

4194647
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

Канд. техн. наук КУЛАГИН С. В.

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОТО- И
КИНОПРИБОРОВ

Диссертация написана на русском языке
(Специальность 05.11.07 — оптические приборы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Лазарев Л. П.,
доктор технических наук, профессор Афанасьев В. А.,
доктор технических наук, профессор Дубовик А. С.

Ведущее предприятие:
завод «Арсенал» им. В. И. ЛЕНИНА.

Автореферат разослан 1973 г.

Защита диссертации состоится 1973 г.
на заседании М. ф-та
МВТУ им. Н. Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в Училище.

Отзывы (рекомендации) от организации, проводящей аттестацию, по форме 005, 2-я часть, в МВТУ им. Н. Э. Бауманской ф-ты.

Ученый секретарь
к. т. н., доцент О. Д.

М194647

Фото- и киноприборы находят самое широкое применение в практической деятельности человека. Как и во всех отраслях промышленности, в фото-и киноприборостроении одной из тенденций его развития является проблема автоматизации основных операций по управлению прибором с целью повышения его эксплуатационных показателей. В современных фото- и киноаппаратах осуществляется автоматизация таких операций, как установка экспозиционных параметров (выдержки и диафрагмы), автоматический учёт величины светочувствительности фотоматериала и частоты съёмки, фокусировка объектива и др. Однако, до сего времени теория расчёта и проектирования устройств, являющихся составными частями данного прибора и обеспечивающих автоматизацию указанных выше операций, ещё полностью не разработана.

Одновременно с усовершенствованием конструкций фото- и киноприборов должны проводиться исследовательские работы по повышению точности действия как всего прибора в целом, так и составных его частей.

В течение своей 20-летней деятельности автор занимался разработкой теории расчёта и проектирования основных узлов фото-и киноприборов. На основе результатов этой работы им опубликовано свыше 20 научных трудов (книг, статей и отчётов). В реферируемой диссертации обобщены результаты научной деятельности автора в области разработки теории и методов расчёта и проектирования фото- и киноприборов.

Так как в монографии "Проектирование фото- и киноприборов", выпущенной издательством "Машиностроение" в 1971г., подробно изложены отдельные теоретические исследования, то при написании диссертации автор счёл возможным эти исследования не проводить, а сослаться на указанную книгу. В связи с этим монографию "Проектирование фото- и киноприборов" следует считать органической составной частью диссертации.

Основные задачи, решению которых посвящена диссертация, можно сформулировать следующим образом:

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана I



1194647

Купагин С.В. Расчет и про

M 194647

1. Обобщение разнообразных материалов, опубликованных в технической и периодической литературе по методике расчёта и проектирования фото- и киноприборов.

2. Разработка теории расчёта основных узлов и механизмов фото- и киноприборов, таких как: экспонометрические устройства, механизмы для фокусировки объективов, лентопротяжные механизмы и устройства для учёта величины светочувствительности фотоматериала.

3. Разработка методики оценки точности действия фото- и киноприборов.

4. Разработка способов повышения точности действия всего прибора в целом путём уменьшения погрешностей его составных частей.

5. Анализ и оценка эксплуатационных характеристик некоторых узлов и механизмов фото- и киноприборов.

Перейдем к изложению содержания диссертации. Объектив является одной из важнейших составных частей фото- и киноприбора. Выбор конкретного объектива при проектировании какого-либо прибора должен производиться с учётом его характеристик. В работе подробно рассмотрены основные характеристики фото- и кинообъективов, которые подразделены на три группы: конструктивные (оптические и механические), световые (фотометрические) и качественные, служащие для оценки качества изображения, образуемого объективом, по его резкости (контрасту) и разрешению.

Определены понятия о глубине резкости съёмочного и проекционного объективов и получены выражения для их определения.

Основное внимание в разделе, посвященном фото- и кинообъективам, уделено методике расчёта и оценке способов фокусировки объективов. Определены понятия о "фотографической бесконечности" ∞ ; и наименьшем расстоянии фокусировки f_{min} ; приведены выражения для их определения.

Проанализированы два способа исходной установки объективов, не имеющих механизмов для их фокусировки (так называемых "жестковстроенных" объективов). Такие объективы фокусируются или на гиперфокальное расстояние, или на "бесконечность". Показано, что предпочтительнее фокусировать "жестковстроенные" объективы на гиперфокальное расстояние.

Методика расчёта и оценки точности основных способов фокусировки до настоящего времени не разработана полностью. В работе предлагается производить оценку точности каждого способа фокусировки на основе определения величины $\Delta x'$, т.е. возможного остаточного несоответствия изображения плоскости наводки $P_{\text{нав}}$ с плоскостью фотослоя, получающегося при каждом способе фокусировки. В результате наличия ошибки $\Delta x'$ объектив оказывается как бы сфокусированным на другую плоскость Q , отстоящую от плоскости наводки $P_{\text{нав}}$ на расстоянии Δx .

Оценку точности фокусировки предлагается производить по величине показателя точности фокусирующего устройства K , определяемой из отношения $K = \frac{\Delta q_{\text{пер}}}{\Delta x}$, где: $\Delta q_{\text{пер}}$ — расстояние от плоскости Q до передней границы резко изображаемого пространства. Получены выражения для определения значений K при фокусировке:

а) по матовому стеклу:

$$K_{\text{м.с.}} = \left(1 - \frac{q \cdot \delta_{\text{доп}}}{D_o \cdot f'}\right) \frac{q^2 \cdot \delta_{\text{доп}}}{D_o \cdot f'} \cdot \frac{D_v \cdot f'_v}{x_{\text{нав}}^2 \cdot \delta_{\text{разр}}};$$

б) по матовому стеклу с использованием фокусирующе-

ных клиньев:

$$K_{\text{ф.к.}} = \left(1 - \frac{q \cdot \delta_{\text{доп}}}{D_o \cdot f'}\right) \frac{q^2 \cdot \delta_{\text{доп}}}{x_{\text{нав}}^2} \cdot \frac{2 t_{\text{гм}} \cdot f'}{D_o \cdot \Delta_{\text{разр}}};$$

в) с помощью монокулярного дальномера:

$$K_{\text{м.д.}} = \left(1 - \frac{q \cdot \delta_{\text{доп}}}{D_o \cdot f'}\right) \frac{q^2 \cdot \delta_{\text{доп}}}{D_o \cdot f'} \cdot \frac{Б.м.д. \cdot \Gamma}{\theta^2 \cdot \psi'_\lambda};$$

В приведенных выражениях обозначено:

- D_o ; D_v ; f' и f'_v — диаметры апертурных диафрагм и фокусные расстояния съёмочного и визирного объективов;
 $\delta_{\text{доп}}$ — диаметр допускаемого кружка нерезкости;
 $\delta_{\text{разр}}$ — диаметр визуально разрешаемого кружка нерезкости;
 $\Delta_{\text{разр}}$ — минимальное расстояние между линиями, визуально разрешаемое глазом;
 q и $x_{\text{нав}}$ — расстояние до плоскости Q и $P_{\text{нав}}$ от входного зрачка и переднего фокуса объектива соответственно;
 $Б.м.д. \cdot \Gamma$ — приведенная база дальномера;

δ - расстояние от базиса дальномера до снимаемого предмета;

ψ'_λ - угловая разрешающая способность глаза.

Рассмотрены схемы оптических компенсаторов дальномеров и получены формулы, определяющие связь между перемещением фокусируемого объектива и изменением положения компенсатора.

Автоматизация операций, связанных с фокусировкой объективов, является одной из проблем, которая полностью ещё не разрешена. Первой ступенью в решении этой проблемы являются способы фокусировки, требующие минимальных затрат времени на их осуществление. В работе проанализированы два из таких способов: фокусировка объектива "по двум точкам" и "по символам".

В отечественной и зарубежной литературе большое внимание уделяется разработке теории расчёта и проектирования механизмов для автоматической отработки выдержек (затворов). В работе проведен анализ достоинств и недостатков основных типов затворов, на основе чего даны рекомендации по их использованию. Получено выражение для определения оптического коэффициента полезного действия затвора (в общем виде) и рассмотрены конкретные случаи его применения для различных типов затворов.

Лентопротяжный механизм является одной из важнейших составных частей киноаппарата любого типа. Автор не занимался непосредственно разработкой теории расчёта и проектирования лентопротяжных механизмов, однако в работе большое внимание уделено обобщению материалов по этому вопросу. Наиболее подробно рассмотрены беспермоточные устройства, непрерывные кассеты и скачковые механизмы.

Проанализированы основные схемы осветительных систем проекционных приборов и проведено их сопоставление. Приведены выражения для определения полезного светового потока диа- и эпипроекционных систем. Получено выражение для определения яркости тела накала источника света $V_{ист}$, исходя из заданной яркости в центре экрана $B_{э.ц.}$.

* * *

Современные фото- и киноаппараты оснащаются встроенными устройствами, служащими для автоматизации процесса дозирования экспозиции при съёмке, т.е. экспонометрическими устройствами. Поскольку теория расчёта и проектирования таких устройств разработана недостаточно, то поэтому главное внимание в работе автор уделит этому вопросу.

Получена точная аналитическая зависимость между внешними экспозиционными факторами: средней яркостью B_{cp} объектов съёмки и светочувствительностью фотоматериала

S_{D_5} , и внутренними экспозиционными параметрами: эффективной выдержкой $t_{эф}$ эффективным значением диафрагмы $n_{эф}$. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$\frac{B_{cp} \cdot S_{D_5}}{p \cdot 10^{\frac{\Delta D}{\gamma}}} \xi = \frac{n_{эф}^2}{t_{эф}},$$

где:

S_{D_5} - величина светочувствительности при критерии D_5 ;

γ - коэффициент контрастности фотоматериала;

p - постоянная величина, используемая в формуле для определения S_{D_5} ;

ΔD - разность между средним значением оптической плотности фотопочернения, соответствующем B_{cp} , и величиной D_5 ;

$$\xi = \frac{1}{4} \pi \cdot K w'_{cp} \cdot \cos^4 w'_{cp} \frac{1}{(1 + \beta)^2},$$

где:

$K w'_{cp}$ - коэффициент виньетирования при средней величине угла поля изображения $2w'_{cp}$;

β - поперечное (линейное) увеличение при съёмке.

Приведя указанное выше выражение в виду, используемому в нормативных документах, для определения величины экспонометрической постоянной K получим:

$$K = \frac{p \cdot 10^{\frac{\Delta D}{\gamma}}}{\xi \cdot \tau \cdot \eta},$$

где:

- τ - коэффициент светопропускания съёмочного объектива;
 η - оптический коэффициент полезного действия фотозатвора.

(Если шкалы диафрагм и выдержек градуируются в эффективных значениях $n_{эф}$ и $t_{эф}$, то при расчёте K коэффициенты τ и η следует опускать).

Исследована взаимосвязь между величиной экспонометрической постоянной K и значением оптической плотности получаемого на фотослое изображения. В результате исследований установлены:

а) номинальные значения экспонометрической постоянной при съёмке как на негативные K_{neg} , так и на обращаемые $K_{обр}$ фотоматериалы;

б) допускаемые отклонения ΔK , при которых обеспечивается получение фотоизображений с незаметными для глаза изменениями величины средней оптической плотности почернения.

Приведены рекомендации по корректировке величины постоянной p , используемой в формулах для определения S_D :

Для проведения оценки точности действия экспонометров и экспонометрических устройств была определена величина максимальной допустимой погрешности $\Delta H_{доп}$ в дозировании экспозиции при фото- и киносъёмке, исходя из:

а) Свойств фотоматериалов (величины полезного интервала экспозиций L_g) и интервала яркостей объектов съёмки $L_{об}$ (брались среднестатистические значения $L_{об}$ при съёмке на черно-белые и цветные фотоматериалы), определяющего интервал освещенностей $L_{осв}$ в оптическом изображении, а, следовательно, и интервал сообщаемых фотослою экспозиций $L_{экс}$.

б) Зрительного восприятия фотоотпечатков и киноизображений на основе данных, заимствованных из публикаций других авторов.

Было установлено, что величина максимальной предельной допустимой погрешности $\Delta H_{доп}$ не должна превышать $\pm 0,35$ лог.ед., что полностью согласуется с результатами работ, проведенными в ГОИ им. Вавилова д.т.н. Гороховским Ю.Н. и д.т.н. Черным И.А.

Проведен тщательный анализ погрешностей экспонометров и экспонометрических устройств на основе данных, приведенных в нормативных документах, содержащих технические требования на изготовление указанных приборов. В результате анализа установлено, что величина только одной основной погрешности ΔB (погрешности яркомера) при нормальной температуре с учётом старения и утомляемости в наиболее неблагоприятных случаях может достигать и даже превышать величину $\Delta H_{доп}$.

Величина же максимальной суммарной погрешности $\Delta H_{сум}$ с учётом температурной погрешности фотоприёмника и погрешностей механизмов диафрагмы и затвора, а также других звеньев экспонометрических устройств, может в два и более раз превышать величину $\Delta H_{доп}$.

Этот вывод подтверждается экспериментальными данными, полученными автором (совместно с сотрудниками) при выполнении научно-исследовательской работы /9/, а также исследованиями, проведенными в ГОИ им. Вавилова Черным И.А. и Сыровым А.А. Так экспериментальные исследования серийных образцов фото- и киноаппаратов показали, что при нормальной температуре $+20^{\circ}\text{C}$ около 25% фото- и киносъёмок сопровождались отступлениями (погрешностями) от расчётной величины экспозиции, превышающими $\Delta H = \pm 0,35 \text{ лог.ед.}$ При температурах, отличающихся от нормальной (в диапазоне $-20^{\circ}\text{C} - +40^{\circ}\text{C}$), процент фото- и киносъёмок с повышенными погрешностями возрастал до 50 и более.

Таким образом, проблема повышения точности действия экспонометрических устройств является безусловно насущной и актуальной задачей, решению которой посвящен один из разделов диссертации.

* * *

Для уменьшения суммарной погрешности $\Delta H_{сум}$ можно рекомендовать два пути:

1) Повышение требований к точности действия каждой составной части, входящей в экспонометрическое устройство, т.е. понижение значений допускаемых погрешностей, устанавливаемых нормативными документами. Это в первую очередь касается основной погрешности ΔB , а также погрешностей фотозатворов и других механизмов.

2) Частичная или полная компенсация некоторых погрешностей путём предварительной селекции таких составных частей экспонетрических устройств, как: фотоприёмники, индикаторы электротока (гальванометры) и др.

Первый путь, являющийся наиболее простым, требует существенного пересмотра всех нормативных документов и, вероятно, на данном этапе его следует считать практически неприемлемым. Второй путь является трудоёмким и приведет к повышению себестоимости фото- и киноаппаратов. Однако это будет сопровождаться улучшением качества продукции и поэтому этот путь следует использовать в той или иной степени, что фактически и делается на предприятиях оптико-механической промышленности.

Как было установлено ранее, наиболее существенными (в смысле их величины) погрешностями являются основная погрешность ΔB , т.е. погрешность в измерении яркости объектов съёмки, и температурная погрешность $\Delta B(t^\circ)$ фотоприёмников. Поэтому в работе основное внимание уделено способам уменьшения этих погрешностей.

Основная погрешность ΔB (погрешность яркомера) является результатом отклонения фактических значений чувствительностей фотоприёмников и гальванометров от номинальных величин (разброса по чувствительности). В работе теоретически обоснованы и экспериментально проверены способы уменьшения основной погрешности ΔB при использовании двух основных схем яркомеров: с фотогальваническими элементами (фотоэлементами) и фоторезисторами.

При применении в качестве фотоприёмника фотоэлементов (ФЭ) для определения угла отклонения стрелки гальванометра α_r получена следующая зависимость:

$$\alpha_r = S_r \cdot S_{ФЭ} \cdot F_{ФЭ} \cdot \frac{R_{з.с.}}{R_{з.с.} + R_r + R_k + R_{доп}},$$

где:

S_r и $S_{ФЭ}$ — чувствительности гальванометра и фотоэлемента соответственно;

$R_{з.с.}$, R_r , — сопротивления запирающего слоя ФЭ, гальванометра, контактов и дополнительного резистора;

$F_{\Phi\Xi} = \pi \cdot \tau_{co} \cdot B_{\Phi\Xi} \cdot \cos^2 \varphi_{\Phi\Xi}$ - световой поток, падающий на светоприёмную площадку фотозлемента, площадь которой равна $S_{\Phi\Xi}$;

$\varphi_{\Phi\Xi}$ - угол восприятия ФЭ;

$B_{\Phi\Xi}$ - средняя яркость объектов съёмки;

τ_{co} - коэффициент пропускания светограничительной системы, расположенной перед ФЭ.

График зависимости $\alpha_r^0 = f(B_{\Phi\Xi})$ или $\alpha_r^0 = \psi(l_g B_{\Phi\Xi})$ принято называть градуировочной характеристикой. Как показали исследования, добиваться точного (идеального) совпадения фактических и эталонных характеристик в большинстве случаев невозможно. Для частичной коррекции характеристик $\alpha_r^0 = f(B_{\Phi\Xi})$ предложен способ, основанный на выборе величины сопротивления $R_{доп}$ дополнительного резистора, позволяющий уменьшить основную погрешность ΔB до величины, не превышающей $\pm 0,1$ лог. ед.

При применении в качестве фотоприёмника фоторезисторов (ФР) для определения угла отклонения стрелки гальванометра α_r^0 получена следующая зависимость:

$$\alpha_r^0 = S_r \frac{U}{R_{ФР}^c + R_r + R_k + R_{доп}},$$

где:

$\frac{R_r U}{E_{ФР}}$ - напряжение источника питания;
 $R_{ФР}^c = R_{ФР}$ - световое сопротивление фоторезистора при освещении его светоприёмной площадки $E_{ФР}$, равной $\pi \cdot \tau_{co} \cdot B_{\Phi\Xi} \cdot \cos^2 \varphi_{\Phi\Xi}$;

γ - крутизна люкс-омической характеристики ФР;

$R_{ФР}^T$ - темновое сопротивление ФР;

Остальные обозначения как и в предыдущем выражении.

Для частичной компенсации основной погрешности ΔB можно использовать способ, основанный на выборе величины сопротивления $R_{доп}$. Предложена методика осуществления такого выбора путём определения $\Delta R_{доп}$ для каждой конкретной пары "ФР + Г".

Проанализировано влияние отклонения крутизны γ люкс-омических характеристик от номинального значения $\gamma_{ном}$ на величину основной погрешности ΔB . Получены выражения

для определения предельных значений γ в зависимости от допускаемой величины $\Delta B_{\text{доп}}$:

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{\gamma_{\text{ном}} \cdot \lg C \cdot B_{\text{ном}}}{\lg C \cdot B_{\text{ном}} - \Delta B_{\text{доп}}};$$

$$\gamma_{\text{min}} = \frac{\gamma_{\text{ном}} \cdot \lg C \cdot B_{\text{ном}}}{\lg C \cdot B_{\text{ном}} + \Delta B_{\text{доп}}};$$

При известном значении крутизны γ люкс-омической характеристики данного ФР для определения $R_{\text{доп}}$ можно использовать следующее выражение:

$$R_{\text{доп}} = R_{\text{доп.ном}} + \left[R_{\text{ФР.ном}}^c - (R_{\text{ФР.ном}}^c) \frac{\gamma_{\text{факт}}}{\gamma_{\text{ном}}} \right],$$

где:

$R_{\text{доп.ном}}$ и $R_{\text{ФР.ном}}^c$ — номинальные значения сопротивлений резисторов;

$\gamma_{\text{факт}}$ и $\gamma_{\text{ном}}$ — фактическое и номинальное значения крутизны фоторезисторов.

* * *

Температурная погрешность $\Delta B(t^\circ)$ это погрешность в измерении яркости B объектов съёмки, получающаяся вследствие изменения чувствительности фотоприёмника в зависимости от температуры окружающей среды. Так как температурная погрешность в наибольшей степени проявляется у фоторезисторов, то в диссертации рассматриваются способы компенсации $\Delta B(t^\circ)$ применительно к этому типу фотоприёмника.

Нами были проведены тщательные исследования фоторезисторов при различных освещенностях их светоприёмных площадок и температурах окружающей среды. Исследованию подвергались фоторезисторы типа СФ2 на базе CdS (селенистокadmиевые).

Изменение сопротивления фоторезистора $R_{\text{ФР}}$ при постоянной освещенности $E_{\text{ФР}}$ в зависимости от температуры можно выражать зависимостью вида:

$$R_{\text{ФР}}(t^{\circ}) = R_{\text{ФР.о}} (1 + \beta_{\text{ФР.с}} \cdot \Delta t^{\circ}),$$

где:

$R_{\text{ФР.о}}$ - сопротивление ФР при нормальной температуре $t^{\circ}_0 = +20^{\circ}\text{C}$;

$\beta_{\text{ФР.с}}$ - среднее значение температурного коэффициента ФР по сопротивлению;

Δt° - интервал температур, равный $(t^{\circ} - t^{\circ}_0)$.

Для компенсации изменения сопротивления фоторезистора $R_{\text{ФР}}(t^{\circ})$ при различной температуре t° рекомендуется в электросхему фотоэлектрического узла (ФЭУ) экспонетрического устройства включить резистор $R_{\text{комп}}$, сопротивление которого должно изменяться по определенному закону в соответствии с изменением $R_{\text{ФР}}(t^{\circ})$. При этом необходимо обеспечить выполнение следующего равенства:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{ФР}}(t^{\circ}) + R_{\text{комп}}(t^{\circ}) + R_{\text{доп}} + R_{\Gamma} + R_{\text{К}} = \text{const}$$

Полагая, что $R_{\text{доп}}$, R_{Γ} и $R_{\text{К}}$ практически не изменяются при изменении температуры t° , условие термокомпенсации можно представить таким образом:

$$\frac{dR_{\Sigma}}{dt^{\circ}} = \frac{\partial R_{\Sigma}}{\partial R_{\text{ФР}}} \cdot \frac{dR_{\text{ФР}}}{dt^{\circ}} + \frac{\partial R_{\Sigma}}{\partial R_{\text{комп}}} \cdot \frac{dR_{\text{комп}}}{dt^{\circ}};$$

Выразив $R_{\text{комп}}(t^{\circ}) = R_{\text{комп.о}} (1 + \beta_{\text{комп.с}} \Delta t^{\circ})$, получаем другую запись условия термокомпенсации:

$$\text{где: } R_{\text{ФР.о}} \cdot \beta_{\text{ФР.с}} = -R_{\text{комп.о}} \cdot \beta_{\text{комп.с}},$$

$\beta_{\text{комп.с}}$ - среднее значение температурного коэффициента термокомпенсатора по сопротивлению.

Так как фоторезисторы имеют положительный температурный коэффициент $\beta_{\text{ФР.с}}$, то термокомпенсаторы должны иметь отрицательный температурный коэффициент $\beta_{\text{комп.с}}$. Таким температурным коэффициентом обладают полупроводниковые приборы, называемые терморезисторами (ранее назывались термисторами). Проведенные нами исследования показали, что выпускаемые отечественной промышленностью терморезисторы марок КМТ-8, ММТ-8 и ММТ-9 непригодны для использования их в качестве термокомпенсаторов в ФЭУ экспонетрических устройств по следующим причинам:

1) Указанные терморезисторы имеют нестабильные параметры при напряжении источников питания менее 5в;

2) Минимальные величины потребляемых ими мощностей значительно превышают мощность в электроцепях ФЭУ экспониметрических устройств (более, чем в 100 раз).

Для обеспечения термокомпенсации изменения $R_{\varphi\varphi}(t^\circ)$ рекомендуется использовать устройства, изменяющие свою конфигурацию при изменении температуры окружающей среды. К таким устройствам относятся в первую очередь термометаллы (ТМ).

Возможны два варианта использования ТМ в схемах термокомпенсации:

1) Температурная деформация ТМ используется для изменения одного из электрических параметров в ФЭУ (например, суммарного сопротивления R_{Σ});

2) Температурная деформация ТМ используется для изменения положения одной из составных частей ФЭУ (например, для разворота корпуса гальванометра). В связи с тем, что силовая нагрузка на незакрепленный конец ТМ во втором варианте существенно превышает нагрузку, имеющую место в первом варианте, то поэтому первому варианту следует отдать безусловное предпочтение. Кроме того, увеличение силовой нагрузки приводит к понижению чувствительности компенсатора.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, наилучшие результаты получаются при использовании изогнутых в кольцо ТМ с начальными радиусами r_0 от 30 до 50 мм и следующими параметрами пластин: ширина $b = (2 + 6)$ мм и толщина $h = (0,1 + 0,3)$ мм. Основное преимущество кольцевых ТМ заключается, во-первых, в уменьшении габаритов термокомпенсатора, а, во-вторых, в том, что перемещение незакрепленного конца при изменении t° у них имеет почти линейный характер (отступления от пропорциональной зависимости не превышают $\pm 0,01$ лог.ед.).

Исследования влияния силовой нагрузки, прилагаемой к незакрепленному концу ТМ, показали, что нагрузочный момент не должен превышать 2Г см.

В работе проведены исследования поведения незакрепленного конца ТМ в зависимости от t° при различных угловых размерах ψ_0 кольцевых ТМ. Получены расчётные выражения

для определения изменения угла $\psi_{\text{ТБМ}}$ и линейных координат x и y незакрепленного конца:

$$\psi = \psi_0 [1 + (\alpha - \alpha_0 \cdot K_{\text{ТБМ}}) \Delta t^\circ];$$

$$x = (\alpha_0 + \alpha_0^2 \cdot K_{\text{ТБМ}} \cdot \Delta t^\circ) \cdot \sin \psi;$$

$$y = (\alpha_0 + \alpha_0^2 \cdot K_{\text{ТБМ}} \cdot \Delta t^\circ) \cdot (1 - \cos \psi),$$

где:

$$\alpha \approx \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

— среднее значение коэффициента линейного теплового расширения ТБМ, состоящего из двух слоёв с соответствующими коэффициентами α_1 и α_2 ;

$$K_{\text{ТБМ}} = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)}{2h\alpha_0};$$

α_0 — начальный радиус кольцевого ТБМ, имеющего толщину $h = h_1 + h_2$.

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования показали, что при расчётах можно использовать упрощенное выражение для определения угла ψ (получавшая погрешность не превышает 15%):

$$\psi \approx \psi_0 (1 - \alpha_0 \cdot K_{\text{ТБМ}} \cdot \Delta t^\circ).$$

Для обеспечения практически пропорционального изменения угла $\psi_{\text{ТБМ}}$ в зависимости от t° рекомендуется угол $\psi_{0\text{ТБМ}}$ выбирать в пределах от $1\frac{1}{4}^\circ$ до $1\frac{3}{4}^\circ$.

В результате аналитических и экспериментальных исследований предложена следующая методика расчёта термокомпенсаторов:

- 1) Выбирается численная величина температурного коэффициента фоторезистора по сопротивлению $R_{\text{ФР.с}}$;
- 2) Устанавливается закон изменения сопротивления термокомпенсатора $R_{\text{комп}}(t^\circ)$, а именно:

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{комп}}(t^\circ) &= [R_{\text{комп}}(t^\circ) - R_{\text{комп.о}}(t_0^\circ)] = \\ &= R_{\text{комп.о}} \cdot \beta_{\text{комп}} \cdot \Delta t^\circ = -R_{\text{ФР.о}} \cdot \beta_{\text{ФР.с}} \cdot \Delta t^\circ, \end{aligned}$$

3) Определяется закон необходимого смещения ℓ_n незакрепленного конца кольцевого ТЭМ, несущего движок-ползушку, в зависимости от температуры:

$$\ell_n \approx \tau' \cdot \Delta \psi_{\text{ТЭМ}} = \tau' \cdot \psi_{0\text{ТЭМ}} (\alpha - \tau_0 \cdot K_{\text{ТЭМ}}) \Delta t^\circ.$$

Или:

$$\ell_n \approx \tau' \cdot \psi_{0\text{ТЭМ}} \cdot B \cdot \Delta t^\circ,$$

где:

τ' — среднее расчётное значение радиуса кольцевого ТЭМ.

4) Находится изменение сопротивления резистора, используемого в узле термокомпенсатора:

$$\Delta R_p = \ell_n \cdot K_p = K_p \cdot \psi_{0\text{ТЭМ}} \cdot B \cdot \tau' \cdot \Delta t^\circ,$$

где:

K_p — удельное значение сопротивления резистора компенсатора, приходящееся на единицу его длины.

Так как $\Delta R_p = \Delta R_{\text{Ксмп}}(t^\circ)$, то:

$$\beta_{\text{Фр.с}} = - \frac{K_p \cdot \psi_{0\text{ТЭМ}} \cdot B \cdot \tau'}{R_{\text{Фр.о}}}.$$

Проведенная экспериментальная проверка предлагаемой методики показала, что температурная погрешность $\Delta B(t^\circ)$ при использовании термокомпенсаторов понижается до $\pm 0,08$ и менее лог. ед. в диапазоне температур от -15°C до $+40^\circ\text{C}$.

Рассмотренная методика применима в тех случаях, когда необходимо осуществлять термокомпенсацию только при определенной величине освещенности $E_{\text{Фр}}$ (например, при $E_{\text{Фр. min}}$). Как показали аналитические и экспериментальные исследования характер зависимости $R_{\text{Фр}}(t^\circ) = R_{\text{Фр.о}}(1 + \beta_{\text{Фр.с}} \cdot \Delta t^\circ)$ изменяется при различных освещенностях $E_{\text{Фр}}$, так как от величины $E_{\text{Фр}}$ зависит как $R_{\text{Фр.о}}$, так и $\beta_{\text{Фр.с}}$.

Вследствие этого взаимосвязь между указанными величинами должна записываться следующим образом:

$$\beta_{\text{Фр.с}}(E_{\text{Фр}}) = - \frac{K_p \cdot \psi_{\text{ТЭМ}}(E_{\text{Фр}}) \cdot B \cdot \tau'}{R_{\text{Фр.о}}(E_{\text{Фр}})},$$

где:

$$R_{\text{фр.о}}(E_{\text{фр}}) = \frac{R_{\text{фр}}^T}{E_{\text{фр}}}.$$

Для учёта изменения величины $R_{\text{фр.о}}(E_{\text{фр}})$ предлагается изменять угловой размер кольцевого ТБМ, т.е. изменять рабочий угол ТБМ $\psi_{\text{раб}}$. Корректировку изменения

$R_{\text{фр.о}}(E_{\text{фр}})$ предлагается осуществлять дополнительным смещением незакрепленного конца с движком-ползушкой посредством деформации ТБМ при изменении его рабочего угла $\psi_{\text{раб}}$. Такое смещение вызывается силой Q , предлагаемой в месте расположения подвижной заделки ТБМ.

Изменение рабочего угла ТБМ $\psi_{\text{раб}}$ осуществляется смещением места заделки ТБМ в соответствии с изменением $E_{\text{фр}}$. Рекомендуемые значения рабочих углов $\psi_{\text{ТБМ}}$ выбираются в пределах от $1/4 \psi_{\text{ТБМ}}$ до $3/4 \psi_{\text{ТБМ}}$.

Дополнительное наибольшее смещение ползушки вследствие изгиба ТБМ посредством приложения силы Q с целью учёта изменения $R_{\text{фр.о}}(E_{\text{фр}})$ определяется по формуле:

$$l_n^{\max}(Q) = \frac{\Delta R_{\text{фр.о}}^{\max}}{K_p},$$

где:

$\Delta R_{\text{фр.о}}^{\max}$ - изменение сопротивления фоторезистора в диапазоне рабочих освещенностей $E_{\text{фр}}$;

$l_n^{\max}(Q)$ - наибольшее смещение ползушки под действием силы Q , прилагаемой в месте расположения подвижной заделки ТБМ.

Для определения деформации кольцевого ТБМ под действием силы Q нами использованы следующие дифференциальные уравнения:

$$\vartheta(\mu) = \vartheta_0 + \frac{1}{E \cdot J_2} \int_0^{M_{\text{нр}}} M(\mu) \cdot dS(\mu);$$

$$u(\mu) = u_0 - \int_0^{M_{\text{нр}}} \vartheta(\mu) \cdot dy(\mu);$$

$$V(\mu) = V_0 + \int_0^{M_{\text{нр}}} \vartheta(\mu) \cdot dx(\mu),$$

где:

E - приведенный модуль упругости пластинки ТБМ;

J_z - момент инерции поперечного сечения ТБМ;

$\psi(\mu)$ - угловое перемещение сечения ТБМ в месте приложения силы Q ;

$u(\mu)$ и $v(\mu)$ - линейные перемещения по осям координат сечения ТБМ в этом же месте;

$M(\mu) = -Q \cdot z \cdot \sin(\mu_{np} - \mu)$ - изгибающий момент от силы Q .

После интегрирования и преобразования получаем следующие расчетные выражения.

Угловое и линейное перемещение в месте приложения силы Q :

$$\psi(\mu_{np}) = \frac{Q \cdot z^2}{E \cdot J} (\cos \mu_{np} - 1);$$

$$u(\mu_{np}) = \frac{Q \cdot z^3}{E \cdot J} [\mu_{np} \cdot \sin \mu_{np} - 2 \cos \mu_{np} (1 - \cos \mu_{np})];$$

$$v(\mu_{np}) = \frac{Q \cdot z^3}{E \cdot J} [\sin 2\mu_{np} - \cos \mu_{np} (\mu_{np} + \frac{1}{2} \sin 2\mu_{np}) - \sin^3 \mu_{np}];$$

Линейные перемещения незакрепленного конца ТБМ:

$$u(\mu_{np} + \psi_{раб}) = u(\mu_{np}) + \psi(\mu_{np}) \cdot z [\cos(\mu_{np} + \psi_{раб}) - \cos \mu_{np}];$$

$$v(\mu_{np} + \psi_{раб}) = v(\mu_{np}) + \psi(\mu_{np}) \cdot z [\sin(\mu_{np} + \psi_{раб}) - \sin \mu_{np}];$$

Перемещение ползушки $\ell_n(Q)$:

$$\ell_n(Q) = \sqrt{[u(\mu_{np} + \psi_{раб})]^2 + [v(\mu_{np} + \psi_{раб})]^2};$$

Изменение радио-вектора кулачка, обеспечивающего смещение подвижной заделки:

$$\Delta z_k = z_k - z_{k,0} = \sqrt{[u(\mu_{np})]^2 + [v(\mu_{np})]^2} \quad 16$$

trough

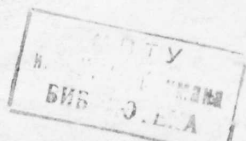
Проанализированы и оценены также основные способы расположения фоторезисторов по системе ТТД, находящие практическое применение в современных фото-и киноаппаратах.

ВЫВОДЫ

На основе обобщения многолетних теоретических и экспериментальных работ автора и разнообразных материалов, опубликованных в научно-технической литературе как в СССР, так и за рубежом, предложена теоретически обоснованная и достаточно стройная методика расчёта и проектирования автоматических и полуавтоматических фото- и киноприборов.

Результаты основных теоретических и экспериментальных исследований можно сформулировать следующим образом:

1). Разработана теория расчёта и оценки точности основных способов фокусировки съёмочных объективов;



2). Получено точное выражение основной экспонометрической зависимости и проанализировано влияние величины экспонометрической постоянной K на оптическую плотность фотоизображений при съёмке на различные фотоматериалы. Определены допустимые отклонения в величине K .

3). Проведен анализ погрешностей экспонометрических устройств на основе существующих нормативных документов и сделан вывод о том, что при серийном производстве фото- и киноаппаратов предельная суммарная погрешность в дозировании экспозиции существенно превышает допускаемую погрешность $\Delta H_{\text{доп}} = \pm 0,35 \text{ лог.ед.}$ (эта величина получена в результате наших экспериментальных исследований и выводов других авторов).

4). Разработана методика частичной компенсации основной погрешности ΔB посредством: а) индивидуального выбора номинальной величины сопротивления $R_{\text{доп}}$; б) селекции фоторезисторов по крутизне γ их люкс-омических характеристик.

5). Разработана теория расчёта устройств для компенсации температурной погрешности $\Delta B(t^\circ)$ фоторезисторов с использованием термобиметаллических пластин, обеспечивающих изменение сопротивления $R_{\text{ком}}(t^\circ)$ в соответствии с изменением сопротивления фоторезисторов $R_{\text{фр}}(t^\circ)$.

6). Проанализированы способы учёта величины светочувствительности S в экспонометрических устройствах, основные электросхемы ЭУ и способы построения и взаимосвязи основных узлов ЭУ.

7). Изложены основные сведения по характеристикам и эксплуатационным показателям фото- и кинообъективов, визирных устройств, фотозатворов, лентопротяжных механизмов и светооптических систем диа- и эпипроеционных приборов.

Разработанные автором основы теории расчёта и проектирования фото- и киноприборов используются инженерно-техническими работниками предприятий оптико-механической промышленности и студентами ВУЗ'ов. Основные

материалы диссертации опубликованы в следующих работах автора:

1. Кулагин С.В., фотография и фотоаппаратура, "Росвузиздат", 1963, (учебное пособие).
2. Кулагин С.В., Киносъёмочная и кинопроекционная аппаратура, "Высшая школа", 1967, (учебное пособие).
3. Кулагин С.В., Проектирование фото- и киноприборов, "Машиностроение", 1971, (монография).
4. Кулагин С.В., К вопросу расчёта устройств для полуавтоматического и автоматического дозирования экспозиции, "Техника кино и телевидения", № 5, 1964.
5. Кулагин С.В., Об одном способе учёта светочувствительности фотоматериала в фотоаппаратах с АДЭ, "Труды МВТУ", Сборник № 129, 1968.
6. Кулагин С.В., О допустимом отклонении в крутизне омиических характеристик фоторезисторов, "Труды МВТУ", Сборник № 135, 1970г.
7. Кулагин С.В., О выборе значения экспонометрической постоянной при расчёте экспонометрических устройств, "Труды МВТУ", Сборник № 143, 1971.
8. Кулагин С.В., Исследование устройств для автоматического дозирования экспозиции, научно-технический отчёт по теме П-241, 1965.
9. Кулагин С.В., Апарин Е.М., Исследование возможностей создания конккурентоспособных систем, научно-технический отчёт по теме П-315А, 1968.
10. Кулагин С.В., Апарин Е.М., Исследование работы основных узлов фотоаппаратов отечественного производства, научно-технический отчёт по теме П-321, 1970.
11. Кулагин С.В., Апарин Е.М., Разработка и исследование экспонометрических устройств для киноаппаратов, научно-технический отчёт по теме П-323, 1972.
12. Кулагин С.В., Расчёт экспонометрических устройств для любительских кинокамер, Методическое пособие, 1964.