

УДК 621.397: 621.384.3

Ю.Р. Кирпиченко

Исследование влияния режимов питания ЭОП на динамический диапазон активно-импульсной телевизионной системы

Рассмотрено влияние режимов питания ЭОП, эффектов насыщения микроканалов и элементов ПЗС на динамический диапазон активно-импульсной телевизионной системы.

Ключевые слова: динамический диапазон, электронно-оптический преобразователь, прибор с зарядовой связью.

Динамический диапазон телевизионной системы определяют, как правило, отношением освещенности, при которой наступает насыщение, к освещенности, при которой отношение сигнал/шум равно пороговому значению.

Верхняя граница динамического диапазона активно-импульсной системы (АИ ТВС) определяется максимальной накопительной способностью элемента матрицы ПЗС пропорциональной глубине потенциальной ямы и геометрической площади элемента, либо насыщением микроканальной пластины (МКП).

При изменении условий наблюдения часто возникает необходимость ручной либо автоматической регулировки режимов питания ЭОП. При этом диапазоны регулировок напряжений на электродах ЭОП не должны выходить за пределы, устанавливаемые верхней и нижней границами динамического диапазона.

Параметром ЭОП, которым можно управлять, является коэффициент усиления. Лучшей чувствительностью к регулированию усиления ЭОП является регулирование напряжения на МКП. Другой возможностью управления коэффициентом усиления является изменение напряжения промежутка «выход МКП – экран». Такой способ управления величиной коэффициента усиления широко используется в ЭОП приборов ночного видения.

Проведем анализ влияния изменений напряжений на электродах ЭОП на динамический диапазон АИ ТВС, учитывая при этом шумы, яркость темнового свечения экрана, темновой ток ПЗС, процессы насыщения в ЭОП и ПЗС.

К параметрам ЭОП, оказывающим заметную роль на величину отношения сигнал/шум, относятся:

- квантовый выход фотокатода;
- потери фотоэлектронов в промежутке «фотокатод–МКП», зависящие от конструкции ЭОП (наличие или отсутствие ионно-барьерной пленки, прозрачность структуры МКП и т. д.);
- увеличение шума в процессе умножения фотоэлектронов в МКП;
- шумы люминофорного экрана;
- уровень темнового свечения экрана, обусловленный электронными потоками в темновом режиме и оптической обратной связью.

Влияние МКП и люминофорного экрана на отношение сигнал/шум (фактор шума) принято характеризовать коэффициентом шума.

Выражение, полученное в работе [1], имеет вид

$$F_{\text{ш}} = \sqrt{\left(\frac{1}{k_3 k_{\text{п}} (1 - \exp(-\delta_{\text{п}}))} \right) \left(1 + \frac{1}{\delta_{\text{п}}} + \frac{1 + G_{\text{МКП}}/\delta_{\text{п}}}{G_{\text{МКП}}} \right)}, \quad (1)$$

где k_3 – коэффициент заполнения площади МКП каналами; $k_{\text{п}}$ – коэффициент прохождения электронами алюминиевого покрытия на входе МКП; $\delta_{\text{п}}$ – коэффициент вторичной эмиссии для случая первичного умножения; $G_{\text{МКП}}$ – коэффициент усиления МКП.

Согласно [2] коэффициент усиления МКП равен

$$G_{\text{МКП}} = \left[\frac{AU_{\text{МКП}}^2}{4u^* \gamma_k^2} \right] U_{\text{МКП}} \frac{4u^* \gamma_k^2}{U_{\text{МКП}}}, \quad (2)$$

где A – константа; $U_{\text{МКП}}$ – напряжение на микроканальной пластине; u^* – приведенная энергия вылета вторичного электрона; $\gamma_k = l_k/d_k$ – калибр канала; l_k – длина канала; d_k – диаметр канала.

С использованием выражений (1) и (2) были рассчитаны зависимости величины фактора шума от напряжения на МКП для разных значений коэффициента вторичной эмиссии первичного умножения. При расчете зависимостей были использованы параметры МКП 18-10У фирмы «Баспик»: $d_k = 10^{-5}$ м; $\gamma_k = 39$; $k_3 = 0,6$ [3].

Как видно из рис. 1, коэффициент шума уменьшается с ростом $\delta_{\text{п}}$ и $U_{\text{МКП}}$. Начиная с некоторого значения $U_{\text{МКП}}$, величина $F_{\text{ш}}$ определяется только величиной $\delta_{\text{п}}$.

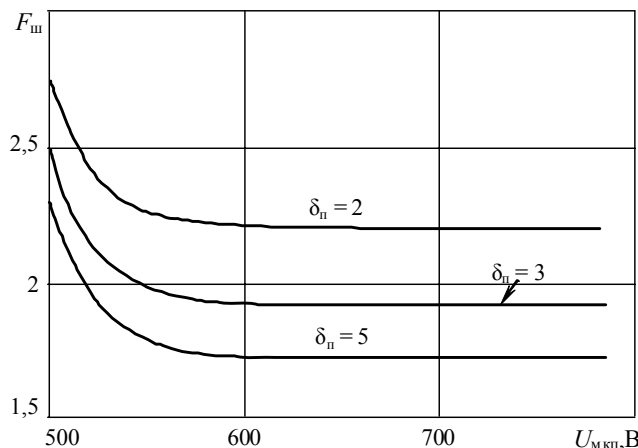


Рис. 1. Зависимость величины фактора шума от напряжения на микроканальной пластине

Запишем выражения для среднего значения сигнала и дисперсии шума на элементе матрицы ПЗС, полученные в работе [4], в следующем виде:

$$N_3 = \frac{N_0(1+K)\eta_{\text{ф}}\eta_{\text{ПЗС}}k_{\text{со}}G_{\text{МКП}}G_3}{2KM_{\text{со}}^2}, \quad (3)$$

$$D[N_3] = \frac{N_0(1+K)\eta_{\text{ф}}F_{\text{ш}}(\eta_{\text{ПЗС}}k_{\text{со}}G_{\text{МКП}}G_3)^2}{2KM_{\text{со}}^4} + N_{\text{ш}}^2, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{ф}}$ – квантовый выход фотокатода ЭОП; $\eta_{\text{ПЗС}}$ – квантовый выход фоточувствительной поверхности ПЗС; $k_{\text{со}}$ – коэффициент, характеризующий потери в согласующей оптике; $M_{\text{со}}$ – коэффициент увеличения согласующей оптики; $N_{\text{ш}}$ – среднее квадратическое значение шумов ПЗС; $G_3 = k_3U_3$; U_3 – напряжение на экране ЭОП; N_0 – количество фотонов от объекта наблюдения; K – контраст изображения.

Отношение сигнал/шум на элементе ПЗС будет равно

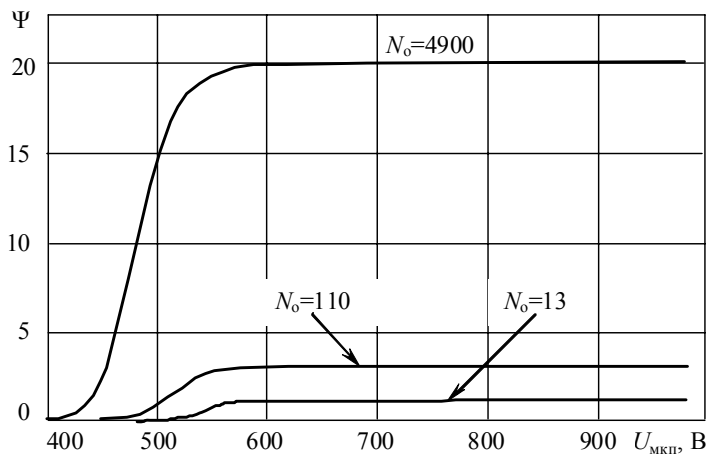
$$\Psi_3 = \frac{N_3}{\sqrt{D[N_3]}}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведены рассчитанные по формуле (5) с учетом (3) и (4) зависимости отношения сигнал/шум от напряжения на МКП.

Анализ кривых, приведенных на рис. 1 и 2, показывает, что для минимизации влияния шумов МКП и матрицы ПЗС напряжение на МКП не должно быть менее ≈ 600 В.

Рис. 2. Зависимость величины отношения сигнал/шум от напряжения на микроканальной пластине:

$U_3 = 6$ кВ; $K = 1$; $\delta_{\text{п}} = 3$



При увеличении $U_{\text{МКП}}$ свыше 600 В среднее значение числа зарядов на элементе ПЗС будет возрастать в соответствии с выражением (3), а отношение сигнал/шум будет определяться уравнением

$$\Psi = \sqrt{\frac{N_0(1+K)}{2KF_{\text{ш}}}}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что при $U_{\text{МКП}} > 600$ В отношение сигнал/шум не зависит от напряжения на МКП и шумов ПЗС.

Максимальная величина заряда на элементе ПЗС ограничивается его насыщением, либо насыщением микроканалов.

Насыщение, вызванное одной из рассмотренных выше причин, приводит к искажениям изображения, связанным с ограничением динамического диапазона и числа воспроизводимых градаций яркости.

Запишем условия работы МКП [5] в импульсном и непрерывном режимах соответственно в виде

$$\eta_{\text{ф}} N_0 \frac{1+K}{2K} \left[\frac{AU_{\text{МКП}}^2}{4u^* \gamma_{\text{к}}^2} \right]^{4u^* \gamma_{\text{к}}^2} U_{\text{МКП}} = \frac{\pi \varepsilon U_{\text{МКП}} d_{\text{к}}}{g_e \gamma_{\text{к}}}, \quad (7)$$

$$\eta_{\text{ф}} N_0 \frac{1+K}{2K} \left[\frac{AU_{\text{МКП}}^2}{4u^* \gamma_{\text{к}}^2} \right]^{4u^* \gamma_{\text{к}}^2} U_{\text{МКП}} = \frac{0,1 d_{\text{к}}^2 U_{\text{МКП}} t_{\text{н}}}{g_e R_{\text{МКП}} k_3 d_{\text{ЭОП}}}, \quad (8)$$

а условие насыщения элемента ПЗС в виде

$$\frac{N_0(1+K)\eta_{\text{ф}}\eta_{\text{ПЗС}}k_{\text{со}}G_{\text{МКП}}G_{\text{Э}}}{2KM_{\text{со}}^2} = N_{\text{знас}}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м [1] – абсолютная величина диэлектрической проницаемости материала микроканала; g_e – заряд электрона; $t_{\text{н}}$ – время накопления; $R_{\text{МКП}}$ – электрическое сопротивление МКП; $d_{\text{ЭОП}}$ – диаметр рабочего поля изображения ЭОП; $N_{\text{знас}}$ – количество электронов, при котором наступает насыщение элемента матрицы ПЗС.

Решая уравнения (7)–(9) относительно $U_{\text{МКП}}$, получим зависимости верхней границы регулирования напряжения на МКП от уровня освещенности. Эти зависимости приведены на рис. 3.

Анализ кривых, приведенных на рис. 3, и данных о величине заряда насыщения элемента ПЗС высокого разрешения позволяет предположить, что эффектом насыщения МКП в непрерывном режиме работы можно пренебречь, но нельзя пренебрегать возможностью проявления эффекта насыщения в импульсном режиме работы. Кроме того, очевидным следствием увеличения $U_{\text{МКП}}$ является уменьшение динамического диапазона Dd .

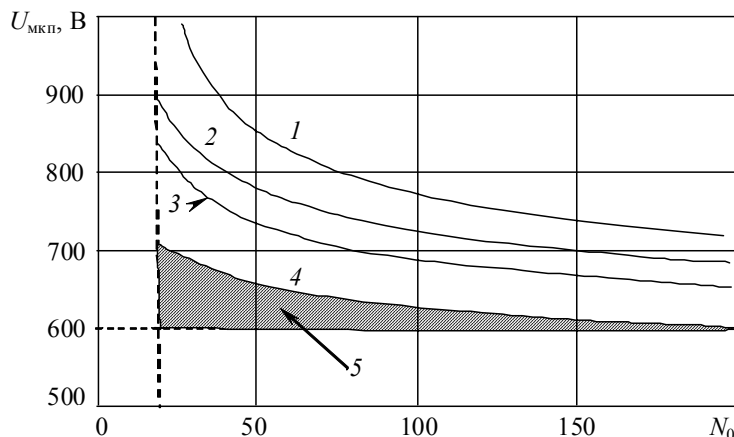


Рис. 3. Зависимости верхней границы регулирования напряжения на МКП от уровня освещенности: 1 – непрерывный режим, ограничение за счет насыщения микроканалов; 2 – непрерывный режим, насыщение за счет конечной величины емкости элемента ПЗС ($N_{\text{знас}} = 200000$); 3 – импульсный режим, ограничение за счет насыщения микроканалов; 4 – импульсный режим, насыщение за счет конечной величины емкости элемента ПЗС ($N_{\text{знас}} = 30000$); 5 – область регулирования $U_{\text{МКП}}$

Зависимости, приведенные на рис. 4 и 5, показывают, как изменяется ширина динамического диапазона при изменении напряжения на экране ЭОП и контраста изображения.

Характер поведения кривых указывает на возможность эффективно управлять качеством изображения путем регулировки напряжения на экране ЭОП.

Как уже отмечалось выше, такой способ управления яркостью экрана по среднему току в цепи экрана широко используется в ЭОП приборов ночного видения. Другим эффективным способом, позволяющим обеспечить возможность наблюдения объектов при достаточно высоких освещенностях, является широтно-импульсный режим питания фотокатода ЭОП.

Рис. 4. Влияние контраста изображения и напряжения на экране ЭОП на ширину динамического диапазона: 1 – $U_0 = 2$ кВ; $k_{co} = 0,05$; $U_{мкп} = 600$ В; 2 – $U_0 = 4$ кВ; $k_{co} = 0,05$; $U_{мкп} = 600$ В; 3 – $U_0 = 6$ кВ; $k_{co} = 0,05$; $U_{мкп} = 600$ В; $N_{знас} = 300000$

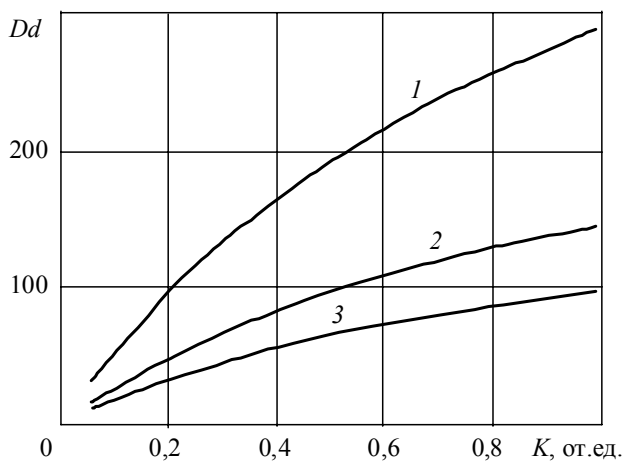
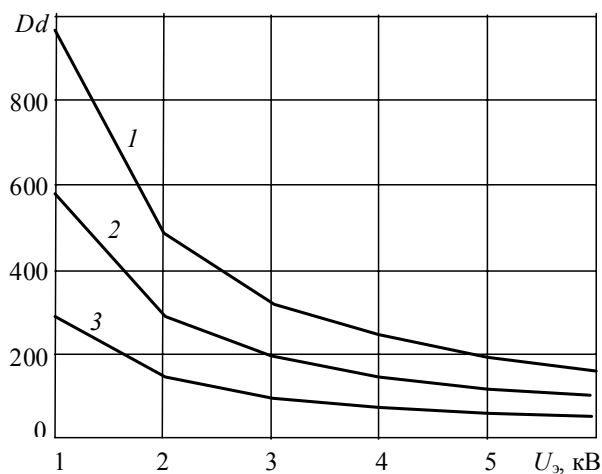


Рис. 5. Зависимость ширины динамического диапазона от напряжения на экране ЭОП и величины потерь в согласующей оптике при $K = 1$ и $U_{мкп} = 600$ В: 1 – $k_{co} = 0,03$; 2 – $k_{co} = 0,05$; 3 – $k_{co} = 0,1$; $N_{знас} = 300000$



К причинам снижения контраста изображения в АИ ТВС можно отнести влияние таких параметров, как яркость темного свечения экрана ЭОП и темновой ток ПЗС. К физическим процессам, рождающим электронные потоки в ЭОП в темновом режиме, относятся термо- и автоэмиссия МКП и электролюминесценция поверхности корпуса [6].

Типовые значения темнового тока для лучших образцов ПЗС составляют при комнатной температуре доли $\text{нА}/\text{см}^2$, или несколько сотен (иногда тысяч) электронов на ячейку в секунду.

При работе АИ ТВС в непрерывном режиме уменьшить уровень фона, обусловленного влиянием этих параметров, можно только охлаждением.

При работе в АИ-режиме влияние яркости темного свечения экрана резко снижается (пропорционально скважности), а фоновая составляющая, обусловленная темновым током ПЗС, остается неизменной. Нами предложен вариант решения [7], позволяющий снизить уровень темнового тока ПЗС до величины, меньшей одного электрона на элементе ПЗС за один кадр накопления.

Данное исследование выполнено по госзаданию ТУСУРа «Наука–2012».

Литература

1. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений. – Т. 1 / Под ред. Б. Кайзана. – М.: Мир, 1978. – 336 с.
2. Берковский А.Г. Вакуумные фотоэлектронные приборы / А.Г. Берковский, В.А. Гаванин, И.Н. Зайдель. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.
3. Микроканальные пластины. Каталог ВТЦ «Баспик» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.baspik.com, свободный (дата обращения: 02.02.2011).
4. Дегтярев П.А. Исследование и разработка устройств получения видеосигнала в активно-импульсной телевизионной системе наблюдения: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2005. – 233 с.

5. Кирпиченко Ю.Р. Влияние параметров и режимов питания ЭОП на качество изображения активно-импульсной телевизионной системы // 17-я междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-17-2011)». – Томск: В-Спектр, 2011. – С. 60–63.
 6. Багдурев Р.И. Обратная оптическая связь в ЭОП с прямым переносом изображения // Прикладная физика. – 2003. – № 1. – С. 121–122.
 7. Пат. № 2406100 РФ, МПК G01S 17/06. Активно-импульсная телевизионная система / Ю.Р. Кирпиченко (РФ), М.И. Курячий (РФ), И.Н. Пустынский (РФ). – № 2008152485/28; заявл. 29.12.2008; опубл. 10.12.2010. – Бюл. № 34. – 8 с.
-

Кирпиченко Юрий Романович

Канд. техн. наук, доцент каф. телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: (382-2) 42-33-87

Эл. почта: kirp@tu.tusur.ru

Kirpichenko Yu. R.

The research on the influence of gate voltage of image intensifier on the dynamic range of active-pulse television systems

In the article you can read about the gate voltage of image intensifier, influence of pinhole and CCD element on the dynamic range of active-pulse television systems.

Keywords: dynamic range, image intensifier, charge-coupled device.
