

М. И. ПЕРГАМЕНТ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН,  
В. С. КОМЕЛЬКОВ

### ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ КАДРОВЫЕ СЪЕМОЧНЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящей работе рассматриваются некоторые результаты разработки схем управления и вопросы улучшения электронно-оптических преобразователей, применяемых для сверхскоростной регистрации.

Съемка электронно-оптическими преобразователями,  
снабженными электронными затворами

Многокадровая съемка с помощью электронно-оптических преобразователей, снабженных электронным затвором, осуществляется путем скачкообразного перемещения электронного изображения в горизонтальном и вертикальном направлениях. Экспонирование происходит в моменты остановки изображения. В соответствии с этим на горизонтальные и вертикальные пластины преобразователя подаются многоступенчатые отклоняющие импульсы, а на пластины затвора прямоугольные импульсы, отпирающие преобразователь. Число кадров в ряду и количество рядов определяются числом «ступенек» отклоняющих импульсов, а частота съемки — их длительностью.

Трудность формирования отклоняющих импульсов заключается в жестких требованиях к их стабильности и симметрии. Для получения удовлетворительной разрешающей способности изображения необходимо выдерживать стабильность «стола» киловольтных импульсов в пределах  $0.1 \div 0.5\%$  их амплитуды и несимметрию разнополярных напряжений на отклоняющих пластинах в пределах  $0.2 \div 0.5\%$  от напряжения на электронно-оптическом преобразователе. Последнее требование приводит к необходимости использования для отклонения напряжений обеих полярностей. При обычной системе развертки это вносит серьезные ограничения как по величине, так и по скорости отклонения из-за трудностей, связанных с формированием высоковольтных положительных импульсов.

Предложенный нами способ развертки обходит эти трудности и позволяет использовать для отклонения только импульсы отрицательной полярности. При этом каждый из двух отрицательных ступенчатых импульсов, один с возрастающими, другой со спадающими уровнями «ступенек», подается на разные отклоняющие пластины одной пары. Совместно с предварительно поданным на обе пластины равным постоянным положительным смещающим потенциалом эти импульсы образуют ряд напряжений,

К ст. М. И. Пергамента и др.,  
стр. 67.

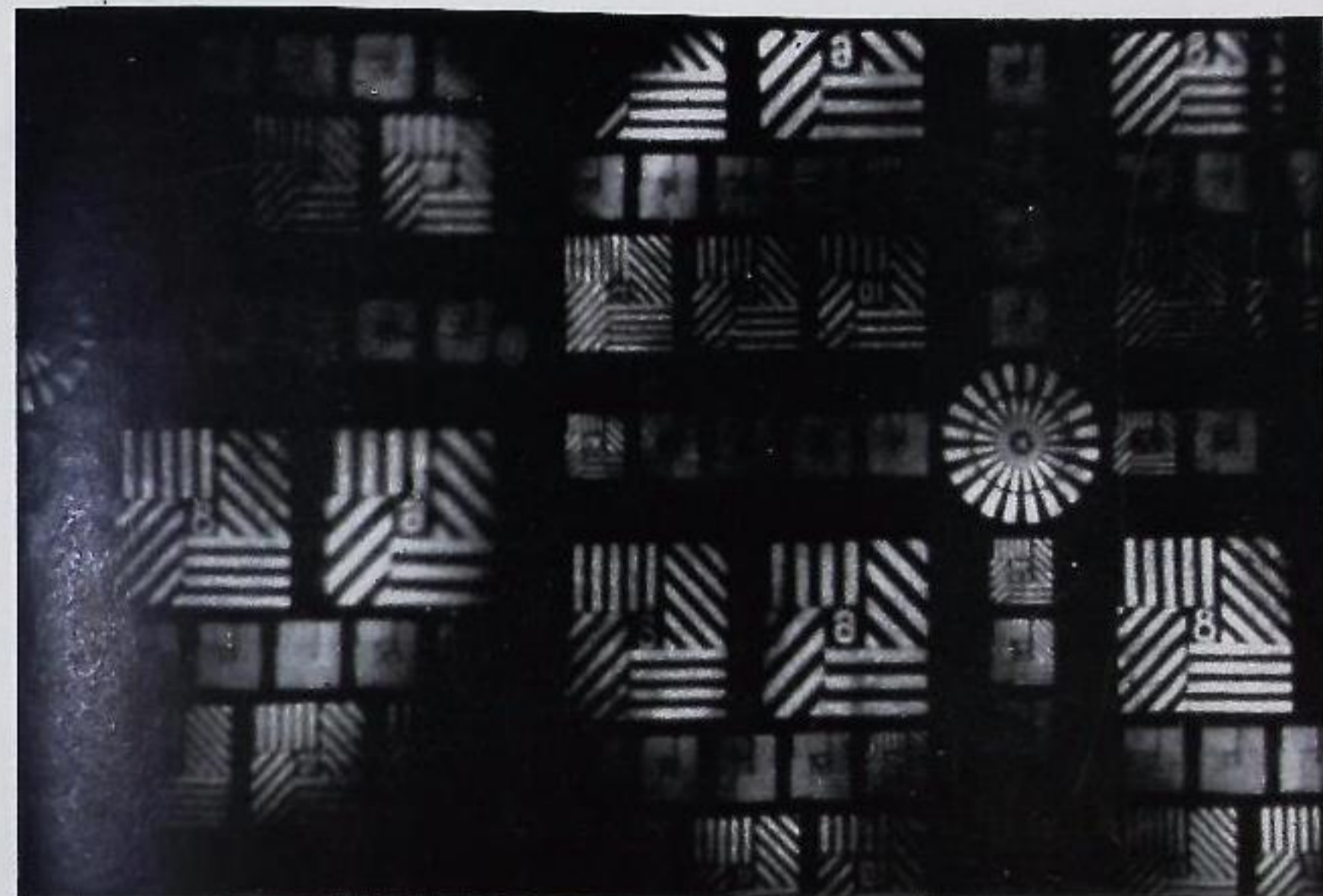


Рис. 4. Кадровая съемка мира, подсвеченной импульсной лампой, на преобразователе типа ПИМ-3.

Частота съемки  $2.5 \cdot 10^6$  кадров/сек., выдержка  $10^{-7}$  сек.

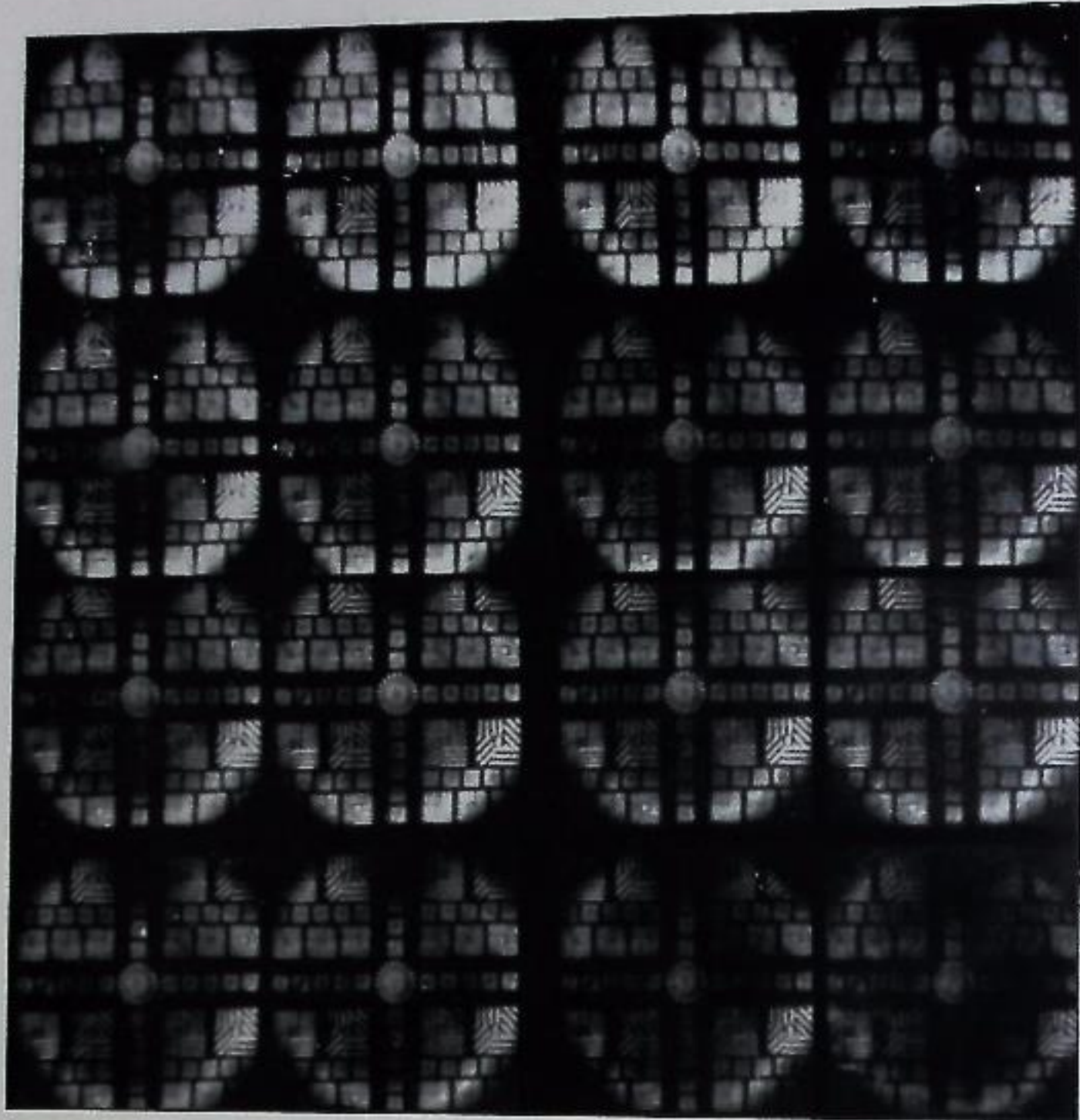


Рис. 5. Кадровая съемка мира, подсвеченной импульсной лампой, на преобразователе типа ПИМ-3.  
Частота съемки  $10^6$  кадров/сек., выдержка  $5 \cdot 10^{-7}$  сек.

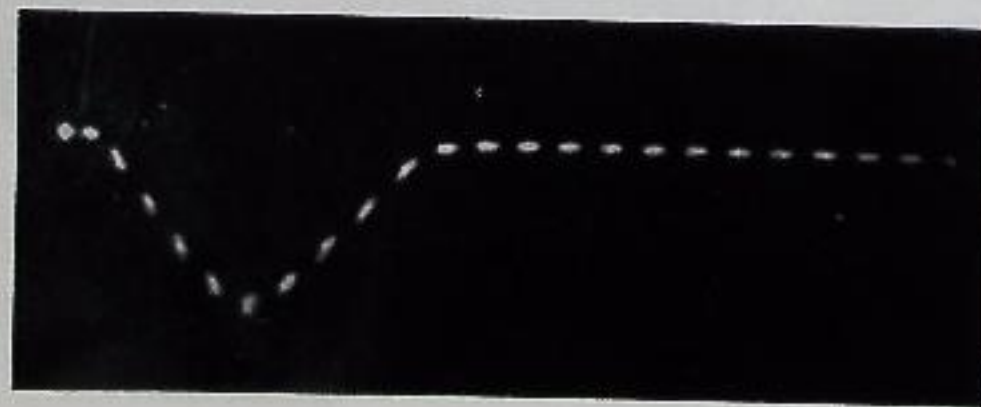


Рис. 8. Осциллограмма светового импульса СФР.  
Частота съемки  $10^6$  кадров/сек., метки времени через 0.2 мксек.

одинаковых по величине и разных по знаку. Симметрирование легко осуществляется путем регулирования этого смещающего потенциала.

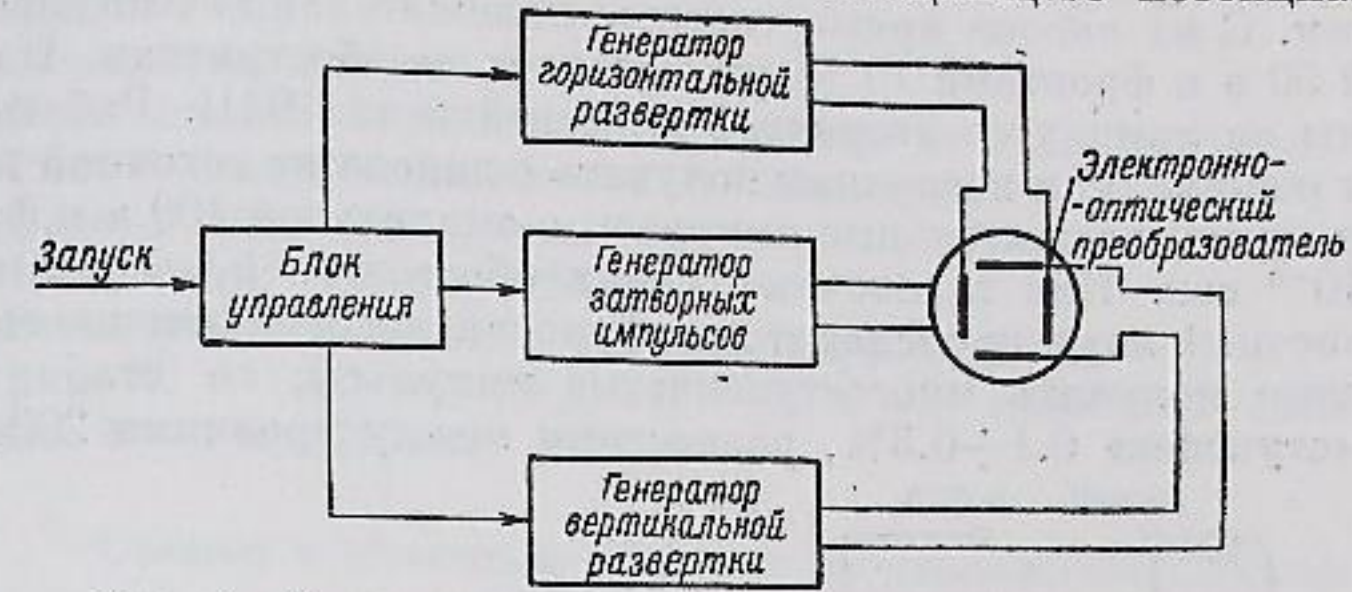


Рис. 1. Блок-схема устройства для съемки управляемыми электронно-оптическими преобразователями.

В выполненном варианте прибора как для горизонтального, так и для вертикального отклонения применены четырехступенчатые импульсы, развертывающие изображения в четыре ряда, по четыре кадра в ряду. В соответствии с этим генераторы горизонтального и вертикального отклонений совершенно одинаковы, но запускаются так, что длительность «ступенек» первого ровно в четыре раза меньше, чем второго.

Блок-схема всего устройства приведена на рис. 1. Запускаемый от исследуемого явления блок управления дает серии импульсов, определяющих частоту съемки, величины выдержки каждого кадра, временные интервалы между сериями и т. д. По сигналам блока управления происходит формирование отклоняющих и затворных импульсов.

Формирование ступенчатых импульсов происходит по схеме с общей анодной нагрузкой наподобие применяемой в развертке потенциалоскопов [1, 2]. Скелетная схема выходных каскадов и эпюры токов и напряжений приведены на рис. 2. Система обратных связей компенсирует недостаточность внутреннего сопротивления выходных ламп, так что их токи одинаковы  $-i_{a_1} = i_{a_2} = i_{a_3} = i_{a_4}$ . При равенстве сопротивлений  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  этим обеспечивается одинаковая разность уровней соседних «ступенек».

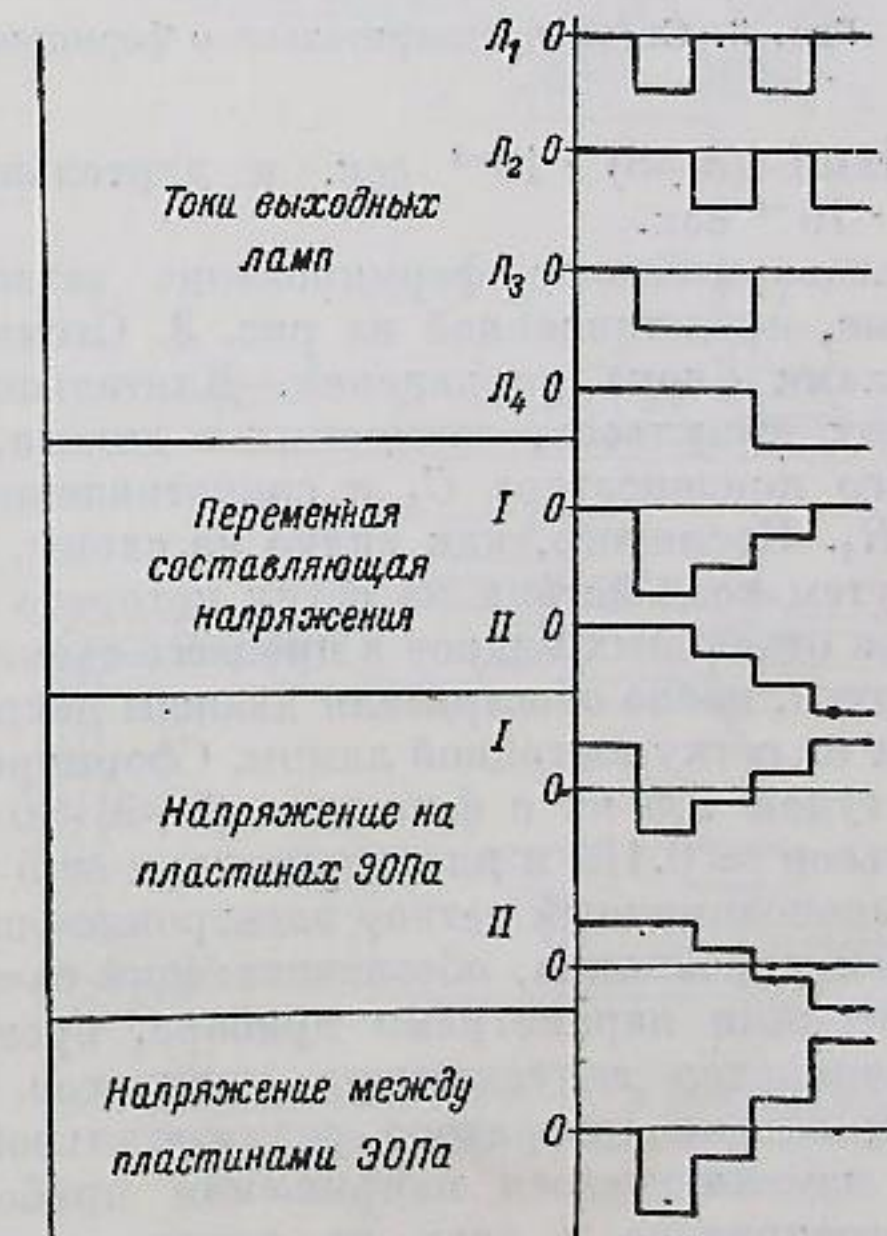
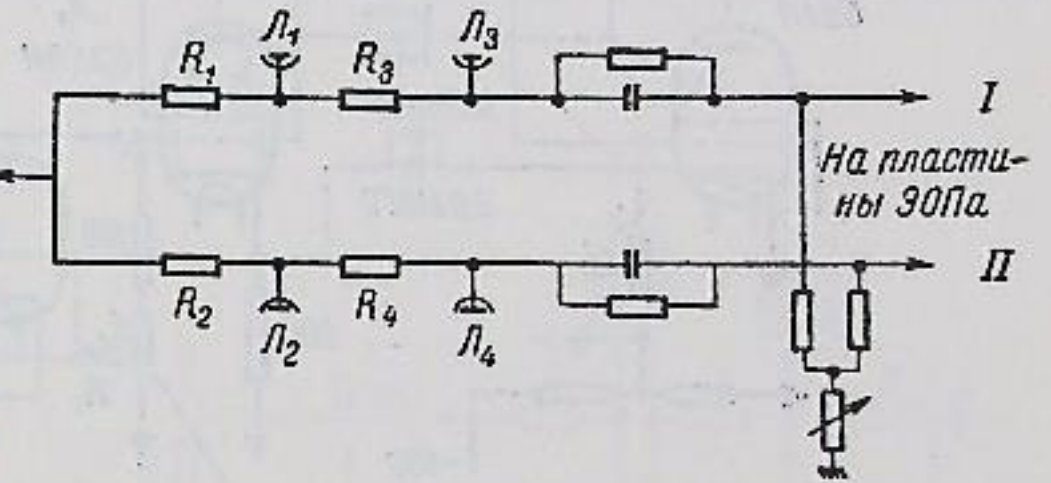


Рис. 2. Скелетная схема выходных каскадов и эпюры выходных напряжений и токов.

Предварительное формирование импульсов, возбуждающих оконечные каскады, по сигналам блока управления выполняется симметричными триггерами. С их анодов прямоугольные положительные импульсы с амплитудой 50 в и фронтами  $10^{-7}$  сек. подаются на обострители. Последние выполнены на лампах со вторичной эмиссией типа 6В1П. Работая в импульсном режиме, они позволяют получить с динода на сеточной нагрузке выходных ламп положительные импульсы с амплитудой 100 в и фронтами  $(2-3) \cdot 10^{-8}$  сек. Как в сеточных цепях обострителей, так и в цепях сеток оконечных ламп происходит демпфирование и ограничение сигналов, позволяющее получить многоступенчатые импульсы: со стабильностью уровней «ступенек»  $0.1-0.3\%$ , разностями между уровнями  $200-300$  в,

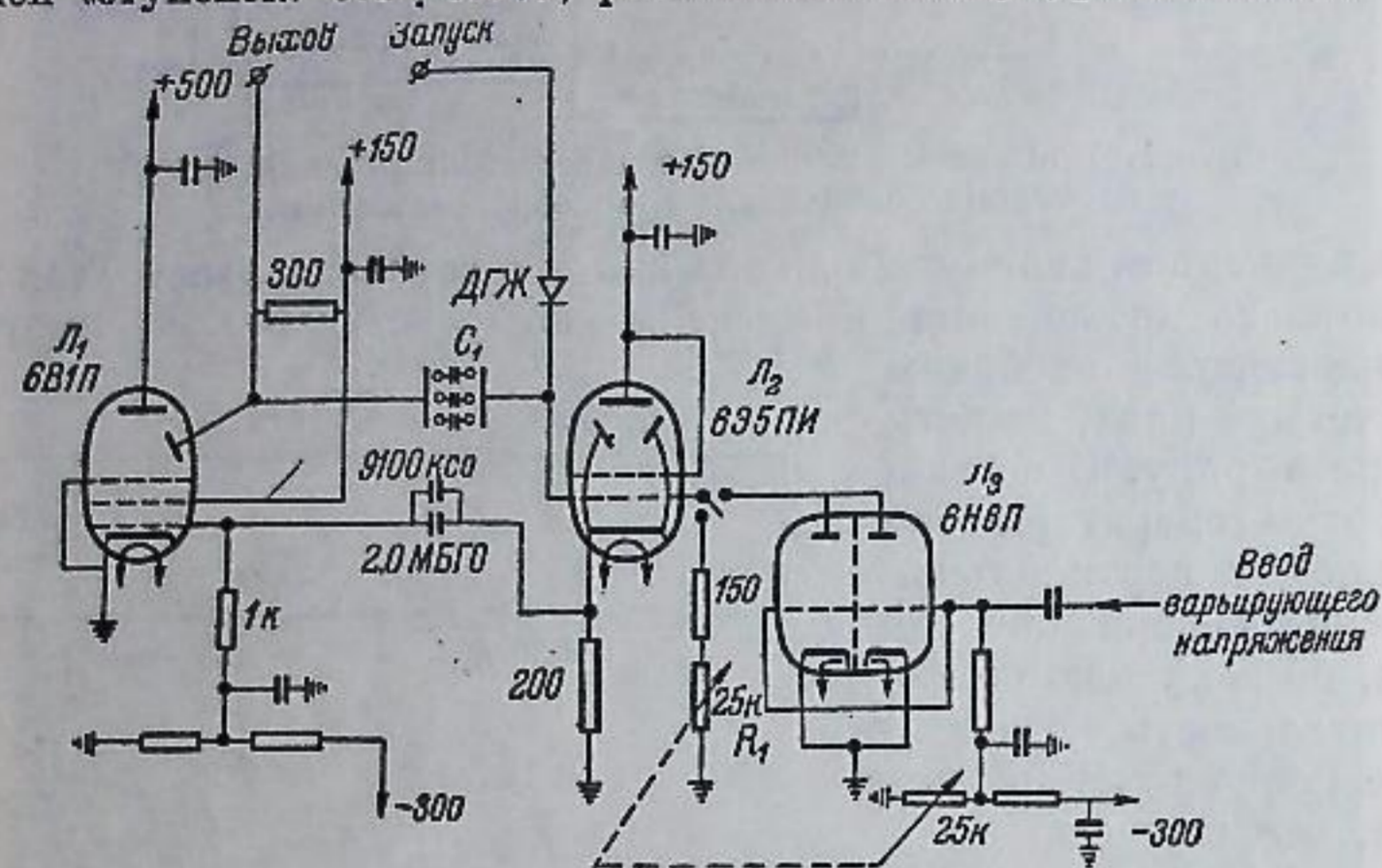


Рис. 3. Схема предварительного формирования затворных импульсов.

фронтами  $(3-5) \cdot 10^{-8}$  сек. и длительностью «ступенек» от  $2 \cdot 10^{-7}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$  сек.

Предварительное формирование затворных импульсов происходит в схеме, представленной на рис. 3. Схема запускается положительными сигналами блока управления. Длительность сформированных положительных импульсов, снимаемых с динода, определяется емкостью переходного конденсатора  $C_1$  и сопротивлением утечки катодного повторителя  $R_1$ . Последнее, как видно из схемы, может быть заменено триодом  $L_3$ , путем воздействия на сетку которого осуществляется изменение выдержки отдельных кадров в процессе съемки. Так же как и в генераторах развертки, после обострителя дважды демпфированные импульсы воздействуют на сетку выходной лампы. Сформированные отпирающие импульсы амплитудой 2.5 кв с фронтами  $(2-3) \cdot 10^{-8}$  сек., стабильностью «стола» импульсов  $\approx 0.1\%$  и длительностями от  $5 \cdot 10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  сек. подаются на компенсационный затвор электронно-оптического преобразователя.

Блок управления, обеспечивающий съемку в режимах, определенных техническими параметрами прибора, представляет собой девятиканальный генератор запускающих импульсов.

При замене генератора горизонтальной развертки генератором линейно изменяющегося напряжения прибор может работать в режиме фоторегистратора и дает на экране преобразователя четыре фоторазвертки с регулируемыми временными интервалами между ними.

Ниже приводятся основные технические данные варианта электронно-оптической съемочной камеры на преобразователе типа ПИМ-3.

1. Частота съемки от  $10^5$  до  $5 \cdot 10^6$  кадров/сек.
2. Выдержка от  $5 \cdot 10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  сек.

3. Вариация выдержки от 1-го до 16-го кадра в 20 раз.
4. Задержка начала съемки после прихода запускающего импульса от  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  сек.
5. Количество кадров в серии 4 и 8.
6. Временной интервал между сериями от 0 до  $10^{-4}$  сек.
7. Разрешающая способность 30 линий/мм.
8. Размер кадра  $5 \times 5$  мм.
9. Количество кадров 16.
10. Эквивалентное относительное отверстие 1 : 3.

На рис. 4, 5 (см. вклейку, стр. 64 и 65) показаны снимки миры, сделанные этим прибором.

### Съемка с помощью обычных электронно-оптических преобразователей

Многокадровая съемка с применением обычных электронно-оптических преобразователей осуществляется путем получения одиночных кадров на отдельных трубках. Экспонирование происходит в момент подачи на электроды преобразователя высоковольтного прямоугольного импульса напряжения. Выдержка определяется длительностью приложенного импульса. Ряд последовательных кадров получается за счет сдвига по времени прямоугольных импульсов, подаваемых на отдельные электронно-оптические преобразователи.

Применение малогабаритных электронно-оптических преобразователей с катодами малого сопротивления диаметром 30 мм и электронным увеличением 1 : 1, удовлетворительно работающих в импульсном режиме, позволяет получить кадры размером  $20 \times 20$  мм с разрешением до 25 линий/мм. Такие преобразователи позволяют создать камеру небольших размеров с высокой временной и оптической разрешающей способностью.

Схема управления камерой такого типа отличается простотой, надежностью, помехоустойчивостью и большой точностью синхронизации с исследуемым явлением.

На рис. 6 показана принципиальная (а) и конструктивная (б) схемы генератора тройных импульсов. Высоковольтные импульсы формируются на кабельной заряженной линии с тиратронным включателем. Длительность импульсов определяется длиной зарядных кабелей. Генератор срабатывает от синхронизирующего сигнала, поступающего от устройства

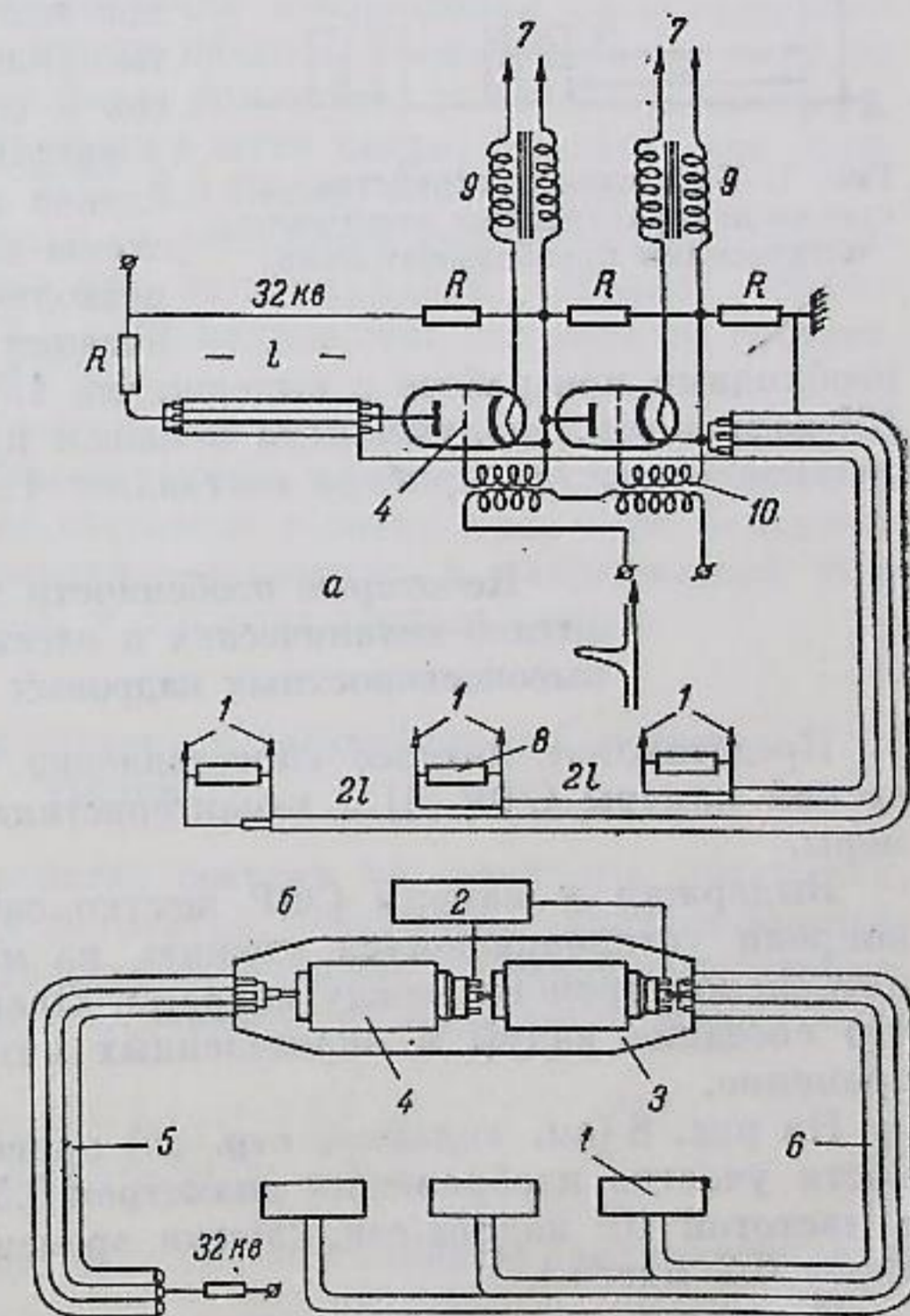


Рис. 6. Принципиальная (а) и конструктивная (б) схемы генератора тройных импульсов.

2 на импульсные трансформаторы двух последовательно включенных тиратронов 4 типа ТГИ-400/16. При этом путем разрядки кабелей 5, предварительно заряженных до 32 кв, на соединительные кабели 6 формируется прямоугольный импульс. Последний попадает на соединительные кабели разной длины, определяющей сдвиг по времени момента приложения высоковольтного импульса амплитудой 16 кв к электродам преобразователя. К концам подводящих кабелей, со стороны преобразователей, подключены сопротивления, равные волновому сопротивлению кабеля. Число высоковольтных импульсов в нашем случае определяется допустимым разрядным током тиратронов.

На рис. 7 показаны блок-схема прибора (а) и временная диаграмма высоковольтных импульсов (б). Исследуемое явление 3 экспонируется в моменты приложения прямоугольных импульсов к электронно-оптическим преобразователям 1. Использование простейших блоков запуска на тиратронах 4 и 7 и схемы задержки 5 на кабеле РКЗ-400 позволяет получить точность синхронизации  $\pm 5 \cdot 10^{-9}$  сек., что совершенно необходимо при работе с выдержками  $1.5 \cdot 10^{-8}$  сек. и частотой съемки  $10^8$  кадров/сек., полученными в нашем приборе. Эквивалентное относительное отверстие прибора составляет 1 : 2.

Рис. 7. Блок-схема устройства для съемки неуправляемыми электронно-оптическими преобразователями.

#### Некоторые особенности характеристик оптико-механических и электронно-оптических высокоскоростных кадровых съемочных камер

Представляет интерес сопоставление характеристик оптико-механической камеры СФР [3] с характеристиками электронно-оптической камеры.

Выдержки у камеры СФР жестко связаны с частотами съемки и, вопреки установившемуся мнению, не меньше, а значительно больше интервалов времени между кадрами. Практически это приводит к тому, что соседние кадры в определенных интервалах экспонируются одновременно.

На рис. 8 (см. вклейку, стр. 65) приведена осциллограмма освещенности участка изображения диаметром 0.5 мм при съемке камерой СФР с частотой  $10^6$  кадров/сек. (Метки времени на осциллограмме нанесены через 0.2 мксек.).

Как видно, кривая освещенности представляет собой равнобедренный треугольник с полной длительностью 2 мксек. Эффективное время экспонирования [4] находится из

$$\int_0^{t_1} E(t) dt = \int_{t_2}^{t_0} E(t) dt = \frac{1}{10^h} \int_0^{t_0} E(t) dt,$$

где  $E(t)$  — зависимость освещенности от времени,  $h = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{\gamma}$  — фотографическая широта материала,  $\gamma$  — коэффициент контрастности

материала,  $t_0$  — полное время светового импульса,  $t_2 - t_1 = t_{\text{эфф}}$  — эффективное время экспонирования,  $t_{\text{эфф}} = t_0 \left(1 - \sqrt{\frac{2}{10^h}}\right)$ .

Для наиболее широко используемых в скоростных камерах фотоматериалов [5] соответствующие этому случаю времена экспозиций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип пленки	Фотографическая широта (практическая), $h$	$1 - \sqrt{\frac{2}{10^h}}$	Выдержка, $t_{\text{эфф}}$	$\frac{t_{\text{эфф}}}{t_{\text{съемки}}}$
Негатив Д	2.5	0.92	$1.84 \cdot 10^{-6}$ сек.	1.84
РФ1 . . .	2	0.86	$1.72 \cdot 10^{-6}$ сек.	1.72
РФ-3 . . .	1.5	0.75	$1.5 \cdot 10^{-6}$ сек.	1.5

В камере типа СФР отдельные точки изображения экспонируются в разное время. Поэтому время между началом экспонирования первого участка изображения (по направлению развертки) и концом экспонирования последнего участка (время съемки всего кадра) составит для приведенного режима съемки 2.84, 2.72, 2.5 мксек. соответственно.

По данным завода-изготовителя разрешающая способность и эквивалентное относительное отверстие при четырехрядной вставке, обеспечивающей частоты съемки до  $2.5 \cdot 10^6$  кадров/сек. составляют соответственно  $16 \div 18$  линий/мм и 1 : 60.

Таким образом, электронно-оптические кадровые съемочные камеры, даже с самыми простыми преобразователями, превосходят существующие оптико-механические камеры по светосиле в сотни раз, а по основным показателям временного разрешения — выдержке и разрешающей способности изображения — в  $20 \div 50$  и 1.5 раза соответственно.

#### О выборе характеристик элементов электронно-оптических систем

Электронно-оптические устройства состоят из входного объектива, проецирующего изображение на фотокатод, собственно электронно-оптического преобразователя и выходного объектива, переводящего изображение с экрана на фотоматериал. Освещенность последнего может быть представлена в виде

$$E = \frac{\pi B_0 (1 - k_1) \eta (1 - k_2)}{4L_1^2 (1 + M_1)^2 m^2 4L_2^2 (1 + M_2)^2}; \quad (1)$$

где  $B_0$  — яркость объекта съемки,  $M_1$  и  $M_2$  — линейные увеличения входного и выходного объективов соответственно;  $\frac{1}{L_1}$  и  $\frac{1}{L_2}$  — их относительные отверстия,  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты потерь объективов,  $\eta$  — коэффициент усиления яркости преобразователя с увеличением, приведенным к 1 : 1,  $m$  — его линейное электронное увеличение. Для однокаскадных электронно-оптических преобразователей  $\eta = \pi \phi \gamma u$ , где  $\phi$  — чувствительность фотокатода в а/лм,  $\gamma$  — светоотдача экрана в св./вт,  $u$  — напряжение на преобразователе. По данным [6], приведенные к увеличению 1 : 1 коэффициенты усиления яркости преобразователя ПИМ-3 составляют 64 и 32 для вариантов с сурьмяно-цезиевым и кислородно-цезиевым фотокатодами соответственно.

Исходя из формулы (1), эквивалентное относительное отверстие электронно-оптической системы может быть получено в виде

$$\frac{1}{L_{\text{экр}}} = \sqrt{\frac{\eta(1-k_2)}{4L_1^2 L_2^2 (1+M_2)^2 m^2}} \quad (2)$$

Из анализа выражения (2) ясно, что светосила системы  $\frac{1}{L_{\text{экр}}^2}$  растет с уменьшением  $m$  и  $M_2$ . Правда, такому уменьшению кладет предел разрешающая способность как самого преобразователя, так и выходного объектива и фотоматериала. Однако, как видно из выражения (2), варьируя  $m$  и  $M_2$  в известных пределах, так чтобы их произведение  $M_2 m = \text{const}$ , можно, не снижая разрешающей способности системы, существенно повысить ее светосилу. При существующих в настоящее время размерах фотокатода, разрешающих способностях фотокатода, экрана, объектива и фотоматериала оптимальное значение произведения  $M_2 m$ , по-видимому,

Таблица 2

$m$	$M_2$	$(1+M_2)^2 m^2$	$\frac{1}{L_{\text{экр}}^2} / \frac{1}{L_{\text{экр}}^2 \text{ ПИМ-3}}$	Примечания
4:1	1:4	25	0.36	ПИМ-4 ПИМ-3
2:1	1:2	9	1	
1:1	1:1	4	2.25	
1:2	2:1	2.25	4	

Как видно из таблицы, электронное увеличение преобразователей ПИМ-3 и ПИМ-4 не является оптимальным.

Не менее важно и то, что с уменьшением  $m$  в  $m^2$  раз уменьшается необходимая освещенность фотокатода для той же степени почернения фотоматериала, что позволяет опуститься в область более коротких выдержек без перегрузки фотокатода, т. е. без потери разрешающей способности.

Особо следует остановиться на системах электронных затворов-преобразователей. В настоящее время наиболее широко распространены затворы компенсационного типа [6] и затворы с запирающим потенциалом. Основное преимущество первых заключается в отсутствии нарушения четкости изображения в моменты запирания и отпирания за счет длительности фронтов импульсов. Однако как раз для наиболее коротких выдержек — именно тогда, когда длительность фронтов соизмерима со временем экспонирования и, следовательно, влияет на качество изображения — это преимущество реализовано быть не может. Дело в том, что компенсация без потери четкости имеет место только при подаче на пластины затвора строго симметричных импульсов киловольтных амплитуд (из-за малой чувствительности компенсационного затвора). Получение же сколько-нибудь коротких положительных импульсов такой амплитуды с требуемой стабильностью представляет непреодолимые трудности. Расчеты и эксперименты показывают, что выдержки порядка  $5 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-7}$  сек. могут быть осуществлены только однополярными отрицательными импульсами. Как оказалось, и для более длинных выдержек лучшего качества изображения легче достичь, применяя однополярные импульсы, ибо технически много проще сильно сократить фронты отрицательных импульсов, нежели формировать высокостабильные импульсы положительной полярности. В таком применении компенсационный затвор не имеет особого преимущества перед затвором с запирающим потенциалом. В то же время за счет в десятки раз большей чувствительности последнего коренным образом упрощаются условия формирования затворных импульсов.

В заключение авторы выражают глубокую признательность доктору технических наук М. М. Бутслову и сотрудникам его лаборатории за ценную помощь, а также инженерам Ф. С. Новику, Г. Т. Баранову, Б. Н. Семенову за полезные консультации по отдельным вопросам и лаборантам В. А. Горину и Ф. Я. Николаеву, непосредственно участвовавшим в настоящей работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Н. Лаут, Л. А. Любович, Запоминающие устройства на электронно-лучевых трубках, БЭСМ АН СССР.
2. Г. П. Мельников, Л. И. Артеменков, Ю. М. Голубев, ПТЭ, № 6, стр. 67, 1957.
3. В. Б. Ликаренко, УНФ, VI, 131, 1959.
4. Л. А. Васильев, Е. А. Тарантов, УНФ, VI, 113, 1959.
5. Свойства фотографических материалов на прозрачных подложках. Гостехиздат, 1955.
6. М. М. Бутслов, УНФ, VI, 76, 1959.

равно или несколько меньше единицы.

В табл. 2 приведены результаты сравнения светосилы систем с одинаковой разрешающей способностью ( $M_2 m = 1$ ), но использующих преобразователи с разным электронным увеличением  $m$ .