

СПОСОБЫ АДАПТАЦИИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ К УСЛОВИЯМ ИЗМЕНЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ НА МЕСТНОСТИ

© 2005 г. А. Б. Бельский; Б. Н. Сеник, канд. техн. наук; А. Б. Сухачев, канд. техн. наук

ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева", г. Красногорск, Московская обл.
E-mail: kmz214@zenit-foto.ru

В работе рассмотрены различные способы адаптации телевизионных систем с фотоприемниками на основе ПЗС-матриц к условиям изменения освещенности на местности.

Коды OCIS: 120.0120, 220.0220.

Поступила в редакцию 29.07.2004.

Телевизионные (ТВ) системы являются одним из видов оптико-электронных систем (ОЭС). Современные ТВ системы наблюдения широко используются при решении широкого круга задач в системах аэромониторинга, экологической безопасности, видеонаблюдения и пр., а также в интересах народного хозяйства и различных силовых ведомств в различных условиях освещенности.

Известно [1–3], что освещенность земной поверхности в естественных условиях изменяется от $(8-10) \times 10^4$ лк в полдень ясного дня до $(2-6) \times 10^{-5}$ лк в безлунную ночь при большой облачности. Таким образом, диапазон изменения освещенностей земной поверхности составляет примерно 10^9 раз, или 180 дБ. Ни один современный фотоприемник не имеет столь широкого динамического диапазона.

Для обеспечения работы ОЭС в различных условиях освещенности применяются системы адаптации [1–4] на основе систем автоматической регулировки диафрагмы объектива (АРД) или систем автоматической регулировки освещенности фотоприемника (АРО). Задачей системы адаптации является обеспечение сохранения освещенности поверхности фотоприемника, соответствующей получению оптимального преобразования свет-сигнал, при со-

хранении отношения сигнал/шум на уровне не менее 40 дБ и без захода в зону насыщения фотоприемника.

В системах АРД для регулировки светового потока используется изменение диафрагмы объектива по сигналу системы автоматического регулирования. В системах АРО для регулировки светового потока используются один или два вращающихся навстречу фильтра переменной плотности с электромеханическим приводом. При этом ослабление потока является функцией угла разворота фильтра. К подобным системам относятся также системы с использованием электрохромных фильтров переменной плотности, изменяющих коэффициент пропускания в зависимости от приложенного напряжения. Функциональная схема ОЭС с системой адаптации типа АРД или АРО приведена на рис. 1.

Динамическая характеристика оптико-электронной системы с системой АРД или АРО приведена на рис. 2. Здесь E_1 и E_2 – границы линейного участка динамической характеристики системы автоматического регулирования (САР), 1 – динамическая характеристика ОЭС без САР (динамическая характеристика фотоприемника), 2 – динамическая характеристика ОЭС при работе САР.

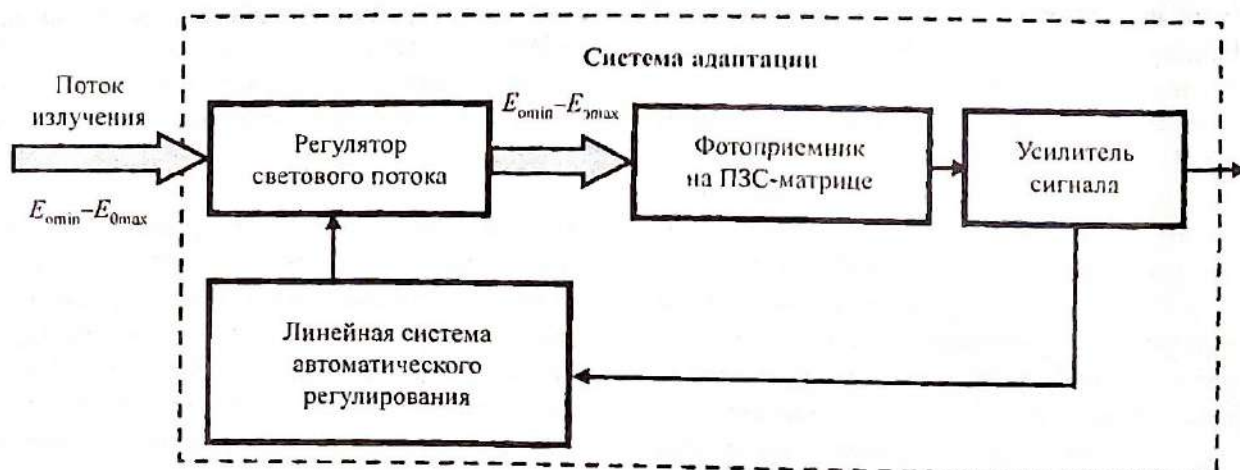


Рис. 1. Функциональная схема ОЭС с системой адаптации типа АРД или АРО.

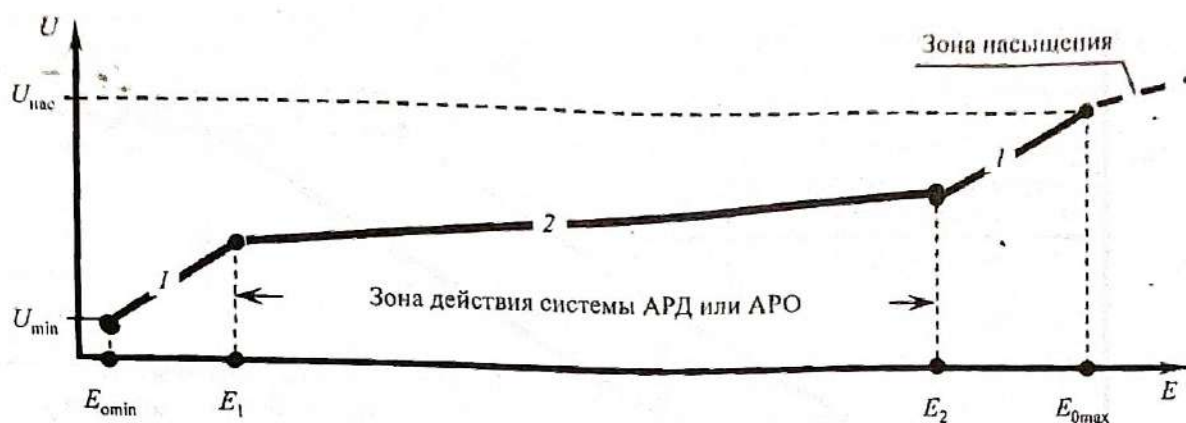


Рис. 2. Динамическая характеристика оптико-электронной системы с системой АРД или АРО.

Системы АРД или АРО обеспечивают работу ОЭС в динамическом диапазоне изменения освещенностей от 10^7 раз (140 дБ) до 10^8 раз (160 дБ). Однако они представляют собой сложные линейные системы автоматического регулирования, в состав которых входят высокоточные электромеханические приводы (для систем АРД и АРО) или высоковольтные преобразователи (в случае применения электрохромных фильтров). Время реакции таких систем составляет доли секунды. Все это делает подобные системы достаточно дорогостоящими и требовательными к условиям эксплуатации.

Одним из возможных вариантов построения систем адаптации в ТВ системах является двухконтурная система адаптации, функциональная схема которой приведена на рис. 3. Двухконтурная система адаптации состоит из высококачественной САР 1, представляющей собой фотоприемник на ПЗС-матрице с системой автоматической регулировки экспозиции (АРЭ), и системы дискретной регулировки потока излучения (ДРПИ) 2, расширяющей возможности системы АРЭ. Современные фотоприемники на основе ПЗС-матриц с встроенной системой АРЭ за счет изменения времени накопления заряда могут обеспечить адаптацию ТВ системы к измене-

нию освещенности на объекте примерно в 10^6 раз (120 дБ) за время не более 20 мс [5]. Система ДРПИ представляет собой простейшую систему автоматического регулирования с релейной характеристикой. Как видно из рис. 3, система ДРПИ обеспечивает регулировку потока излучения, поступающего на вход фотоприемника. Динамическая характеристика оптико-электронной системы с двухконтурной системой адаптации (АРЭ + ДРПИ) приведена на рис. 4. Система ДРПИ, анализируя падающий поток излучения, должна обеспечивать изменение потока излучения, поступающего на фотоприемник ОЭС, таким образом, чтобы даже при значениях освещенности, соответствующих максимальному $E_{0\max}$, работа ОЭС в целом осуществлялась в пределах линейного участка динамической характеристики фотоприемника с системой АРЭ без захода в зону насыщения (см. рис. 4).

Реализация системы ДРПИ может быть осуществлена либо путем дискретного изменения диафрагмы объектива, либо за счет введения в нужный момент в оптическую схему нейтрального светофильтра постоянной плотности. Поскольку дискретное изменение потока происходит на линейном участке характеристики системы АРЭ, требования по

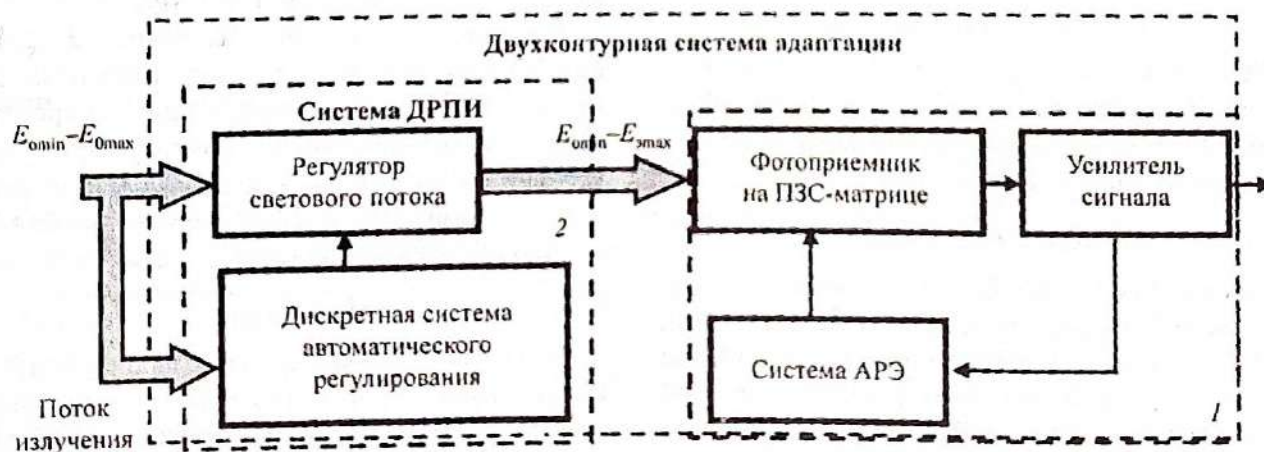


Рис. 3. Функциональная схема ОЭС с двухконтурной системой адаптации.

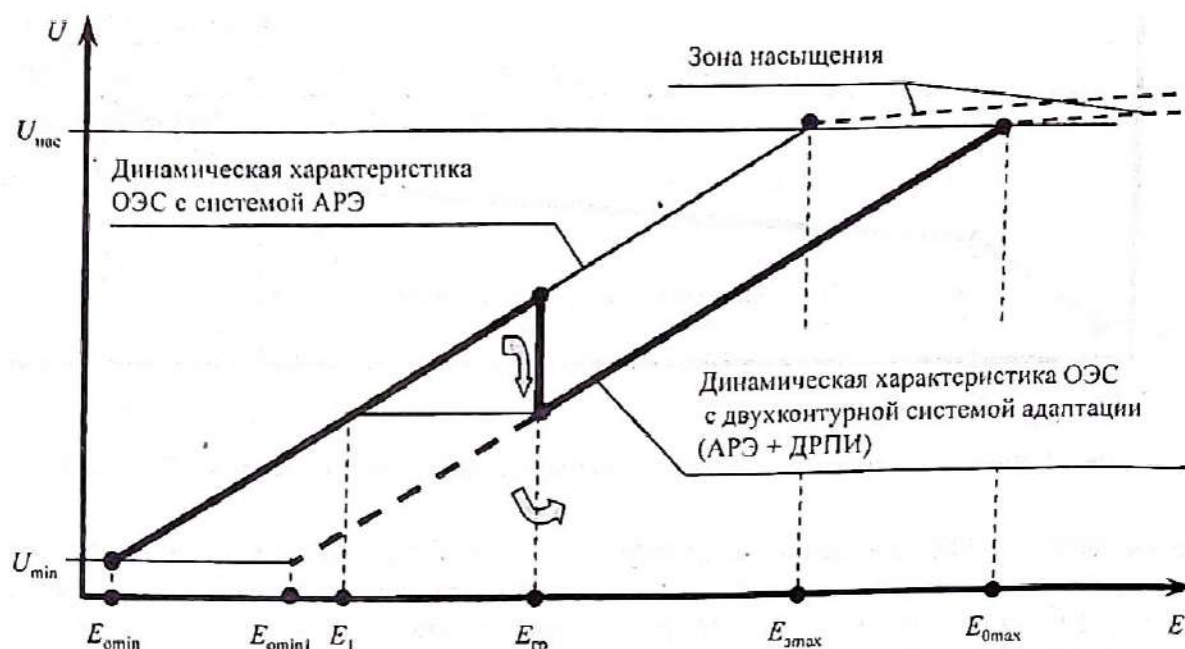


Рис. 4. Динамическая характеристика оптико-электронной системы с двухконтурной системой адаптации (АРЭ + ДРПИ).

скорости переключения и, следовательно, по характеристикам электромеханического привода и исполнительного механизма в целом для системы ДРПИ существенно ниже, чем в системах АРД и АРО.

Рассмотрим основные условия, которым должна удовлетворять система ДРПИ. Исходя из условия, что динамическая характеристика фотоприемника с системой АРЭ линейна, освещенность $E_{гр}$, при которой должно происходить ослабление потока излучения, может быть определена из выражения

$$E_{гр} = E_{\max} / N_0, \quad (1)$$

где N_0 — величина превышения максимальной освещенности $E_{0\max}$ над значением максимальной освещенности $E_{\max}$, при котором обеспечивается работа фотоприемника с системой АРЭ на линейном участке динамической характеристики.

Значение N_0 определяется из выражения:

$$N_0 = E_{0\max} / E_{\max}. \quad (2)$$

При включении режима ослабления потока излучения ОЭС должна оставаться в границах линейного участка своей динамической характеристики, т. е. должно выполняться условие:

$$E_{\min1} = E_{гр} < E_{0\max}. \quad (3)$$

Выполнение условия $E_{гр} \geq E_{0\max}$ означает, что динамический диапазон фотоприемника с системой АРЭ достаточен для обеспечения работы ОЭС во всем заданном рабочем диапазоне освещенностей и применения системы ДРПИ не требуется. Если $E_{гр} < E_{0\max}$, то применение системы ДРПИ при данном типе фотоприемника невозможно.

Изменение потока излучения в рассматриваемой системе происходит при дискретном изменении относительного отверстия объектива от значения Q_0 , обеспечивающего максимальную светосилу объектива, до значения Q_1 , необходимого для ослабления потока излучения в N_0 раз. Значение относительного отверстия объектива Q_1 может быть определено из выражения

$$Q_1 = Q_0 N_0^{-1/2}. \quad (4)$$

При срабатывании системы ДРПИ эквивалентные величины рабочей освещенности и минимальной освещенности для ОЭС изменяются соответственно от $E_{гр}$ до E_1 и от $E_{\min}$ до $E_{\min1}$ и становятся равными

$$E_1 = E_{гр} (Q_1 / Q_0)^2, \quad E_{\min1} = E_{\min} (Q_0 / Q_1)^2, \quad (5)$$

где Q_0 — максимальное относительное отверстие объектива, Q_1 — относительное отверстие объектива после срабатывания системы АРД.

Минимальная рабочая освещенность $E_{\min1}$, при которой обеспечивается заданное отношение сигнал/шум, определяется фотоприемником и средствами обработки информации, применяемыми в электронном тракте ОЭС. С учетом вышесказанного для реализации ОЭС с ДРПИ, помимо условия (3), должно выполняться условие

$$E_1 > E_{\min1}. \quad (6)$$

Оценка возможности реализации дискретной регулировки потока излучения для ТВ системы, использующей современные фотоприемники на ПЗС-матрицах, выполненных по технологии CCD (LZ2364BJ фирмы Sharp) и по технологии Exwavehad (ICX-

Таблица 1. Сравнительные характеристики параметров системы с использованием регулируемой диафрагмы для ослабления потока излучения

Тип ПЗС-матрицы	E_{omin} , лк, при $Q_0 = 1:2,0$	Диапазон АРЭ, с ($D_{\text{ОЭС}}$, раз)	$E_{\text{эmax}}$, лк	N_0 , раз	$E_{\text{гр}}$, лк	$Q_{\text{расч}}$	E_1 , лк, при $Q_1 = 1:5,6$	$E_{\text{ср(гр)}}$, лк, при $Q_0 = 1:5,6$
LZ2364BJ Sharp CCD	0,05	1/50–1/1,1×10 ⁵ (2,2×10 ³)	7,8×10 ⁴	1,3	60×10 ³	2,8	7,8×10 ³	0,4
ICX-259AL Sony Exwavehad	0,015	1/50–1/1,1×10 ⁵ (2,2×10 ³)	2,3×10 ⁴	4,3	5,35×10 ³	4,2	0,695×10 ³	0,12
ICX-249AL Sony Exwavehad	0,015	1/50–1/1,1×10 ⁵ (2,2×10 ³)	2,3×10 ⁴	4,3	5,35×10 ³	4,2	0,695×10 ³	0,12

259AL, ICX-249AL фирмы Sony), в заданном диапазоне освещенностей от E_{omin} до $E_{\text{omax}} = 10^5$ лк приведена в табл. 1.

Как видно из табл. 1, для ТВ системы, использующей современный фотоприемник на ПЗС-матрицах, возможна реализация системы дискретной регулировки потока излучения для обеспечения работы ТВ системы в заданном диапазоне освещенностей от E_{omin} , определяемой фотоприемником, до $E_{\text{omax}} = 10^5$ лк.

В системе ДРПИ с использованием нейтральных светофильтров постоянной плотности типа НС-7, вводимых в оптическую систему с помощью специального электромеханического привода при достижении заданного уровня освещенности $E_{\text{гр}}$ на местности, происходит ослабление светового потока в N_1 раз.

При применении одного нейтрального светофильтра НС-7 толщиной 3 мм обеспечивается ослабление N_1 светового потока в 2,8–3,2 раза. Для получения большего значения коэффициента ослабления целесообразно использовать два нейтральных светофильтра НС-7 толщиной 3 мм. При этом ослабление N_1 светового потока будет составлять 5,6–6,4 раза. Время срабатывания устройства ослабления потока излучения определяется конструкцией электромеханического привода и составляет 0,1–0,5 с.

Методика оценки параметров системы ДРПИ с использованием нейтральных светофильтров аналогична описанной выше. Результаты оценки при использовании тех же фотоприемников и в том же диапазоне освещенности приведены в табл. 2. Здесь E_1 – освещенность на входе фотоприемника после срабатывания системы ДРПИ, N_1 – ослабление све-

тового потока при введенном светофильтре. Из приведенных данных видно, что и при использовании двух нейтральных светофильтров постоянной плотности типа НС-7 возможна реализация системы ДРПИ.

Система адаптации для ОЭС без применения электромеханических устройств может быть реализована с применением специальных оптических фильтров переменной плотности, обратимо изменяющих пропускание в видимой области спектра в зависимости от освещенности и длительности облучения ультрафиолетовым или коротковолновым излучением видимого диапазона. После прекращения облучения пропускание стекла восстанавливается. Функциональная схема системы адаптации с оптическим фильтром переменной плотности приведена на рис. 5.

В качестве одного из вариантов реализации оптического фильтра переменной плотности можно рассмотреть применение фотохромных стекол [5]. Под действием активного излучения в светочувствительной фазе фотохромного стекла происходят конкурирующие процессы: с одной стороны, образование центров окраски (ЦО), а с другой, – термическое и оптическое разрушение ЦО. Результирующая этих процессов определяет скорость и степень потемнения стекла. После прекращения действия излучения сохраняется только процесс термического разрушения ЦО, вызывающий обесцвечивание стекла (релаксацию).

По существующей гипотезе поглощение ультрафиолетового излучения приводит к возникновению в светочувствительной фазе свободных носителей

Таблица 2. Сравнительные характеристики параметров системы с использованием нейтральных светофильтров для ослабления потока излучения

Тип ПЗС-матрицы	E_{omin} , лк, при $Q_0 = 1:2,0$	Диапазон АРЭ, с ($D_{\text{ОЭС}}$, раз)	$E_{\text{эmax}}$, лк	N_0 , раз	$E_{\text{гр}}$, лк	N_1 (min/max)	E_1 , лк, (max/min)	$E_{\text{omin(1)}}$, лк, (max/min)
LZ2364BJ Sharp CCD	0,05	1/50–1/1,1×10 ⁵ (2,2×10 ³)	7,8×10 ⁴	1,3	6,0×10 ⁴	5,6/6,4	10700/9380	0,28/0,32
ICX-259AL Sony Exwavehad	0,015	1/50–1/1,1×10 ⁵ (2,2×10 ³)	2,3×10 ⁴	4,3	0,535×10 ⁴	5,6/6,4	960/836	0,084/0,096
ICX-249AL Sony Exwavehad	0,015	1/50–1/1,1×10 ⁵ (2,2×10 ³)	2,3×10 ⁴	4,3	0,535×10 ⁴	5,6/6,4	960/836	0,084/0,096

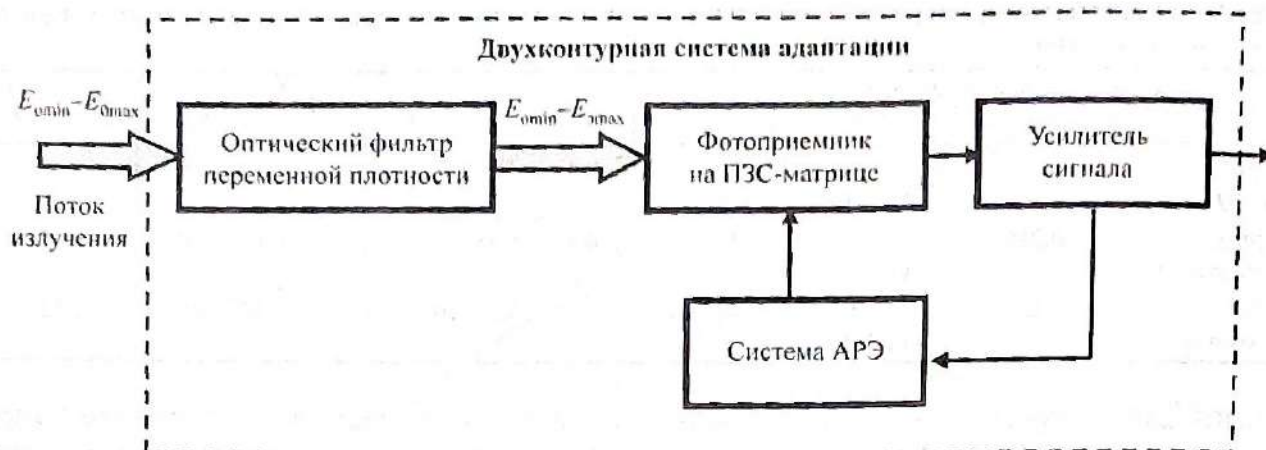


Рис. 5. Функциональная схема ОЭС с системой адаптации с применением оптического фильтра переменной плотности, обратимо изменяющего пропускание в зависимости от освещенности и длительности облучения.

заряда обоих знаков, локализация которых на электронных и дырочных центрах захвата образует соответственно электронные и дырочные ЦО. Предполагается, что за ЦО, дающие широкую полосу добавочного поглощения в области 500–600 нм, ответственны коллоидные частицы серебра Ag_n (для стекла марки ФХС4) и меди Cu_n (для стекол марок ФХС4, ФХС7).

Степень прозрачности оптического стекла оценивается оптической плотностью D , которая связана с величиной коэффициента пропускания τ уравнением:

$$D(\lambda) = \lg[1/\tau(\lambda)]. \quad (7)$$

Для m оптических поверхностей, разделенных воздушными промежутками, оптическая плотность D_m составляет

$$D_m(\lambda) = \sum_{i=1}^m D_i(\lambda). \quad (8)$$

Коэффициент пропускания m поверхностей оптического стекла, разделенных воздушными промежутками, составляет

$$\tau_m = (0,94-0,96)^m, \quad (9)$$

где $\tau = 0,94$ для стекол типа крон, $\tau = 0,96$ для стекол типа флинт.

Для качественных объективов коэффициент пропускания $\tau_{об}$ составляет от 0,8 до 0,85.

Результаты оценки коэффициентов ослабления светового потока K_Σ и освещенности на входе фотоприемника E_{0max}/K_Σ при применении различных типов фотохромных стекол с учетом коэффициента пропускания объектива $\tau_{об}$ приведены в табл. 3.

В табл. 3 применены следующие обозначения: D_0 – начальная оптическая плотность стекла, τ_0 – начальный коэффициент пропускания стекла, ΔD – приращение оптической плотности при воздействии светового потока, D_Σ – результирующее значение оптической плотности при воздействии светового потока, τ_Σ – результирующее значение коэффициента пропускания стекла при воздействии светового потока, K – коэффициент ослабления светового потока в фотохромном стекле, $\tau_{об}$ – коэффициент пропускания объектива, K_Σ – результирующее значение коэффициента ослабления светового потока в фотохромном стекле и в объективе прибора, d – толщина фотохромного стекла.

Время достижения указанных значений оптической плотности фотохромного стекла при воздействии потока излучения, близкого по спектральному составу к солнечному, из исходного (прозрачного) состояния составляет порядка 150–180 с. Время релаксации фотохромного стекла из затемненного

Таблица 3. Оценка ослабления светового потока и освещенности для разных типов стекол

Тип стекла	Кол-во стекол	D_0	τ_0	ΔD	D_Σ	τ_Σ	K , раз	$\tau_{об}$	K_Σ , раз	E_{0max} , лк
ФХС4	1 ($d = 5,0$ мм)	0,1	0,79	0,5	0,6	0,25	3,16	0,8	3,95	25 300
ФХС4	2 ($d = 10,0$ мм)	0,2	0,6	1,0	1,2	0,06	10,5	0,8	13,1	7600
ФХС7	1 ($d = 2,5$ мм)	0,11	0,77	0,12	0,23	0,59	1,3	0,8	1,63	61 350
ФХС7	2 ($d = 5,0$ мм)	0,22	0,6	0,24	0,46	0,35	1,7	0,8	2,1	47 600
ФХС7*	1 ($d = 2,5$ мм)	0,11	0,77	0,41	0,52	0,3	2,6	0,8	3,25	30 800
ФХС7*	2 ($d = 5,0$ мм)	0,22	0,6	0,82	1,04	0,09	6,7	0,8	8,4	11 900

* С учетом фотоиндуцированной добавочной плотности на длине волны $\lambda = 550$ нм при $t = 20$ °С.

Таблица 4. Экспозиционные характеристики стекла ФХС4

Плотность энергии импульса E , Дж/см ² ×10 ⁴	Оптическая плотность D_ϕ	Коэффициент пропускания τ_Σ
0,1	0,97	0,1
1,0	1,1	0,08
10	1,9	0,012
15	2,0	0,01

состояния до прозрачного состояния также составляет порядка 150–180 с.

Фотохромное стекло марки ФХС4 помимо ослабления светового потока солнечного излучения предназначено для защиты оптических систем от мощного импульсного излучения широкого спектрального состава. В табл. 4 представлены экспозиционные характеристики (оптическая плотность D_ϕ и коэффициент пропускания τ_Σ) стекла ФХС4 толщиной 5 мм в зависимости от плотности энергии импульса длительностью 1,5 мс.

Как видно из табл. 4, применение в оптическом тракте ОЭС фильтра переменной плотности обеспечивает необходимое ослабление потока излучения для работы ТВ системы в условиях повышенной освещенности до 100 000 лк на местности практически без ухудшения чувствительности ТВ системы в условиях пониженной освещенности.

В случае применения ПЗС-матриц типа LZ2364BJ фирмы Sharp по технологии CCD с чувствительностью 0,05 лк достаточно применение одного стекла ФХС7 (толщиной 2,5 мм) или ФХС4 (толщиной 5,0 мм). В случае применения ПЗС-матриц типа ICX-259AL, ICX-249AL фирмы Sony по технологии Exwavehad с чувствительностью 0,015 лк необходимо применение двух стекол ФХС7 (толщиной 2×2,5 мм) или ФХС4 (толщиной 2×5,0 мм). Кроме того, фильтр переменной плотности из фотохромного стекла ФХС4 способствует защите ОЭС от случайного или преднамеренного воздействия энергии импульсного источника излучения. Применение фильтра переменной плотности из фотохромного стекла ФХС7 обеспечивает необходимое ослабление потока излучения (более чем в 3 раза) только при проявлении эффекта фотониндуцированной добавочной плотности.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что применение двухконтурной системы адап-

тации, состоящей из фотоприемника на основе ПЗС-матриц с встроенной системой АРЭ и системы ДРПИ, обеспечивает адаптацию ТВ системы к изменению освещенности на местности от минимального значения, определяемого фотоприемником, до 100 000 лк. При этом требования к точностным и временным характеристикам функциональных узлов системы ДРПИ существенно ниже, чем к аналогичным узлам для известных систем АРД и АРО. Реализация системы ДРПИ может быть осуществлена либо путем дискретного изменения диафрагмы объектива на определенную величину при заданном пороге срабатывания, либо введением в оптический тракт нейтральных светофильтров постоянной плотности с заданным коэффициентом пропускания без изменения относительного отверстия объектива.

Использование в составе двухконтурной системы адаптации оптических фильтров переменной плотности, обратимо изменяющих пропускание в видимой области спектра в зависимости от освещенности и длительности облучения, выполненных из фотохромного стекла, является перспективным направлением для обеспечения работы ТВ систем с фотоприемниками на ПЗС-матрицах в широком диапазоне освещенностей, в том числе и при освещенности на местности до 100 000 лк, без применения дополнительных электромеханических приводов. Однако необходимо проведение дополнительных углубленных исследований с учетом поведения фотохромного стекла при изменении температуры окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушников Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 479 с.
2. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1987. 368 с.
3. Волков В.Г. Малогабаритные телевизионные системы. Обзор № 5591. М.: НТЦ Информтехника, 2000. 154 с.
4. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. 189 с.
5. Научно-технический отчет по НИР "Образ". Красногорск: НТЦ ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева", 2001.