВг). КР-спектры получены на спектрофотометре Spex-Ramallog-4 при возбуждении аргоновым лазером