1951 г. Июнь *Т. XLIV, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФОТОЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Б. П. Козырев *)

1. ВВЕДЕНИЕ

В ряде задач, например при работе с малоомными термическими индикаторами радиации — термоэлементами и болометрами, весьма остро возникает необходимость в методике измерения весьма малых эдс, порядка нескольких нановольт (10^{-9} *в*), а иногда и долей нановольта. Непосредственным образом такие значения эдс не могут быть зарегистрированы ни при помощи ламповых усилителей, ни посредством гальванометра, ибо у катодной лампы уровень шумов гораздо больше нескольких нановольт и часто близок к микровольтам, а хороший гальванометр, хотя и обладает флуктуационным порогом, даже меньшим 10^{-9} *в*, однако из-за колебаний грунта и несовершенств отсчётных приспособлений позволяет практически измерять лишь 10^{-7} *в* и в крайнем случае $3 \cdot 10^{-8}$ *в* (система Z_c). Иногда, впрочем, введение во входную цепь лампового усилителя повышающего трансформатора, с обязательным условием прерывания термотока или модуляции радиации, может значительно улучшить возможности измерения малых эдс методом катодного усиления, доводя предел измеримых эдс порой до 10^{-9} *в*[1]. Тем не менее автором[3] были показаны значительные преимущества гальванометрического способа обнаружения предельно малых эдс, основанного на применении вместо отсчётной шкалы одного или двух фотоэлементов. Подобные устройства, часто неудачно называемые слишком общим термином — фотореле, предназначены для регистрации микроперемещений тени по поверхности фотоэлемента и уже давно, начиная с 1926 г., предлагались различными исследователями (более 60 статей проанализированы в вышеуказанной работе[2]).

---

*) Статья является кратким изложением работ, за которые автору постановлением Совета Министров («Правда» от 4 марта 1950 г.) присуждена Сталинская премия. *Ред.*

При беглом рассмотрении подобной схемы регистрации малых эдс, основанной на сочетании гальванометра с фотоэлементом, всё устройство представляется чрезвычайно простым, и иногда даже указывалось[3], что фотореле можно изготовить в течение одного часа. Действительно, фотоэлектрооптические усилители (ФЭОУ), как правильнее называть такие фотореле, очень несложны (хотя, впрочем, и не могут быть изготовлены за один час) и имеют столь очевидные преимущества в чувствительности перед катодным усилением, что сначала кажется просто непонятным, почему до сих пор этот метод не получил широкого распространения, несмотря на свою более чем двадцатилетнюю давность.

Основной причиной неэффективности всех выполненных до настоящего времени работ по ФЭОУ является резкая зависимость действия схемы ФЭОУ от влияния колебаний грунта. Общеизвестна некоторая, порой весьма значительная, неустойчивость нулевого положения гальванометра, которое часто непрерывно изменяется путём монотонного сползания в одну сторону или, что ещё неприятнее, — небольшими беспорядочными бросками. Совершенно очевидна полнейшая бесцельность применения каких-либо ФЭОУ для регистрации сигнальных перемещений границы тени на сотые или тысячные доли миллиметра, если перемещения от помех, вызванные колебаниями грунта, заметны невооружённым глазом.

Только лишь защитив гальванометр от грунтовых воздействий применением амортизационного устройства, состоящего обычно из подвесной системы с пружинами или резиной[2], можно получить достаточно стабильное положение нулевого отсчёта гальванометра. Однако при этом большею частью вся установка ФЭОУ приобретает обычно чрезвычайно громоздкий, слишком лабораторный и совершенно не портативный вид. Эксперименты автора, производимые на протяжении ряда лет с ФЭОУ различных конструкций и со всевозможными амортизаторами, привели к заключению о том, что обычные гальванометры с подвижной рамкой, монтированной на ленточном или проволочном подвесе, не могут дать хорошего эффекта и, в лучшем случае, пригодны для реализации громоздкого длиннопериодного устройства с недостаточно устойчивым нулём и, следовательно, не очень чувствительного. С полной очевидностью выяснилось, что только лишь гальванометр, имеющий хорошо отбалансированную рамку на растяжках, может быть применён для эффективного ФЭОУ, и что только после разработки специальных гальванометрических конструкций можно создать фотоэлектрооптический усилитель, имеющий хорошие параметры и технически завершённое оформление. Решающее значение в этой работе автора по ФЭОУ имело введение принципа переуспокоения входного гальванометра и отказ от работы на критическом режиме.

2. ПРИНЦИП ПЕРЕУСПОКОЕНИЯ ВХОДНОГО КОРОТКОПЕРИОДНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА СХЕМЫ ФЭОУ И ОСВОБОЖДЕНИЕ ОТ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА

Из гальванометрии известно, что угол θ поворота подвижной рамки связан с безразмерной переменной τ следующим уравнением:

$$\frac{d^2\theta}{d\tau^2} + 2\alpha\frac{d\theta}{d\tau} + \theta = A\cdot\sin(\varkappa\tau + \delta), \tag{1}$$

где

$$\varkappa = \frac{\omega_1}{\omega_0} \quad \text{и} \quad \tau = \omega_0 t = \frac{2\pi}{t_0}\cdot t,$$

причём ω_0 и ω_1 представляют, соответственно, круговые частоты собственных колебаний рамки и переменного тока, текущего по ней, и α — коэффициент демпфирования; величина A пропорциональна амплитудному значению тока рамки. Решения уравнения (1) при различных значениях α имеют вид:

$$\theta = \frac{A}{N}\cdot\sin(\varkappa\tau + \delta + \chi) + \begin{cases} c\cdot e^{-\alpha\tau}\cdot\operatorname{sh}(\beta\tau + \varphi) & \alpha > 1, \\ (a + b\tau)\cdot e^{-\tau} & \alpha = 1, \\ c\cdot e^{-\alpha\tau}\cdot\sin(\varepsilon\tau + \varphi) & \alpha < 1, \end{cases} \tag{2}$$

где

$$\varepsilon = \sqrt{1-\alpha^2}; \quad \beta = \sqrt{\alpha^2 - 1}$$

и постоянные c, φ, a, b определяются по начальным данным.

Так как экспоненциальный член, входящий в полученные выражения, быстро затухает, то можно утверждать, что при достаточном t амплитудное значение вынужденных колебаний рамки в N раз меньше величины A, причём резонансный фактор

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{\sqrt{(1-\varkappa^2)^2 + 4\alpha^2\varkappa^2}}.$$

Иной результат получается при воздействии на подвижную систему гальванометра не переменных токов, а колебаний грунта. Полагая смещение грунта гармонически изменяющимся в функции от τ:

$$x = f(\tau) = C_0\cdot\sin(\varkappa\tau + \delta),$$

получаем для ускорения, характеризующего возмущающую силу, выражение:

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = C_0\cdot\varkappa^2\cdot\sin(\varkappa\tau + \delta),$$

после чего основное уравнение для этого случая будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + 2\alpha\frac{d\varphi}{d\tau} + \varphi = C\cdot\varkappa^2\cdot\sin(\varkappa\tau + \delta),$$

т. е. будет отличаться от уравнения (1) наличием множителя $\varkappa^2$ в правой части. Поэтому резонансный фактор теперь будет равен

$$\frac{1}{N'} = \frac{\varkappa^2}{N} = \frac{\varkappa^2}{\sqrt{(1-\varkappa^2)^2 + 4\alpha^2\varkappa^2}}.$$

На рис. 1 изображены зависимости величин $\frac{1}{N}$ и $\frac{\varkappa^2}{N}$ в функции от значений $\varkappa$, т. е. дана графическая интерпретация поведения рамки гальванометра при воздействии на неё переменного тока или грунтовых колебаний различных частот, причём различные кривые соответствуют различным коэффициентам демпфирования. Рис. 1, *а* иллюстрирует известную способность гальванометра передавать в неискажённом виде только низкочастотные колебания ($\varkappa \ll 1$) и показывает резкий «завал» амплитудных значений при повышенных $\varkappa$ (в особенности если при этом $\alpha \gg 1$). Бóльший интерес представляет рис. 1, *б*, являющийся зеркальным отражением рис. 1, *а* относительно значения $\varkappa = 1$ и указывающий на отсутствие отклонений рамки по отношению к корпусу гальванометра (грунту) при малых значениях $\varkappa$ и на столь же почти малые отклонения при больших $\varkappa$, если только при этом будет $\alpha \gg 1$. Таким образом, рамка не будет заметным образом смещаться по отношению к корпусу гальванометра ни при низких ($\varkappa < 1$), ни при повышенных ($\varkappa > 1$) относительных частотах колебаний грунта, если эта рамка будет сильно передемпфирована ($\alpha \gg 1$), «переуспокоена». Только при весьма больших значениях $\varkappa$ увеличение коэффициента демпфирования не даёт никакого эффекта и рамка не успевает следовать за колебаниями корпуса гальванометра ($N' \approx 1$), т. е. даёт смещения. Однако в обычных условиях работы такие крайние компоненты в спектре частот колебаний грунта почти не бывают представлены.

Как видим, кривые рис. 1, *б* и вышеприведённое рассуждение открывают новый и простой метод стабилизации нулевого положения входного гальванометра ФЭОУ путём отказа от классических рекомендаций критического режима ($\alpha = 1$) и перехода к переуспокоению, т. е. к $\alpha \gg 1$. Основными аргументами в защиту критического режима являются стремления получить наивысшую возможную для данного гальванометра вольтовую чувствительность и наименьшую затрату времени на установку отсчёта, причём в уточнённом рассмотрении оказывается, что наиболее быстрый отсчёт получается при $\alpha = 0{,}83$ с некоторой потерей в чувствительности (10% по отношению к критическому режиму).

Если теперь обратиться к случаю $\alpha > 1$, т. е. воспользоваться соответствующей формой уравнения (2) и задаться обычными начальными данными:

$$\theta = 0 \text{ при } \tau = 0,$$

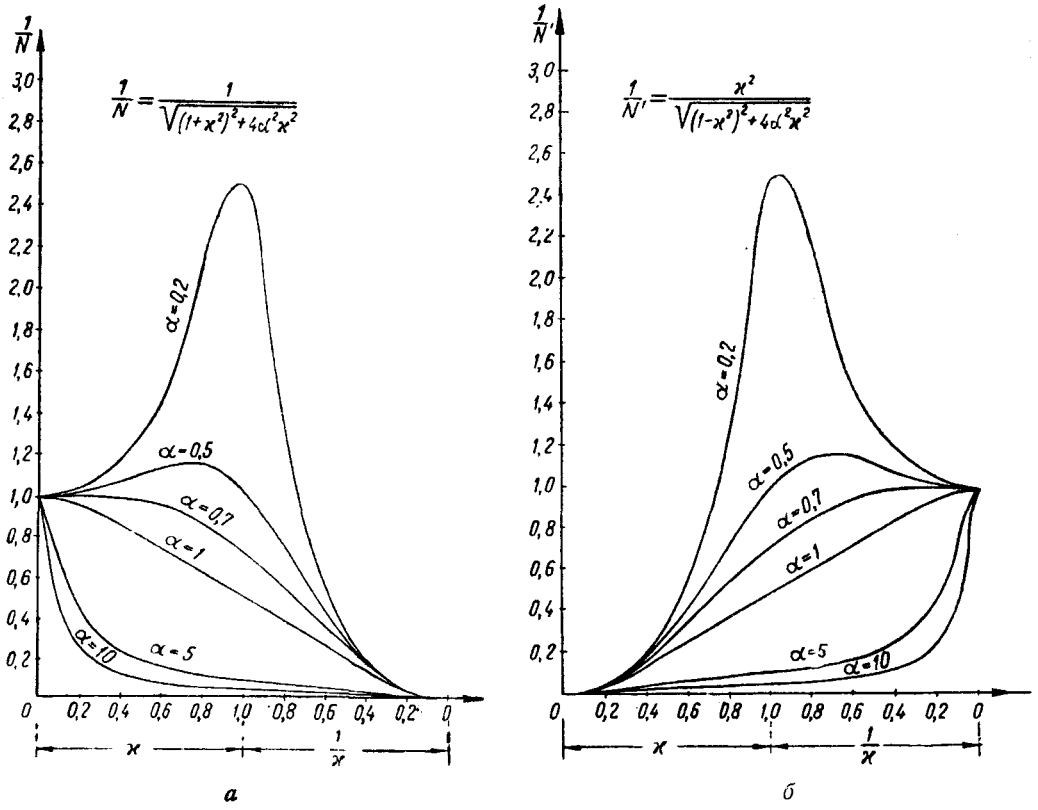


Рис. 11. Зависимость резонансного фактора от отношения круговых частот $\varkappa$ при воздействиях тока (*а*) и колебаний грунта (*б*).

то после преобразований получим:

$$\theta = \theta_\infty \left[1 - \frac{e^{-\alpha\tau}}{\beta} \cdot \operatorname{sh}(\beta\tau + \mu) \right], \tag{3}$$

где

$$\operatorname{th}\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \quad \text{и} \quad \operatorname{sh}\mu = \sqrt{\alpha^2 - 1} = \beta.$$

Полагая точность установки отсчёта равной, например, 1%, т. е. считая

$$\frac{\theta}{\theta_\infty} = 0{,}99,$$

имеем

$$e^{-\alpha\tau} \cdot \operatorname{sh}(\beta\tau + \mu) = 0{,}01\,\beta$$

или

$$e^{\mu - (\alpha - \beta)\tau} - e^{-[\mu + (\alpha + \beta)\tau]} = 0{,}02\,\beta. \tag{4}$$

Точное вычисление τ из трансцендентного уравнения (4) невозможно, приближённое же значение удаётся получить, обратив внимание на то, что при $\alpha \gg 1$ всегда будет:

$$e^{\mu - (\alpha - \beta)\tau} \gg e^{-[\mu + (\alpha + \beta)\tau]},$$

ибо

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - 1} \approx \alpha$$

и так как

$$\operatorname{th}\mu = \frac{\beta}{\alpha} \approx 1,$$

то

$$\mu \gg 1.$$

Если ещё учесть, что $\tau = \omega_0 t = \frac{2\pi}{t_0} \cdot t$ для короткопериодного гальванометра уже при небольших t тоже будет значительно превышать 1, то вместо уравнения (4) можно написать

$$e^{\mu - (\alpha - \beta)\tau} = 0{,}02\,\beta,$$

откуда

$$\tau = \frac{\mu - \ln 0{,}02\,\beta}{\alpha - \beta} = \frac{2\pi}{t_0} \cdot t$$

или

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{2\pi} \, \frac{\mu - \ln 0{,}02\,\beta}{\alpha - \beta}. \tag{5}$$

Полученное соотношение указывает, во сколько раз время установки отсчёта с точностью до 1% превышает период свободных колебаний.

Из известного условия для критического режима работы гальванометра с заданной подвижной рамкой

$$\frac{(HnS)^2}{2 R_к \cdot 10^9 \sqrt{KD}} = 1, \tag{6}$$

где n — число витков, S — площадь и K — момент инерции рамки, D — удельный противодействующий момент, H — напряжённость магнитного поля и $R_к$ — критическое сопротивление цепи гальванометра, очевидно, что переуспокоенное состояние можно получить тремя методами: увеличивая H, уменьшая D и уменьшая $R_к$. Считая, что для короткопериодной системы гальванометра напряжение магнитного поля H уже имеет предельную, доступную на практике величину, вследствие чего дальнейшее его повышение невозможно, и, кроме того, отказываясь от уменьшения D из-за нежелания ухудшить баллистические свойства подвижной системы и жёсткость растяжек, столь необходимую для прецизионной балансировки, остаётся признать приемлемым лишь последний путь для переуспокоения гальванометра — снижение сопротивления R гальванометрической цепи.

Так как коэффициент демпфирования α связан с конструктивными данными гальванометра соотношением

$$\alpha = \frac{(HnS)^2}{2R \cdot 10^9 \sqrt{KD}},$$

то, помня равенство (6), получаем

$$R = \frac{R_к}{\alpha},$$

т. е. для перехода от критического режима к состоянию с коэффициентом $\alpha > 1$ необходимо уменьшить сопротивление гальванометрической цепи в α раз. Для различных значений α, т. е. для разных состояний переуспокоения, можно из уравнения (5) вычислить отношения $\frac{t}{t_0}$. Полагая точности установки отсчёта равными 1%, 5% и 10%, из соответствующих приближённых уравнений, аналогичных (5), были вычислены значения $\frac{t}{t_0}$, представленные в табл. 1.

Таблица 1

	$\frac{\theta}{\theta_\infty} = 0{,}99$			$\frac{\theta}{\theta_\infty} = 0{,}95$			$\frac{\theta}{\theta_\infty} = 0{,}90$		
α	3	5	10	3	5	10	3	5	10
$\frac{t}{t_0}$	4,3	7,3	14,7	2,9	4,75	9,6	2,2	3,65	7,3
$C = \frac{\frac{t}{t_0}}{\alpha}$	1,43	1,47	1,47	0,965	0,95	0,96	0,73	0,73	0,73

Из рассмотрения данных табл. 1 можно сделать очень ориентировочное, но полезное на практике заключение о том, что время установки отсчёта с точностью до 5% превышает период t_0 примерно во столько раз, во сколько сопротивление всей цепи меньше критического $R_к$. Это положение сразу же объясняет, почему обычно игнорируется переуспокоенный режим работы гальванометра — причиной этого является неизбежная для обычных гальванометров медленность действия. Действительно, если, например, взять гальванометр МЗГ, имеющий $t_0 = 11$ сек. $\left(R_g = 6\ ом;\ R_{к\ внешн.} = 6\,ом;\ S_{v\ кр} = 4\ \frac{мм}{м \cdot мкв}\right)$ и переуспокоить его примерно вдвое, замкнув на 1 *ом*, то время $t_{0,95}$ установки отсчёта с точностью до 5% будет равно около 22 сек., т. е. слишком велико. Вообще большинство современных чувствительных гальванометров имеет рамку на подвесе, а не на растяжках, и обладает слишком большим периодом свободных колебаний и, как уже выше было отмечено, колеблющимся нулевым положением. Совершенно очевидно, что практическое использование принципа переуспокоения для защиты рамки гальванометра от воздействия грунтовых помех возможно лишь для достаточно короткопериодных конструкций, у которых после α-кратного уменьшения сопротивления цепи по отношению к $R_к$ время установки отсчёта (5%) αt_0 будет не слишком велико. Так как подобные системы гальванометров, пригодные для рассмотренных в дальнейшем фотоэлектрооптических установок, почти не существуют, то автором была проведена специальная разработка короткопериодных, высокочувствительных и весьма устойчивых гальванометров, обеспечивших в ФЭОУ достижение высокой эффективности.

Хотя, как известно, при укорочении периода t_0 флуктуационный порог возрастает, однако он всё ещё оказывается значительно меньшим тех помех, которые свойственны катодной лампе, и неизбежного теплового шума в сопротивлении нагрузки сеточной цепи. Если взять, например, $R = 10^5$ *ом*, $\Delta f = 5$ *гц*, то даже для такого сравнительно узкополосного усилителя получаем:

$$U_{фл.} = \sqrt{4KTR\Delta f} = 1,3 \cdot 10^{-10} \sqrt{R\Delta f} \approx 1 \cdot 10^{-7} \text{ вольта.}$$

По формуле же Изинга[4]

$$I_{фл.} = \frac{1,12 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{\alpha t_0 R}} \text{ ампера}$$

или

$$U_{фл.} = I_{фл.} \cdot R = 1,12 \cdot 10^{-10} \sqrt{\frac{R}{\alpha t_0}},$$

после чего при $R = R_t + R_g = 4 + 1{,}4 = 5{,}4$ *ома*

$$R_к = 10{,}4 \text{ ома}; \; t_0 = 0{,}13 \text{ сек}; \text{ и } \alpha = \frac{10{,}4}{5{,}4} \approx 2$$

получаем

$$U_{фл.} = 1{,}12 \cdot 10^{-10} \sqrt{\frac{5{,}4}{2 \cdot 0{,}15}} = 4{,}7 \cdot 10^{-10} \text{ вольта.}$$

Целесообразно обратить внимание на то, что вследствие уменьшения сопротивления цепи гальванометра при его переуспокоении и удлинении времени, затрачиваемого на отсчёт, флуктуационный порог напряжений уменьшается в α раз по сравнению с $U_{фл.}$, соответствующим этому же гальванометру, но работающему в критическом режиме.

Имеется, однако, один существенный недостаток в развитом выше методе защиты схемы ФЭОУ от грунтовых помех посредством переуспокоения входного гальванометра: трудность варьирования сопротивления индикатора радиации (термоэлемент, болометр), питающего этот гальванометр; замена одного термоэлемента другим, обладающим иным сопротивлением, будет сопровождаться изменением степени переуспокоения, а значит, и времени установки отсчёта. Переход, например, на очень малоомный термоэлемент может чрезвычайно замедлить действие всего устройства. Для устранения этого дефекта может быть предложен, не реализованный, впрочем, в изложенных ниже экспериментах, но обычно применяемый для данной цели, способ магнитного шунта; совершенно очевидно, что при работе с разными термоэлементами для удержания неизменными коэффициента демпфирования и времени установки отсчёта необходимо будет изменять $R_к$ с помощью магнитного шунта таким образом, чтобы отношение $\frac{R_к}{R_t + R_g}$ во всех случаях оставалось неизменным и равным выбранному значению α.

3. РАСЧЁТ ТОРСИОННОГО И ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО ФОТОЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Несмотря на то, что, как уже было указано выше, существует более шестидесяти работ, относящихся специально к исследованию и применению различных схем фотоэлектрооптических усилителей, полный анализ этих схем и достаточно точный расчёт были произведены впервые автором[2], подавляющее же большинство вышеуказанных исследований содержит обычно описание какой-либо экспериментальной установки и полученных на ней результатов. Такой эмпирический подход к ФЭОУ не раскрывал отчётливой картины влияния отдельных факторов и давал эффекты, определяемые параметрами случайных деталей, из которых состоял ФЭОУ.

С оптической точки зрения необходимо различать два основных типа ФЭОУ:

1) торсионный, основанный на микроперемещении границы тени по поверхности фотоэлемента под влиянием поворота зеркальца, отражающего световой поток на фотоэлемент (*ФЭ*) и

2) трансверсальный, основанный на вариации светового потока, направленного на фотоэлемент пересечением этого потока каким-нибудь подвижным органом, например стрелкой гальванометра.

На рис. 2 схематически изображено основное расположение деталей, характерное для торсионного ФЭОУ. Конденсор *К* про-

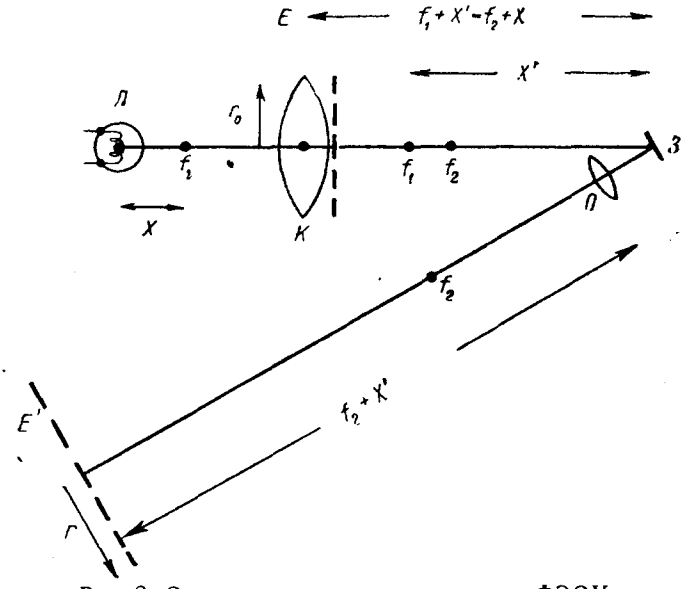


Рис. 2. Оптическая схема торсионного ФЭОУ.

ектирует на зеркальце *З* гальванометра изображение тела накала лампы *Л*; объектив *О* даёт изображение решетчатой диафрагмы конденсора на поверхности фотоэлемента. Так как перед фотоэлементом установлена неподвижная решётка, геометрически совершенно такая же, как и изображение решётки конденсора, но смещённая таким образом, чтобы границы перехода от света к тени приходились в места прорезей в этой решётке, то при малейшем повороте зеркала *З*, и следовательно, смещениях границы свет — тень, ток в цепи фотоэлемента будет изменяться.

Если считать, что конденсором и объективом являются тонкие просветлённые линзы, не вызывающие потерь светового потока,

и если силу света лампы считать равной I, то освещённость поверхности фотоэлемента будет равна:

$$E_1' = E_1 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = \frac{I_1 \cdot 10^4}{(X+f_1)^2} \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = \frac{I_1 \cdot 10^4}{f_1^2(1+\beta_к)^2} \cdot \left(\frac{\beta_к}{\beta_0}\right)^2, \quad (7)$$

ибо

$$f_1 + X = f_1\left(1 + \frac{X}{f_1}\right) = f_1\left(1 + \frac{1}{\beta_к}\right) = \frac{f_1}{\beta_к}(1+\beta_к),$$

$$\frac{r_0}{r} = \frac{1}{\beta_0},$$

где $\beta_к$ и β_0 — линейные увеличения, даваемые соответственно конденсором и объективом.

Если вариацию силы тока в цепи входного гальванометра $Г_I$, зеркальце которого приводит в действие ФЭОУ, обозначить через Δi_1, а изменение силы тока в цепи фотоэлемента, в которую включён второй (выходной) гальванометр $Г_{II}$, считать равной Δi_2, то можно написать:

$$\Delta i_2 = \mu_1 \cdot \Delta F_1 = \mu_1 \cdot 10^{-4} \cdot E_1' \cdot L_1 \cdot \Delta x_1, \quad (8)$$

где μ_1 — чувствительность фотоэлемента в $\frac{a}{лм}$, ΔF_1 — изменение светового потока, падающего на фотоэлемент, вызванное смещением изображения решётки конденсора; L_1 — общая длина всех участков границы свет — тень на поверхности (общая длина активных отверстий решётки); Δx_1 — смещение изображения решётки конденсора по поверхности фотоэлемента, выраженное в *см*.

Обозначив чувствительности $Г_I$ и $Г_{II}$ соответственно через S_{i1} и S_{i2} и полагая их, как общепринято, выраженными в $\frac{мм}{м \cdot мка}$, можем написать:

$$\Delta x_1 = \frac{S_{i1} \cdot 10^5 \cdot \Delta i_1}{\frac{100}{l_1}} = \frac{S_{i1} \cdot 10^5 \cdot \Delta i_1}{K_1}, \quad (9)$$

где l_1 есть расстояние от зеркала $Г_I$ до фотоэлемента в схеме ФЭОУ, т. е., согласно рис. 2, $l_1 = f_2 + x'$.

После этого из соотношений (7), (8), (9) получаем

$$\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} = 10^5 \frac{I_1 \mu_1 L_1}{f_1^2(1+\beta_к)^3} \cdot \left(\frac{\beta_к}{\beta_0}\right)^3 \cdot \frac{S_{i1}}{K_1}. \quad (10)$$

Но так как

$$f_2 + x' = \beta_0(f_1 + X') = \beta_0\left(f_1 + \frac{f_1^2}{X}\right) = \beta_0 \cdot f_1(1+\beta_к),$$

то вместо (10) имеем

$$\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} = 10^3 \frac{I_1 \cdot \mu_1 \cdot L_1 \cdot S_{i1}}{f_1(1+\beta_к)} \cdot \frac{\beta_к^2}{\beta_0}. \quad (11)$$

Последняя формула указывает на целесообразность применения короткофокусного конденсора (малое f_1) и получения от него возможно большего линейного увеличения $\beta_к$; впрочем, из-за малых обычно размеров зеркала Γ_I последним обстоятельством пользоваться не удаётся, так как очень увеличенное изображение тела накала лампы (рис. 2) не разместить на площади этого зеркала.

В том случае, когда на практике известна освещённость фотоэлемента E_1', более удобной является формула, выводимая из равенств (8) и (9) и очевидная, кроме того, непосредственно из рис. 2:

$$\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} = 10 \cdot \mu_1 \cdot E_1' \cdot L_1 \cdot \frac{S_{i1}}{K_1}. \tag{12}$$

Обычно, в действительности, из-за малых размеров зеркала Γ_I и геометрических соображений приходится брать $\beta_к = 1$ и $\beta_0 = 1$. Тогда

$$l_1 = f_2 + x' = \beta_0 \cdot f_1 (1 + \beta_к) = 2 f_1$$

и соотношение (11) получает вид:

$$\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} = 10^3 \frac{\mu_1 \cdot I_1 L_1 S_{i1}}{2 f_1}. \tag{13}$$

Вместо сравнений вариаций сил токов Δi_2 и Δi_1 можно сопоставлять между собою соответствующие линейные отклонения ΔD_2 и ΔD_1 по шкалам гальванометров Γ_{II} и Γ_I, приведённые к одному расстоянию, помня, что

$$\Delta D_2 = \frac{S_{i2} \cdot 10^5 \cdot \Delta i_2}{K_2}; \quad \Delta D_1 = \frac{S_{i1} \cdot 10^5 \cdot \Delta i_1}{K_2}.$$

Тогда согласно (13) и (12)

$$\begin{aligned} \frac{\Delta D_2}{\Delta D_1} &= 10^3 \frac{\mu_1 \cdot I_1 L_1 \cdot S_{i1}}{2 f_1}, \\ \frac{\Delta D_2}{\Delta D_1} &= 10 \cdot \mu_1 \cdot E_1' \cdot L_1 \cdot \frac{S_{i2}}{K_1}. \end{aligned} \tag{14}$$

Схема поперечного или трансверсального ФЭОУ в общих чертах изображена на рис. 3: накалённая нить диаметра $2\rho_0$ (перпендикулярная к чертежу) проектируется конденсором K на ту плоскость, в которой помещён подвижной экранирующий индекс $Э$ гальванометра Γ_I, в свою очередь спроектированный объективом O на фотоэлемент $ФЭ$. Если опять считать, что освещённость E_1' фотоэлемента известна из опыта (хотя она может быть и вычислена), то аналогично предшествующему получаем:

$$\Delta i_2 = \mu_1 \cdot \Delta F_1 = \mu_1 \cdot 10^{-4} \cdot E_1' \cdot 2 r_1 \frac{S_{i1} \cdot 10^5 \cdot \Delta i_1}{K_1} =$$

$$= 10 \mu_1 E_1' \cdot 2 r_1 \frac{S_{i1}}{K_1} \cdot \Delta i_1,$$

откуда

$$\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} = 10\,\mu_1 E_1' 2\,r_1 \cdot \frac{S_{i1}}{K_1}, \quad \frac{\Delta D_2}{\Delta D_1} = 10\,\mu_1 E_1' \cdot 2\,r_1 \cdot \frac{S_{i2}}{K_1}. \tag{15}$$

Так как обычно $L_1 \gg 2\,r_1$, где $2\,r_1$ обозначает диаметр фотоэлемента, то торсионное ФЭОУ при прочих равных условиях эффективнее трансверсального.

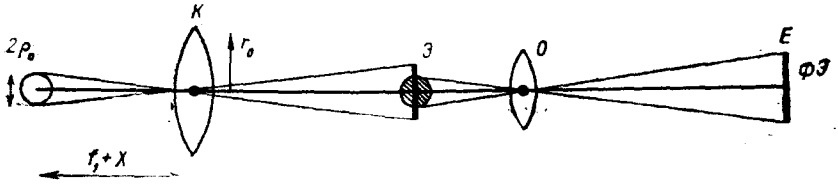


Рис. 3. Оптическая схема трансверсального ФЭОУ.

Совершенно очевидно, что могут представиться целесообразными схемы двух- и трёхкаскадного ФЭОУ, т. е. такие устройства, в которых световой указатель Γ_{II} в виде изображения растра падает не на шкалу, а на второй фотоэлемент, затем указатель Γ_{III} на третий фотоэлемент и т. д.

Формулы для коэффициента усиления $\frac{\Delta i_3}{\Delta i_1}$ по току и линейного коэффициента усиления $\frac{\Delta D_3}{\Delta D_1}$ для двухкаскадного ФЭОУ могут быть написаны, исходя из (12), (13), (14) и (15), следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\Delta i_3}{\Delta i_1} &= 10^2\,\mu_1\mu_2 E_1' E_2' L_1' L_2' \frac{S_{i1}S_{i2}}{K_1K_2}; \\
\frac{\Delta i_3}{\Delta i_1} &= 10^6\,\frac{\mu_1\mu_2 \cdot I_1 I_2 L_1 L_2 S_{i1} S_{i2}}{4\,f_1^2}; \\
\frac{\Delta i_3}{\Delta i_1} &= 10^2\,\mu_1\mu_2 E_1' E_2' 2r_1 2\,r_2 \frac{S_{i1}S_{i2}}{K_1K_2}; \\
\frac{\Delta D_3}{\Delta D_1} &= 10^2\,\mu_1\mu_2 E_1' E_2' L_1 L_2 \frac{S_{i2}S_{i3}}{K_1K_2}; \\
\frac{\Delta D_3}{\Delta D_1} &= 10^6\,\frac{\mu_1\mu_2 \cdot I_1 I_2 \cdot L_1 L_2 \cdot S_{i2} \cdot S_{i3}}{4\,f_1^2}; \\
\frac{\Delta D_3}{\Delta D_1} &= 10^2\,\mu_1\mu_2 E_1' E_2' 2\,r_1 2\,r_2 \frac{S_{i2}S_{i3}}{K_1K_2}.
\end{aligned}\right\} \tag{16}$$

Для трёхкаскадного ФЭОУ, после введения упрощающей транскрипции, формулы принимают следующий вид:

Торсионный тип:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{\Delta i_4}{\Delta i_1} &= 10^3 \prod_{m=1}^{m=3} \mu_m E'_m \cdot L_m \frac{S_{im}}{K_m}; \\
\frac{\Delta i_4}{\Delta i_1} &= 10^9 \prod_{m=1}^{m=3} \frac{\mu_m I_m \cdot L_m S_{im}}{8 f_1^3}; \\
\frac{\Delta D_4}{\Delta D_1} &= 10^3 \prod_{m=1}^{m=3} \mu_m E'_m L_m \frac{S_{i2} S_{i3} S_{i4}}{K_m}; \\
\frac{\Delta D_4}{\Delta D_1} &= 10^9 \prod_{m=1}^{m=3} \frac{\mu_m I_m L_m S_{i2} S_{i3} S_{i4}}{8 f_1^3}. \\
&\text{Трансверсальный тип:} \\
\frac{\Delta i_4}{\Delta i_1} &= 10^3 \prod_{m=1}^{m=3} \mu_m E'_m 2 r_m \frac{S_{im}}{K_m}; \\
\frac{\Delta D_4}{\Delta D_1} &= 10^3 \prod_{m=1}^{m=3} \mu_m E'_m 2 r_m \frac{S_{i2} S_{i3} S_{i4}}{K_m}.
\end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

Совершенно ясно, что совокупность формул (16) и (17) позволяет в самых разнообразных случаях производить оценку степени эффективности ФЭОУ, исходя из очевидного положения о том, что отношения $\frac{\Delta D_2}{\Delta D_1}$, $\frac{\Delta D_3}{\Delta D_1}$ и т. д., т. е. линейные увеличения, должны всегда значительно превышать единицу; величины усилений по току $\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1}$, $\frac{\Delta i_3}{\Delta i_1}$ и т. д., вообще говоря, тоже должны быть больше единицы, однако в многокаскадном ФЭОУ в первом каскаде может быть и отступление от этого правила и допустимо иногда $\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} < 1$, если только следующие каскады компенсируют потерю на усилении по току в первой ступени. Можно, например, взять очень быстрый малоомный и сравнительно грубый гальванометр Γ_{I}, имеющий малое S_{i1} и поэтому приводящий к $\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} < 1$, однако вводящий нас в сравнительно высокоомную фотоэлементную цепь первого каскада, в которую можно будет включить высокоомный Γ_{II}, имеющий большую чувствительность к току и, следовательно, дающий значительное отклонение.

4. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАСЧЁТ ГАЛЬВАНОМЕТРОВ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Гальванометр является основным элементом схемы ФЭОУ, определяющим чувствительность и быстроту работы всего аппарата. Как уже было указано вначале, наиболее целесообразной конструкцией гальванометра для ФЭОУ представляется система с вращающейся рамкой, монтированной на жёстких коротких растяжках, допускающая хорошую балансировку и имеющая твёрдое нулевое положение. Кроме того, из развитого выше принципа работы ФЭОУ при переуспокоении рамки, естественно, вытекает необходимость короткопериодности гальванометра, чтобы время установки отсчёта при многократном переуспокоении не было чрезмерно большим. Для того чтобы короткопериодный гальванометр на жёстких растяжках имел не слишком малую чувствительность, в данной работе, в отличие от обычных правил, применялись повышенные значения напряжённости магнитного поля, доходящие до $H = 4000 - 5000$ эрстед. Как известно, очень сильные магнитные поля предъявляют исключительные требования к чистоте и отсутствию магнитных примесей в материалах, входящих в состав рамки, причём до некоторой степени положение в этом отношении облегчается применением радиального магнитного поля при введении сердечника внутрь рамки. Кроме того, большие магнитные поля, увеличивая чувствительность, обусловливают при этом значительные величины критических сопротивлений $R_к$ гальванометра, ибо чувствительность пропорциональна H, а сопротивление $R_к$ пропорционально квадрату H.

Однако обычные возражения против больших H из-за боязни магнитных примесей актуальны лишь при работе с очень малыми противодействующими моментами D, характерными для конструкций с рамкой на подвесе, а не на растяжках. Весьма существенно отметить, что все системы гальванометров, применённых автором в ФЭОУ, имели необычно большие D_1, не меньшие $10 \frac{дин \cdot см}{радиан}$ и иногда доходящие до $29 \frac{дин \cdot см}{радиан}$, между тем как в системе гальванометра Z_c фирмы Киппа $D = 0{,}003$, а в микрогальванометре Молля $D = 0{,}18 \frac{дин \cdot см}{радиан}$. Переход на резко повышенные значения D освобождал от каких-нибудь особенных мероприятий по очистке проволоки рамки от возможных магнитных примесей и давал необходимую для принципа переуспокоения короткопериодность и ценную для высокочувствительного ФЭОУ устойчивость нуля по отношению к грунтовым помехам.

Для расчёта наиболее важных на практике параметров гальванометрических систем, необходимых для ФЭОУ, достаточно взять

из теории[3] следующие обычные формулы:

Период свободных колебаний: $t_0 = 2\pi\sqrt{\frac{K}{D}}$.

Момент инерции рамки с зеркалом:

$$K = (1+\xi)\frac{n}{2}\cdot\pi\cdot r^2\delta l'(2l)^2\left(1+\frac{2l}{3l'}\right).$$

Момент сил противодействующих растяжек в $\frac{\text{дин}\cdot\text{см}}{\text{радиан}}$:

$$D = \frac{N\pi\rho^4}{2l_0} \text{ (проволока) или } D = \frac{Nab^3}{3l_0} \text{ (лента).} \quad (18)$$

Условие начала периодичности:

$$(HnS)^2 = 2R_к\cdot 10^9\sqrt{KD}.$$

Чувствительность к току $\left(\text{в } \frac{\text{мм}}{\text{м}\cdot\text{мка}}\right)$:

$$S_i = 2\cdot 10^{-4}\frac{HnS}{D}.$$

Основными конструктивными данными, которыми можно распоряжаться при осуществлении гальванометра, являются K, D, H и после выбора их значений можно по вышеприведённым формулам вычислить t_0, $R_к$ и S_i. Так как, кроме того, при изготовлении гальванометра важно знать соотношение между R_n (сопротивление n витков рамки) и $R_к$, представляемое как $\lambda = \frac{R_к}{R_n}$, то после введения в формулы величины λ и отношения $\beta = \frac{2l}{l'}$ получаем полезные при проектировании соотношения:

$$R_к = \lambda\cdot R_n = \lambda\cdot n\cdot\rho_0\frac{2l'(1+\beta)}{\pi r^2},$$

$$KR_к = (nS)^2\delta\rho_0\lambda(1+\xi)(1+\beta)\left(1+\frac{\beta}{3}\right), \quad (19)$$

$$H^2 = \frac{4\pi\delta\rho_0\lambda(1+\beta)\left(1+\frac{\beta}{3}\right)(1+\xi)\cdot 10^9}{t_0}.$$

Впрочем, в действительности величину H варьировать почти не приходится и необходимо просто брать наибольшее достижимое для выбранного сплава (магнико, альнико) и данной конструкции радиального поля и магнитопровода значение H. Кроме того, чаще всего при расчёте удобнее за исходные величины брать требуемые схемой ФЭОУ значения S_i, t_0 $R_к$, λ и по ним для выбранного H определять из формул (18) D, K, nS и окончательно конкретизировать конструкцию рамки и растяжек. Между прочим, особое внимание приходится уделять выбору зеркала, которое не может быть в данном случае малым (диаметр не меньше 7 *мм*), ибо почти во всех системах ФЭОУ оказывается необходи-

мым на это зеркало проектировать изображение тела накала источника, и потеря светового потока при слишком малых размерах зеркала была бы неизбежна.

В табл. II приведены основные конструктивные данные и параметры гальванометров, применяемых в описанных в дальнейшем однокаскадном ФЭОУ-9 и двухкаскадном ФЭОУ-10.

Таблица II

Параметр	Единица измерения	ФЭОУ-9				ФЭОУ-10			
		Γ_I		Γ_{II}		Γ_I		Γ_{II} и Γ_{III}	
		выч.	эксп.	выч.	эксп.	выч.	эксп.	выч.	эксп.
$2l$	*мм*		9		9		4		4
l'	*мм*		23		23		16		16
$2r$	μ		200		30		200		50
n	витков		50		6000		50		550
l_0	*мм*		7		30		3,5		14 и 20
D	$\frac{дин \cdot см}{радиан}$	19,2		16		18,5		29	
K	$г \cdot см^2$	0,23		0,62		0,029		0,02	
t_0	сек.	0,68	0,65	1,25	1,45	0,25	0,25	0,16	0,14
R_n	*ом*		2,1		8550		1,3		161
$R_к$	*ом*		64		328500		17		1460
H	эрстед	4800		3700		4900		3800	
S_l	$\frac{мм}{м \cdot мка}$	5,4	3,4	570	590	1,7	1,15	9,1	7,7

Для всех гальванометров, указанных в табл. II, принято $\xi = 0{,}5$, т. е. дополнительный момент инерции, обусловленный зеркалом, балансировочным крестом и пропитывающим рамку лаком, предположен равным 50% от момента инерции витков рамки; все магниты отлиты из сплава магнико; растяжки всех Γ_I взяты из бериллиевой бронзы шириной 0,15 *мм* и толщиной 15 μ ($D_1 = 6{,}8$), а растяжки всех Γ_{II} и Γ_{III} — из фосфористой бронзы диаметром 50 μ $\left(D_1 = 24 \frac{дин \cdot см}{радиан}\right)$; зеркала у Γ_I и Γ_{II} в ФЭОУ-9 круглые диаметром 10 *мм* и толщиной 0,3 *мм*, а зеркала всех гальванометров ФЭОУ-10 имеют размеры 5×7×0,3 *мм*. Гальванометры ФЭОУ-9 имеют двойной металлический

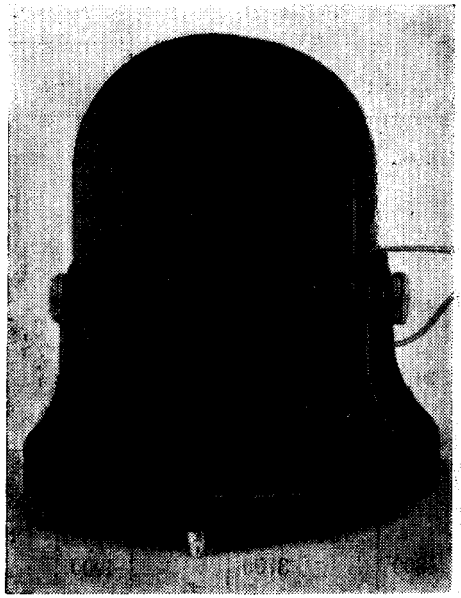
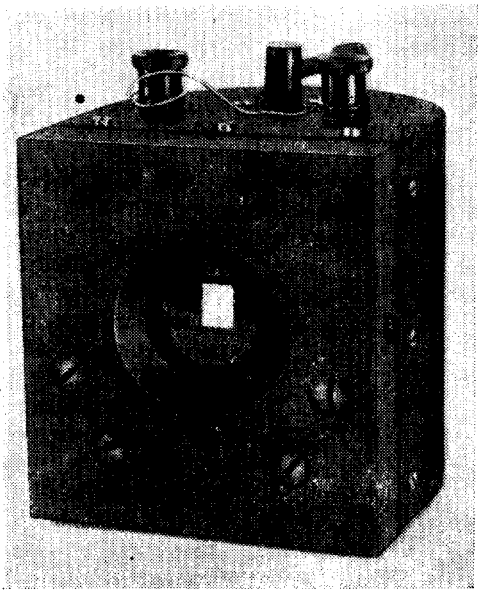


Рис. 4. Выходной гальванометр от ФЭОУ-9.



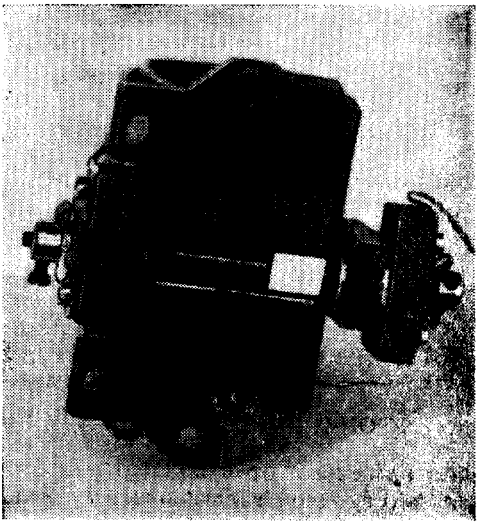


Рис. 5. Гальванометр от ФЭОУ-10.

корпус, между стенками которого проложен слой ваты для тепловой изоляции (защита от термоэдс).

На рис. 4 и рис. 5 приведены фотографии гальванометров от ФЭОУ-9 и ФЭОУ-10.

5. ОДНОКАСКАДНЫЙ И ДВУХКАСКАДНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ ФЭОУ-9 и ФЭОУ-10

Хорошей иллюстрацией формул (12), (13) и (14) для торсионного однокаскадного фотоэлектрооптического усилителя может служить разработанная автором в 1948 г. и размноженная в 1949 г. система аппарата, названного ФЭОУ-9 и схематически изображённого на рис. 6. Для уменьшения влияния колебаний силы тока, питающего лампу, применён двухлучевой оптический канал, в который введены растры с целью повышения чувствительности. Конденсор и объектив сравнительно длиннофокусны ($f_1 \approx 20$ *см*, $f_0 \approx 40$ *см*) и подобраны таким образом, чтобы благодаря соблюдению условия $f_0 = 2f_1$ и двукратному прохождению объективной линзы лучами, идущими к фотоэлементу, расстояния от $Г_I$ до фотоэлементов и проектируемых решёток были одинаковы и равны расстоянию источника света до этих решёток, т. е. $2f_1$. Фотоэлементы в ФЭОУ-9 были взяты с внешним фотоэффектом ЦГ-1 и включены в плечи мостовой схемы, два других плеча которой составлены из коксовых сопротивлений по 3 *Мом* и включённого между ними регулируемого сопротивления 5 *Мом* для настройки всей схемы и управления гальванометром $Г_{II}$, контролирующим равновесие моста, питаемого от сухой батареи 300 *в*. Амортизатор отсутствовал, ибо входной гальванометр $Г_I$ был переуспокоен, и весь аппарат, защищённый силуминовым кожухом, крепился непосредственно на стене. На рис. 7 приведены фотографии каркаса, на котором были смонтированы основные детали ФЭОУ-9;

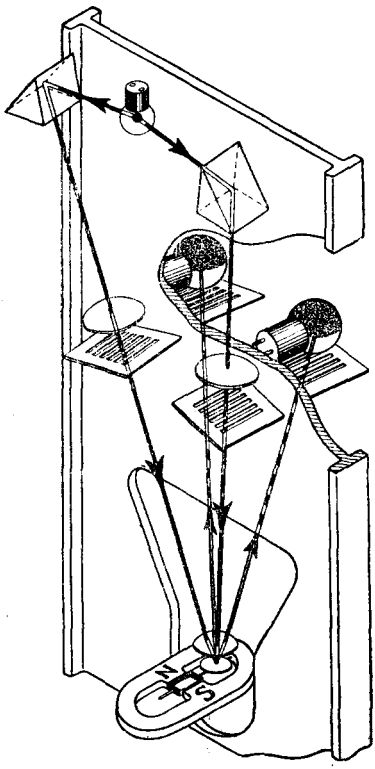
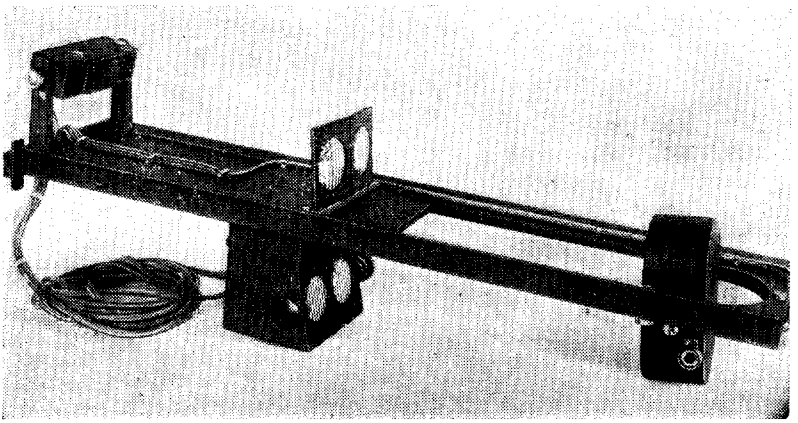
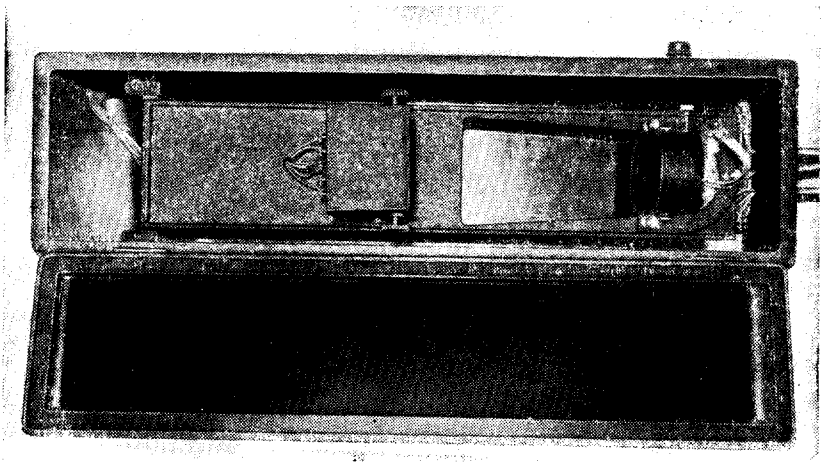


Рис. 6. Схема ФЭОУ-9.

осветитель с лампами и двумя призмами, два конденсора с двумя решётками, гальванометр $Г_I$ с проектирующим объективом, камера с двумя фотоэлементами ЦГ-1 и двумя решётками. Выход-



а



б

Рис. 7. *а* — каркас ФЭОУ-9; *б* — общий вид ФЭОУ-9.

ной гальванометр $Г_{II}$ мог быть расположен где угодно, а панель управления схемой помещалась на корпусе, укрепляемом на стене и содержащем вышеупомянутый каркас с деталями. ФЭОУ-9

не содержит катодных ламп и непосредственно развивает достаточно необходимое усиление.

Так как лампа имела $I=10$ свечей (6*в*; 1,5 *а*), то $E_1' \approx E_2' = 60$ люкс; при $\mu = 2\cdot 10^{-4}\frac{a}{мм}$ и $L_1 = 25$ *см* по формуле (12) или (13) для $S_{i1} = 3{,}4$ (см. табл. II) получаем:

$$\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} \approx 4{,}5.$$

Как видим, усиление по току оказывается очень малым, но усиленный ток Δi_2 течёт в очень высокоомной цепи фотоэлементов, в которую можно включить весьма чувствительный к току гальванометр Γ_{II} и получить в итоге большое линейное усиление, согласно формулам (14):

$$\frac{\Delta D_2}{\Delta D_1} = 10\cdot 2\cdot 10^{-4}\cdot 60\cdot 25\cdot \frac{590}{\frac{100}{40}} \approx 700.$$

Таким образом, если предположить, что в цепь Γ_I включён радиационный термоэлемент, имеющий сопротивление 4 *ом* и

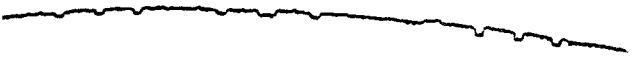


Рис. 8. ФЭОУ-9. Сигналы $1{,}25\cdot 10^{-9}$ *в*; $1{,}7\cdot 10^{-9}$ *в*; $2{,}5\cdot 10^{-9}$ *в*.

чувствительность $\varepsilon' = 1\ \frac{в}{вт}$, то при падении на него лучистой мощности $\Phi = 4\cdot 10^{-9}$ *вт* в цепи Γ_I появится ток $\Delta i_1 = \frac{4\cdot 10^{-9}}{6} \approx 6\cdot 10^{-10}$ *а*, преобразуемый в $\Delta i_2 = 6\cdot 10^{-10}\cdot 4{,}5 \approx 2{,}7\cdot 10^{-9}$ *а*, легко измеряемый гальванометром Γ_{II} (см. табл. II). Впрочем, в действительности расчёт будет значительно сложнее[2] из-за процессов в мостовой схеме, которые обусловят некоторую депрессию отклонения по шкале Γ_{II}.

На рис. 8 приведена осциллограмма, иллюстрирующая точное соблюдение пропорциональности и величину чувствительности к малым эдс в приборе ФЭОУ-9. Независимость от посторонних термоэдс при испытаниях достигалась тем, что Γ_I замыкался на бифилярно навитую катушку из красной меди, имевшую сопротивление 4 *ом* и включённую в схему двойного потенциометра. Как видно из рис. 8, ФЭОУ-9 позволяет свободно измерять столь малую эдс, как $2\cdot 10^{-9}$ *в*, ибо на осциллограмме вполне различимы три сигнала, получаемые от появления в цепи Γ_I эдс $1{,}25\cdot 10^{-9}$ *в*. На рис. 9 изображена спектрограмма, полученная Н. Г. Ярославским в лаборатории акад. А. Н. Теренина в ГОИ с ФЭОУ-9 и инфракрасным зеркальным монохроматором ИСП-14[11] в области

около 7 μ, иллюстрирующая вращательные уровни в молекулах H_2O (линии поглощения водяным паром, содержащимся в воздухе).

Однако ФЭОУ-9 сравнительно медлителен в действии из-за резкого переуспокоения гальванометра $Г_I$ и на весь цикл нарастания и спадания тока, т. е. на измерение одной точки на спектральной кривой, требуется не менее 18 сек. Так как обычно считается необходимым при промере всего спектра от 0,7 до 15 μ измерить 300 точек, то на весь этот цикл потребуется 1,5 часа; на практике скорость вращения призмы и барабана с фотобумагой устанавливалась (с некоторым запасом) равной даже 2,5 часа. Хотя этот интервал времени не является чрезмерно большим, а, наоборот, довольно обычен и, например, в приборе фирмы

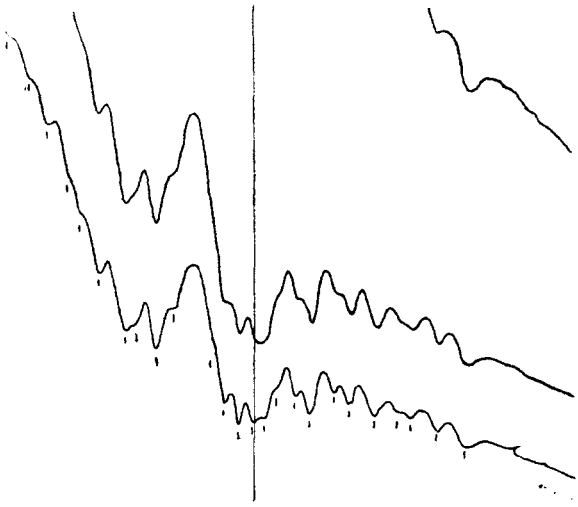


Рис. 9. ФЭОУ-9 и монохроматор ИСП-14. Линии поглощения парами H_2O вблизи 6,2 μ.

Перкин-Эльмер имеется подобная же скорость записи, всё же представлялось весьма целесообразным по возможности сократить время записи спектрограммы, что и было автором достигнуто в 1949 г. после разработки двухкаскадного ФЭОУ-10.

В системе ФЭОУ-10, схематически изображённой на рис. 10, следует особо отметить при сравнении с ФЭОУ-9 переход на короткофокусную оптику ($f_1 = 6$ *см*; $f_0 = 12$ *см*) и применение сернисто-серебряных фотоэлементов[10] с запирающим слоем (ФЭСС-10), обладающих большим μ порядка $2 \cdot 10^{-3} \frac{a}{лм}$ при сопротивлении нагрузки около 300 *ом*. Опыт показал, что эти фотоэлементы дают устойчивую работу в ФЭОУ только при

не слишком больших освещённостях, и поэтому обычно бралось $E'_1 \approx E'_2 \approx 100$ люкс. Так как рабочий диаметр конденсора и фотоэлемента был равен 3,5 *см*, то при семи щелях в растре первого каскада имеем $L_1 = 20$ *см* и при четырёх щелях в растре второго каскада имеем $L_2 = 12$ *см*, после чего, пользуясь данными для Γ_{I}, Γ_{II} и Γ_{III} из табл. II, по формуле (16) получим $\left(\text{помня, что } K_1 = K_2 = \frac{100}{2f_0} = 8\right)$

$$\frac{\Delta i_3}{\Delta i_1} = 10^2 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 100^2 \cdot 20 \cdot 12 \cdot \frac{1,15 \cdot 7,7}{8^3} = 132,$$

$$\frac{\Delta D_3}{\Delta D_1} = 880.$$

Если считать, что попрежнему радиационный термоэлемент, включённый в цепь Γ_1, имеет $R_t = 4$ *ом* и $\varepsilon' = 1 \frac{в}{вт}$, то при

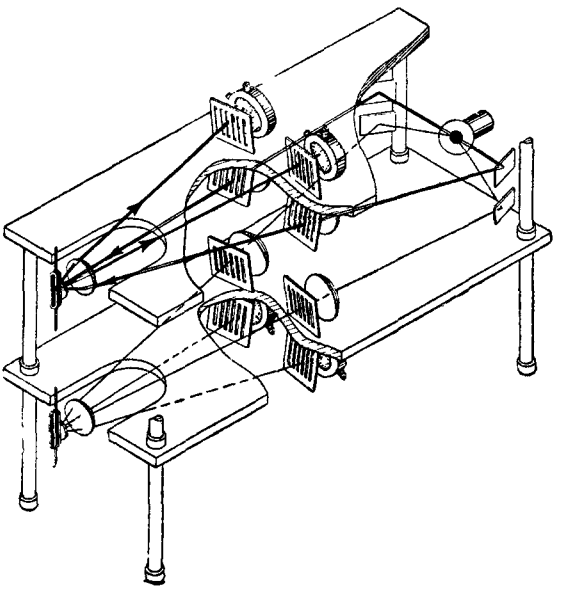
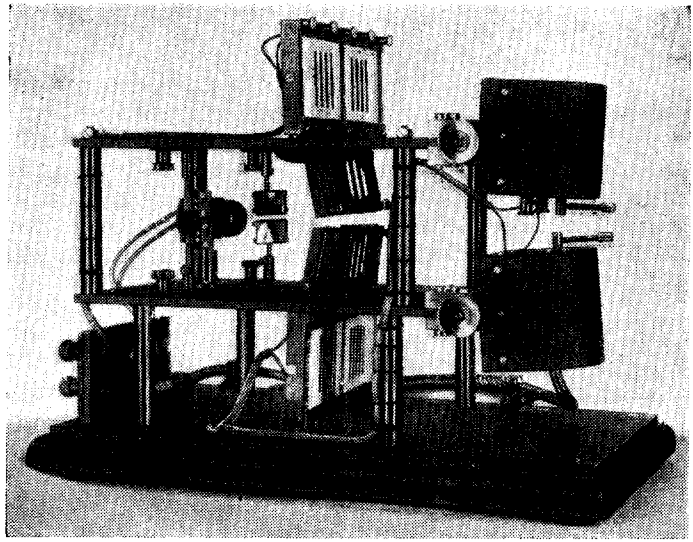
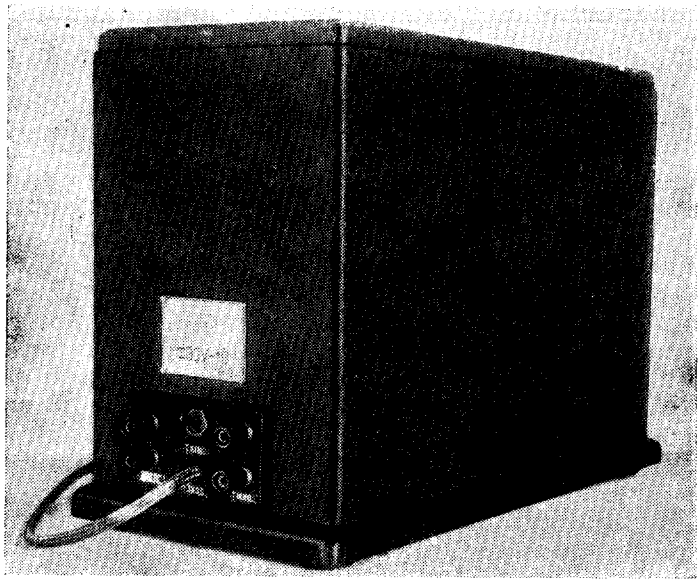


Рис. 10. Схема ФЭОУ-10.

падении на термоэлемент лучистой мощности $\Phi = 4 \cdot 10^{-9}$ *вт* получим $\Delta i_1 = \frac{4 \cdot 10^{-9}}{1,3 + 4} = 7,5 \cdot 10^{-10}$ *а*, после чего $\Delta i_3 = 7,5 \cdot 10^{-10} \cdot 132 = 1 \cdot 10^{-7}$ *а*. Так как чувствительность Γ_{III} (см. табл. II) равна $S_i = 7,7$, то рассматриваемая схема ФЭОУ-10 вполне может регистрировать столь малые лучистые мощности, как $4 \cdot 10^{-9}$ *вт*.



а



б

Рис. 11. Внутренний (*а*) и внешний (*б*) вид ФЭОУ-10.

Как видно из рис. 11, ФЭОУ-10, несмотря на наличие двух каскадов фотоэлектрооптического усиления, гораздо компактнее ФЭОУ-9 и представляет собой переносный прибор (350 × 185 × × 285 *мм*), работающий непосредственно на столе, а не на кронштейне или стене, как ФЭОУ-9. Существенным преимуществом ФЭОУ-10 представляется также отсутствие необходимости наличия батареи 300 *в*, питающей в ФЭОУ-9 фотоэлементный мост.

Однако главным достоинством системы ФЭОУ-10 является его значительная быстрота действия, иллюстрируемая кривыми рис. 12, подтверждающими вместе с тем и строгую пропорциональность отклонений в зоне весьма малых эдс. На подъём и спад тока

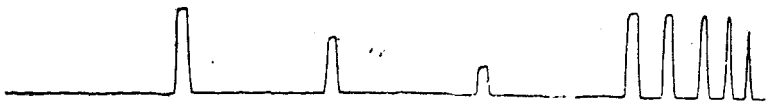


Рис. 12. ФЭОУ-10. Сигналы $2{,}5\cdot10^{-8}-7{,}5\cdot10^{-8}$ *в*; скорость бумаги $1\ \frac{мм}{сек}$

в цепи $Г_I$ теперь необходимо не более 3 сек., т. е. 300 точек спектрограммы могут быть засняты за 15 минут; эта скорость записи превосходит быстроту работы всей аппаратуры, изготовляемой различными фирмами, и уступает лишь данным двух литературных указаний[5, 6].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеуказанные результаты, полученные автором в итоге длительной работы по варьированию принципа фотоэлектрооптического усиления и специфического исследования гальванометрических систем, не являются предельными. Из формулы (17) для трёхкаскадного ФЭОУ совершенно очевидно, что, добавив третий каскад, можно употребить ещё более быстродействующие гальванометры без ущерба для чувствительности всей установки, и подобное исследование в настоящее время производится. Следует отметить, что в последние годы в радиационной метрике преобладают ложные, по мнению автора, тенденции к развитию методов прерывания тока или модулирования светового потока[7, 8, 9], представляющих собой лишь громоздкий чисто радиотехнический приём усиления, совершенно не нужный для существа процесса регистрации радиации. Рассекание модулятором измеряемого светового потока на отдельные импульсы возможно лишь при весьма малоинерционном индикаторе и обычно производится с частотой, не большей 10—20 *гц*, причём для фиксации наличия какого-

нибудь значения светового потока, очевидно, необходимо осуществить несколько импульсов (прерываний), т. е. общая длительность времени, затраченного на промер, будет значительно больше 0,1 сек. и обычно доходит до 1 сек. и более. Поэтому вариации светового потока в выходной щели из-за поворота призмы монохроматора, совершающиеся за интервалы времени 0,1 сек., не могут различаться с помощью этих модуляционных методов, ибо последние базируются на искусственном синусоидальном изменении светового потока с такой же примерно частотой.

Разработанный автором способ одно- и многокаскадного фотоэлектрооптического усиления свободен от всякого вмешательства в процесс изменения измеряемого светового потока, основан на применении гальванометра, имеющего, как известно, весьма малый флуктуационный порог, и благодаря принципу переуспокоения и многокаскадности открывает исключительные перспективы для экспрессной радиационной метрики и уже в данный момент показал превосходные результаты.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Aiken and Welz, Electronics, 124 (1947).
2. Козырев Б. П., Регистрация предельно малых радиаций термическими индикаторами. Докт. дисс. (1948).
3. Стронг Д., Техника физического эксперимента. Гостехиздат, 318 (1948).
4. Ising, Ann. d. Phys. 5, 911 (1931).
5. Daly and Sutherland, Proc. Phys. Soc. **59**, 77 (1947).
6. Backer and Robb, RSI 14, 356 (1943).
7. Liston, Quinn, Sargeant, Scott, RSI **17**, 194 (1946).
8. Roes, RSI **16**, 172 (1945).
9. Clark Jones, JOSA **39**, 344 (1949).
10. Косенко и Миселюк, ЖТФ **18**, 1369 (1948).
11. Неуймин Г. Г., Оптико-механич. пром., № 1, 15 (1947).