

В. С. Маслов, В. Г. Румянцев,
Н. И. Сенова, Ю. М. Рыцарев

РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО АДАПТИВНЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ

Изложены научные основы построения и проектирования, рассмотрен ряд технико-физиологических аспектов человеко-машинных систем прямого видения — компонентов полуавтоматических комплексов различного назначения, автоматически адаптивных (по критерию “комфортность видения оператора”) к яркостным параметрам среды функционирования зрительного анализатора. Созданы и апробированы варианты интегрально адаптивных светофильтров.

E-mail: shlemm@yandex.ru

Ключевые слова: проектирование, построение, человеко-машинная система, фон, объект, наблюдение, видение, яркость, адаптация, светофильтр.

Актуальность адаптивности светотехники наблюдательных каналов человеко-машинных систем прямого видения. В человеко-машинных системах прямого видения (ЧМС ПВ), входящих, например, в состав полуавтоматических транспортных систем (ТС), комплексов вооружения военной и специальной техники (ВВСТ), для защиты зрительного анализатора (ЗА) их оператора (Оп) от слепящих яркостей внешнего (от фоноцелевой обстановки — ФЦО) света (\bar{L}_ϕ) в наблюдательном канале (НК) [в одноканальных ЧМС] и одновременно предъявляемой ему через информационный канал (ИК) служебной символично-графической информации (СГИ) [в двухканальных ЧМС] применяют, как правило, защитные светофильтры (СФ) с фиксированным или дискретно изменяемым по уровню \bar{L}_ϕ коэффициентом пропускания света в НК ($\tau_{\text{сф}}$) и индивидуальную регулировку яркости служебной информации ($\bar{L}_и$) в системе ее отображения (СОИ) — в информационном канале. Из-за оптического суммирования видеoinформации каналов в ЧМС ПВ второго типа (системах расширенной реальности) наблюдение СГИ оператором происходит на ФЦО [1, 2].

В современных условиях применения ТС и ВВСТ, характеризующихся большими (более трех порядков) диапазонами изменения входной для ЧМС ПВ яркости и ее частыми сменами, такие светофильтры вносят значительный дискомфорт в работу ЗА, снижая эффективность, надежность и безопасность деятельности оператора при выполнении текущих задач вплоть до их срыва. Поэтому столь актуальна задача разработки ЧМС ПВ, адаптивных к меняющимся, в том числе экстремальным, светотехническим условиям их функционирования [1–4].

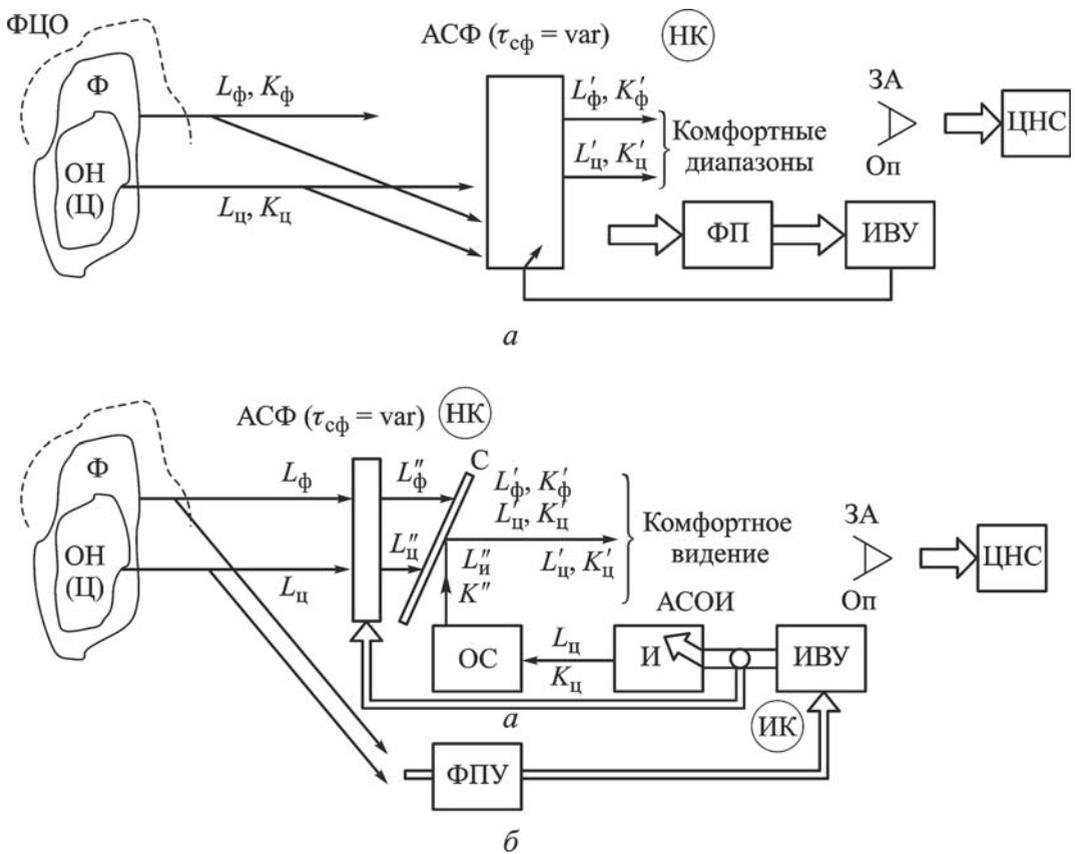


Рис. 1. Структурные схемы построения ЧМС ПВ:

a — одноканальная (с АСФ в НК); *б* — двухканальная (с АСФ в НК и АСОИ в ИК)

Попытки эмпирического решения этой задачи [2] посредством адаптивных СФ (АСФ), автоматически изменяющих $\tau_{сф}$ в зависимости от входной \bar{L}_ϕ до комфортных для ЗА значений L'_ϕ и K'_ϕ , оказались недостаточно успешными из-за отсутствия научно-методических основ системного проектирования и построения, излагаемых в настоящей статье.

На рис. 1, *a* изображена структурная схема наблюдательной ЧМС ПВ (с АСФ в наблюдательном канале), в которой дополнительно к приведенным использованы следующие обозначения: ЦНС — центральная нервная система Оп; ФПУ — фотоприемное устройство; ИВУ — информационно-вычислительное устройство. Известно, что прямая и обратная контрастности (K) определяются следующими выражениями [3]:

$$K = \frac{\bar{L}_\phi - \bar{L}_{он}}{\bar{L}_\phi}, \quad \bar{L}_\phi > \bar{L}_{он}; \quad K = \frac{\bar{L}_{он} - \bar{L}_\phi}{\bar{L}_{он}}, \quad \bar{L}_{он} > \bar{L}_\phi,$$

где \bar{L}_ϕ , $\bar{L}_{он}$ — интегральные (средние по площади изображения в ЗА) яркости фона (Φ) и объекта наблюдения — ОН (цели — Ц) .

В ЧМС ПВ контрастности оцениваются при уверенном наблюдении ФЦО оператором: контраст до 20 % — малый, до 50 % — средний и выше 50 % — высокий, а детали объекта наблюдения с угловыми размерами, соизмеримыми с разрешающей способностью глаза (одна угловая минута) различимы при 100 % контрастах [3–5].

Обеспечение баланса световых потоков от ОН (Ц) и Ф на зрачках глаз Оп при значительном диапазоне изменения яркости ФЦО концептуально решается посредством интегрально адаптивного светофильтра в НК, реализуемого на основе интеллектуализированного светомодулятора с электрически регулируемым $\tau_{сф}(= var)$. Для организации автоматического управления им используется оптико-электронная обратная связь, обеспечиваемая ФПУ и ИВУ, выдающими соответствующие напряжения на АСФ.

На рис. 1, б изображена структурная схема наблюдательно-информационной ЧМС ПВ, дополненная по сравнению с рис. 1, а ИК, реализующим яркостно адаптивную СОИ (АСОИ) введением [2, 5] через оптический полупрозрачный сумматор каналов (С), коллиматорную оптическую систему (ОС_и) и индикатор (И) в зрительный анализатор оператора обзорной и/или служебной информации с яркостью $L_{и}$ и контрастностью $K_{и}$.

Концепция проектирования и аспекты АСФ. Действительность (D) визуально-инструментального видения Оп — обобщенный показатель эффективности НК автоматизированных ТС и ВВСТ, их системных исследований и проектирования [2–5]:

$$D = f(V_i, N_j, F_{ij}) | \theta_k,$$

где V_i — управляемые переменные (технико-эргономические и инженерно-психофизиологические параметры видения); N_j — неуправляемые переменные (параметры Оп и воздействий); F_{ij} — взаимосвязь параметров V_i и N_j ; θ_k — ограничения на V_i и N_j . Обобщенная расчетная схема построения НК в ЧМС ПВ формулируется следующим образом [1, 2]:

$$\vec{A} \times \vec{C} = \vec{B}_{комф},$$

где \vec{A} — матрица описания яркостного ($\bar{L}_{ф}$) пространственно-временного распределения ФЦО; \vec{C} — матрица описания основных управляемых параметров АСФ в наблюдательном канале (в том числе $\tau_{сф}$); $\vec{B}_{комф}$ — область комфортных значений (ОК) — через матрицу описания яркостной чувствительности ЗА Оп. Более детально эта схема может быть отражена в виде:

ФЦО		АСФ		ЗА
$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix}$	\times	$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \dots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \dots & c_{2p} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \dots & c_{3p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{q1} & c_{q2} & c_{q3} & \dots & c_{qp} \end{vmatrix}$	$=$	$\begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1i} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2i} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & \dots & b_{3i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{j1} & b_{j2} & b_{j3} & \dots & b_{ji} \end{vmatrix}$ <div style="position: absolute; top: 10px; right: 10px; text-align: center;"> b₂₂ b₂₃ ... b_{2i} b₃₂ b₃₃ ... b_{3i} </div>

Наличие или синтез информации по математическим моделям \vec{A} и \vec{B} (с выделением $\vec{B}_{ок}$) позволяет ставить и решать важнейшую обратную задачу: получение математической модели \vec{C} (АСФ), которая в модели \vec{B} создает область комфортных условий функционирования ЗА (наблюдения и управления операторами ЧМС ПВ).

Принятая концептуальная идея заключается в переносе аппаратными средствами интегрально адаптивных светофильтров и системы отображения информации (АСФ и АСОИ) зрительной информации в НК и ИК из рабочих диапазонов светотехнических усредненных пространственно-временных параметров Φ и СОИ в психофизиологически комфортные для ЗА условия ее восприятия (ОК). Такой акцент на адаптацию видения оператором ЧМС ПВ позволяет при изложенном подходе создать научные основы исследований, разработать, промакетировать и апробировать эффективность интегральной (в пределах ОК) световой адаптации ЗА к ФЦО.

Важнейшей характеристикой НК в ЧМС ПВ является обнаружительная способность [2–4], т.е. достижение такой стадии зрительного восприятия Φ , когда Оп способен надежно и за короткий срок выделить ОН на Φ . Обнаружение характеризуется пороговым (самыми малым по значению и слабым по контрастности) изображением ОН, которое уже воспринимается ЗА Оп. Это минимальный стимул, нарушающий непрерывность Φ (шумового поля) и замеченный глазом — наименьшее из видимого. Его количественной оценкой служит минимально различимый угловой размер объекта наблюдения или отдельных деталей. Значение этого “порога” (δ_n) зависит от L_Φ и значения $K_{ц}$ ОН на нем. При фиксированных значениях контрастности ОН на Φ значения δ_n обратно пропорциональны L_Φ и уменьшаются при увеличении $K_{ц}$.

Диапазон воспринимаемых глазом значений яркости составляет от 10^{-7} до 10^{-5} кд/м², однако, психофизиологическая способность ЗА адаптироваться к средней яркости ФЦО (L_Φ) сокращает интервал одновременно различимых яркостей от 10:1 до 1000:1. В аспекте остроты зрения оптимальным уровнем адаптации ЗА считается яркость в пределах $L'_\Phi = 100 \dots 300$ кд/м², а темновая/световая адаптация от одного уровня средней яркости к другому происходит в течение определенного времени (до нескольких минут) [4].

Адаптивный СФ как единственный в НК и совмещенный с сумматором в наблюдательно-информационной ЧМС ПВ элемент оптического вооружения глаза Оп призван обеспечить комфортные условия видения ОН на Φ на всех стадиях наблюдения ФЦО (в том числе обнаружения ОН) с учетом возможного дефицита времени работы ЧМС ПВ в ТС/ ВВСТ. Поэтому проблема комфортности визуальных наблюдений в ЧМС ПВ должна решаться автоматическим, в зависимости от

значений яркости входного излучения, видоизменением оптической передаточной функции $W_{ACF}(j\nu_x, j\nu_y)$ фильтра-светомодулятора.

В наблюдательных и индикационных ЧМС ПВ, типичными представителями которых являются приведенные на рис. 1 их варианты для комплексов ТС/ВВСТ, в общем виде условия комфортного видения Оп в каналах прямого наблюдения ФЦО и индицируемой в ИК СГИ служебного и обзорного характера можно качественно описать следующим выражением:

$$\text{видение} = \text{зрение} + \text{освещение},$$

где *видение* — видимость в реальном масштабе времени ОН на Ф в НК и информации от СОИ в ИК; *зрение* — оптико-физиологические свойства ЗА Оп + оптические и светотехнические параметры машинной части (М) [оптической системы и индикаторного блока, скомплексированных в визирно-индикаторный блок (ВИБ) в двухканальной ЧМС ПВ]; *освещение* — светотехнические, пространственно-временные и спектральные характеристики ФЦО и СГИ [1, 2].

Из системного проблемно-ориентированного анализа [1–5] следует, что потребные характеристики приборной части ЧМС ПВ комплексов ТС/ВВСТ должны обеспечивать: 1) расширение рабочих диапазонов восприятия зрительной информации (по интегральным яркости ОН, Ф и СОИ); 2) повышение качества и надежности восприятия наблюдательной (от ОН) и служебной (СГИ от И) информации; 3) снижение уровней психофизиологической напряженности деятельности Оп; 4) сокращение времени реакции на интегральные изменения светотехнических параметров ФЦО и СОИ.

Методология энергетического проектирования ЧМС ПВ. Для обоснования работоспособности изложенной концепции АСФ и оценок ее потенциальной эффективности использован энергетический расчет соответствующих аспектов ЧМС ПВ. При проведении комплексных технико-эргономических и психофизиологических исследований ЧМС ПВ, определяющих в итоге энергетические параметры и конструктивные характеристики отдельных компонентов ВИБ наблюдательных и индикационных ЧМС ПВ, необходимо учитывать свойства зрения человека, которое, например, имеет широкий динамический диапазон световой чувствительности и может различать отдельные предметы при средней яркости Ф, лежащей в диапазоне $L_{\Phi} = 0,001 \dots 100000 \text{ кд/м}^2$, а в то же время при низких уровнях яркости окружающего пространства зрение имеет малую разрешающую способность и требует много времени для адаптации к внешним условиям [3, 4].

Высокие уровни яркости и контрастности ОН и Ф на входе ЧМС ПВ полуавтоматических комплексов ТС/ВВСТ позволяют реализовать

в ЗА их Оп высокое разрешение и хорошую цветопередачу, однако, при достижении предельных значений и длительном наблюдении они вызывают дискомфорт и излишнюю утомляемость Оп. Вследствие этого для ведения эффективного продолжительного и комфортного визуального анализа окружающего пространства в НК и наложенной на него СГИ из ИК воспринимаемая Оп интегральная яркость ОН/Ф и СГИ в выходных зрачках ВИБ, с которыми совмещаются входные зрачки Оп, должна лежать в пределах $L_{\text{комф}} = 100 \dots 250(400) \text{ кд/м}^2$ [2–5].

Видение индицируемой СГИ обеспечивается при достаточной разности между воспринимаемой яркостью отдельных символов $L_{\text{и}}$ и интегрально воспринимаемой яркостью фона $L_{\text{ф}}^{\text{и}}$ на экране И, т.е., контраст СГИ с И должен превышать пороговое значение (в настоящей статье рассматривается вариант с яркостью Ф экрана И $L_{\text{ф}}^{\text{и}} = 0$).

Исследованию зависимости разрешающей способности ($\delta_{\text{п}}$) или пороговой остроты зрения ($1/\delta_{\text{п}}$) от яркости фона, контраста и формы Он (Ц) посвящено много работ [2–5]. Так, для круглого объекта с угловым размером γ , соответствующим оптимальному угловому расстоянию между структурными элементами индикатора СОИ ТС/ВВСТ порядка $2'$, при средней яркости Ф $L_{\text{ф}} = 100 \text{ кд}^2$ значение порогового контраста составляет $K_{\text{п}} = -0,135$. Таким образом, исходя из необходимости обеспечения длительного и комфортного наблюдения оператором ФЦО и СГИ, в ВИБ ЧМС ПВ может быть определен диапазон, в котором должны лежать значения комфортно воспринимаемой в НК яркости ($L_{\text{комф}} = L'_{\text{ф}} + L'_{\text{и}}$), пороговый контраст ($K_{\text{п}}$) ОН на Ф — в НК, символов и знаков СГИ — в ИК на индикаторах СОИ.

Рассмотрим обобщенную (скомплексированную по каналам НК и ИК) схему одновременного наблюдения ОН, Ф и СГИ (см. рис. 1, б) для определения аналитических выражений, связывающих энергетические параметры элементов каналов ВИБ и компонентов структуры ЧМС ПВ второго типа, а ЧМС ПВ первого типа (см. рис. 1, а) можно рассматривать как частный случай, исключая описания компонентов ИК.

Для обеспечения комфортных для Оп уровней воспринимаемой им в НК яркости ФЦО в состав ЧМС ПВ в комплексах ТС/ВВСТ, как правило, вводится СФ, ослабляющий яркость $L_{\text{ф}}$ до комфортной $L'_{\text{ф}}$. В результате воспринимаемая Оп яркость ФЦО может быть вычислена по формулам вида

$$L'_{\text{ф}} = \tau_{\text{нк}} L_{\text{ф}} \quad (L'_{\text{ф}} = \tau_{\text{с}} L''_{\text{ф}}, \quad L''_{\text{ф}} = \tau_{\text{сф}} L_{\text{ф}}),$$

где $L_{\text{ф}}$ — яркость ФЦО при $L_{\text{ц}} \approx L_{\text{ф}}$; $L''_{\text{ф}}$ — яркость ФЦО, ослабленная СФ; $L'_{\text{ф}}$ — воспринимаемая через СФ яркость ФЦО; $\tau_{\text{сф}}$ — коэффициент интегрального пропускания СФ; $\tau_{\text{с}}$ — коэффициент пропускания сумматора; $\tau_{\text{нк}} (= \tau_{\text{сф}} \tau_{\text{с}})$ — коэффициент светопропускания НК.

При наблюдении оператором СГИ на яркостном Φ наблюдаемого пространства (L_Φ) воспринимаемая им яркость отдельных символов и знаков с индикаторов ИК, у которых яркость Φ экрана $L_\Phi = 0$, вычисляется как

$$L'_И = \tau_{ИК} L_И \quad (L'_И = \rho_c L''_И, \quad L''_И = \tau_И L'_И),$$

где $L_И$ — интегральная яркость элементов СГИ на экране И СОИ; $L''_И$ — яркость информации на И, ослабленная $ОС_И$; $L'_И$ — воспринимаемая с учетом ρ_c яркость элементов СГИ; $\tau_И$ — коэффициент интегрального пропускания $ОС_И$; ρ_c — коэффициент отражения С; $\tau_{ИК} (= \tau_И \rho_c)$ — коэффициент светопропускания ИК. Проведя несложные преобразования, получим выражение для определения наблюдаемого Оп в НК контраста СГИ:

$$K = -\frac{1}{\tau_{сф}} \cdot \frac{1}{k_\tau} \cdot \frac{L_И}{L_\Phi}, \quad (1)$$

где $k_\tau = \tau_{НК}/\tau_{ИК}$ — отношение коэффициентов светопропускания $ОС$ каналов НК и ИК.

Формула (1) позволяет провести оценочные вычисления светотехнических и энергетических параметров каналов ЧМС ПВ и характеристики ряда элементов $ОС$ ($АС\Phi$, $С$, $ОС_И$) их ВИБ. Очевидно, что для обеспечения необходимого значения K при высокой и непостоянной яркости Φ ЦО необходимо изменять $\tau_{сф}$ в диапазоне значений $\tau_{сф} \in [\tau_{сф}^{\min} \dots \tau_{сф}^{\max}]$, где $\tau_{сф}^{\min}$ и $\tau_{сф}^{\max}$ — соответственно минимальное и максимальное значения $\tau_{сф}$ СФ. При определении этих значений, а также рационального закона изменения $\tau_{сф}$ в зависимости от L_Φ необходимо учитывать, что в реальных условиях эксплуатации ЧМС ПВ комплексов ТС/ВВСТ, отличающихся наличием разнообразных раздражающих факторов, эмоциональных и физических нагрузок, значения контраста для уверенного различения и правильного восприятия СГИ должны быть больше, чем полученные в идеальных условиях наблюдения [3, 4]. Учитывая это обстоятельство, а также обратную зависимость остроты зрения от угловых размеров ОН, примем в первом приближении для расчетов параметров и характеристик светофильтра $K_{\min} = -1$. Вследствие того, что максимальное значение яркости отдельных символов и знаков СГИ определяется из характеристик выбранной для ТС/ВВСТ конкретной СОИ, можно оценить максимальное значение яркости СГИ, формируемой на экране индикатора:

$$L_И^{\max} = \frac{K_{\min} L_\Phi^{\max}}{\tau_{ИК}}, \quad (2)$$

где L_Φ^{\max} — максимальная яркость Φ ЦО, воспринимаемая Оп; K_{\min} — минимальный контраст, необходимый для уверенного различения и восприятия СГИ на Φ ЦО.

Из условия максимизации $\tau_{\text{сф}}$ при малых яркостях ФЦО ($\tau_{\text{сф}}^0$) для обеспечения возможности наблюдения Оп в ЧМС ПВ за ОН на ней получим выражение для характерного (граничного) уровня наблюдаемой яркости $\Phi L_{\text{ф}}^{\tau}$, превышение которого потребует уменьшения значения $\tau_{\text{сф}}$ за счет воздействия из ИВУ на светомодулятор АСФ. Для этого запишем уравнение вида $L_{\text{ф}}^{\tau} = \tau_{\text{сф}}^{\text{max}} \tau_{\text{с}} L_{\text{ф}}^{\tau}$ ($\tau_{\text{нк}}^{\text{max}} = \tau_{\text{сф}}^{\text{max}} \tau_{\text{с}}$), откуда с учетом (2) получаем аналитическое выражение для определения пороговой $L_{\text{ф}}^{\tau}$:

$$L_{\text{ф}}^{\tau} = - \frac{\tau_{\text{ик}} L_{\text{и}}^{\text{max}}}{K_{\text{min}} \tau_{\text{сф}}^{\text{max}} \tau_{\text{с}}}. \quad (3)$$

Описание функционального изменения $\tau_{\text{сф}}(L_{\text{ф}})$ при $L_{\text{ф}} \geq L_{\text{ф}}^{\tau}$ получается трансформированием (1) с подстановкой принятого значения контраста K_{min} :

$$\tau_{\text{сф}}(L_{\text{ф}}) = - \frac{1}{K_{\text{min}}} \frac{1}{k_{\tau}} \frac{L_{\text{и}}^{\text{max}}}{L_{\text{ф}}}.$$

Таким образом, двухдиапазонный закон изменения интегрального $\tau_{\text{сф}}$ (для обеспечения эффективного, продолжительного и комфортного наблюдения Оп ЧМС ПВ окружающей ФЦО и одновременно наложенной на нее СГИ из СОИ) имеет вид

$$\tau_{\text{сф}}(L_{\text{ф}}) = \begin{cases} \tau_{\text{сф}}^{\text{max}}, & L_{\text{ф}} \leq L_{\text{ф}}^{\tau}; \\ - \frac{1}{K_{\text{min}}} \frac{1}{k_{\tau}} \frac{L_{\text{и}}^{\text{max}}}{L_{\text{ф}}}, & L_{\text{ф}} > L_{\text{ф}}^{\tau}. \end{cases} \quad (4)$$

Из совместного анализа выражений (1) и (4) следует, что при выполнении условия $L_{\text{ф}} < L_{\text{ф}}^{\tau}$ и максимальной яркости СГИ $L_{\text{и}}^{\text{max}}$ контраст K увеличивается с уменьшением значений $L_{\text{ф}}$. Значит, для более уверенного восприятия предъявляемой Оп информации в ИК рост контрастности является положительным фактом. Однако слишком большое повышение яркости элементов СГИ на И СОИ может негативно отражаться на восприятии и анализе Оп самой ФЦО [2–4]. Поэтому при уменьшении значений средней яркости ФЦО ($L_{\text{ф}}$) в НК целесообразно уменьшать яркость экрана И ($L_{\text{и}}$), отображающего СГИ в ИК. Приняв контраст СГИ при высоких и низких яркостях $\Phi L_{\text{ф}}$ постоянным, получим составляющие функционального изменения яркости $L_{\text{и}}$ в НК от яркости $L_{\text{ф}}$ в ИК:

$$L_{\text{и}}(L_{\text{ф}}) = \begin{cases} -K_{\text{min}} \tau_{\text{сф}}^{\text{max}} k_{\tau} L_{\text{ф}}, & L_{\text{ф}} \leq L_{\text{ф}}^{\tau}; \\ L_{\text{и}}^{\text{max}}, & L_{\text{ф}} > L_{\text{ф}}^{\tau}. \end{cases} \quad (5)$$

Необходимо отметить, что выражение (5) справедливо лишь для значений $L_{\text{ф}} \geq 10 \dots 30 \text{ кд/м}^2$, а при более низких уровнях $L_{\text{ф}}$ значение

порогового контраста ($\delta_{\text{п}}$) ЗА резко увеличивается [3–5]. Следовательно, для уверенного восприятия оператором СГИ в ИК целесообразно прекратить уменьшение $L_{\text{и}}$ при достижении значения интегральной яркости ФЦО $L_{\text{ф}}^{\text{и}} \approx 30 \text{ кд/м}^2$. С учетом введенного ограничения окончательно получаем систему трехдиапазонных выражений, описывающих закон потребного изменения $L_{\text{и}}$:

$$L_{\text{и}}(L_{\text{ф}}) = \begin{cases} L_{\text{и}}^{\text{min}} = -K_{\text{min}}\tau_{\text{сф}}^{\text{max}}k_{\tau}L_{\text{ф}}^{\text{и}}, & L_{\text{ф}} < L_{\text{ф}}^{\text{и}}; \\ -K_{\text{min}}\tau_{\text{сф}}^{\text{max}}k_{\tau}L_{\text{ф}}, & L_{\text{ф}}^{\text{и}} \leq L_{\text{ф}} \leq L_{\text{ф}}^{\tau}; \\ L_{\text{и}}^{\text{max}}, & L_{\text{ф}} > L_{\text{ф}}^{\tau}. \end{cases} \quad (6)$$

Отметим, что выбирать пороговое значение $L_{\text{и}}^{\text{min}}$ нужно в зависимости от типовых параметров зрения наблюдателей и условий применения (ФЦО, среда ...) конкретных типов комплексов ТС/ВВСТ, возможных погрешностей изготовления ВИБ ЧМС ПВ, а для обеспечения регулировки его базового значения в схеме автоматического управления И (АСОИ) должна быть предусмотрена и ручная (индивидуальная) настройка этого параметра. Для автоподстройки энергетических параметров ИК в состав систем управления, изменяющих интегрально $\tau_{\text{сф}}$ (АСФ) и яркость экрана И (АСОИ), необходимо вводить фотометр, определяющий в пределах углового информационного поля ИК (β) среднюю по полю ФПУ (γ) яркость И ($L_{\text{и}}$), в том числе его СГИ.

Для получения оценок потенциальных числовых значений $\tau_{\text{сф}}$ и рациональной функциональной зависимости $\tau_{\text{сф}}(L_{\text{ф}})$ целесообразно воспользоваться типовыми энергетическими параметрами авиационных наблюдательно-информационных ЧМС ПВ (И на лобовом стекле/нашлемных систем): $\tau_{\text{нк}} \approx 0,3$; $\tau_{\text{ик}} \approx 0,2$; $K_{\tau} \approx 1,5$; $L_{\text{и}}^{\text{max}} \approx 750 \text{ кд/м}^2$; $K_{\text{min}} \approx 1$, $\tau_{\text{сф}}^{\text{max}} \approx 0,5$ и $\beta = 20^{\circ} \dots 40^{\circ}$. Подставив эти значения в (4)–(6), получим пример системы поддиапазонных выражений для закона изменения $\tau_{\text{сф}}(L_{\text{ф}})$ при типовых энергетических параметрах ВИБ ТС/ВВСТ:

$$\tau_{\text{сф}}(L_{\text{сф}}) = \begin{cases} 0,5, & L_{\text{ф}} \leq 1000 \text{ кд/м}^2; \\ \frac{1000}{L_{\text{ф}}}, & L_{\text{ф}} > 1000 \text{ кд/м}^2. \end{cases} \quad (7)$$

В результате анализа (7) выявили, что применение в составе ЧМС ПВ И с указанными параметрами каналов ее ВИБ без СФ или с изменяемым коэффициентом пропускания НК возможно только при яркостях ФЦО $L_{\text{ф}} \leq 1000 \text{ кд/м}^2$, а при $L_{\text{ф}} > 1000 \text{ кд/м}^2$

соблюдается обратно пропорциональная зависимость $\tau_{сф}$ от $L_{ф}$ (см. графическое изображение аналитической зависимости $\tau_{сф}$ от яркости ФЦО: $[\tau_{сф}(L_{ф})]$ в виде кривой 1 на рис. 2). В качестве компонента НК, снижающего воспринимаемую яркость ФЦО выступает и оптический сумматор каналов с $\tau_c = 0,5$ (см. рис. 1, б).

Таким образом, приведенными оценками показаны возможность и условия комфортного наблюдения СГИ в ЧМС ПВ посредством ВИБ на ФЦО за счет автоматической регулировки $\tau_{нк}$ (интегрального $\tau_{сф}$ в варианте электроуправляемого АСФ, установленного в НК) и автоматического управления яркостью экрана И в ИК в варианте АСОИ.

Следует отметить, что при максимальной яркости ФЦО $L_{ф}^{max} = 30000$ кд/м² необходимое значение $L_{и}$ экрана индикатора (СГИ на нем) составит $L_{и}^{max} = 22500$ кд/м², что практически нереализуемо на уровне современных и перспективных минидисплеев (даже при ретинальной индикации) [1–2]. Поэтому, по мнению авторов, общепринятый (в РФ и за рубежом) путь наращивания яркости И в СОИ ЧМС ПВ без АСФ и АСОИ — тупиковый.

Принципы, методы и средства построения светомодуляторов. Обоснованная и теоретически доказанная возможность интегральной и при этом автоматически управляемой модуляции световой энергии ФЦО в поле зрения Оп, характеризуемой в общем случае яркостным распределением по полю НК во времени и в пространстве, делает целесообразным рассмотрение альтернативных физических принципов электрически управляемых светомодуляторов АСФ. Системному анализу были подвергнуты их эффекты, структуры и параметры со следующим перечнем технико-экономических требований [2, 6]: 1) автоматическое управление $\tau_{сф}$; 2) работа на пропускание в видимом спектре и широком угловом диапазоне входного светового потока (от ФЦО); 3) реализация промежуточных значений $\tau_{сф}$ (серой шкалы) — для регулирования светового потока в АСФ; 4) значимый динамический диапазон глубины модуляции видимой яркости ФЦО; 5) малое время перехода от одного оптического состояния светомодулятора к другому, согласованное с инерционными характеристиками ЗА; 6) технологичность изготовления при приемлемых экономических затратах; 7) долговечность и надежность эксплуатации.

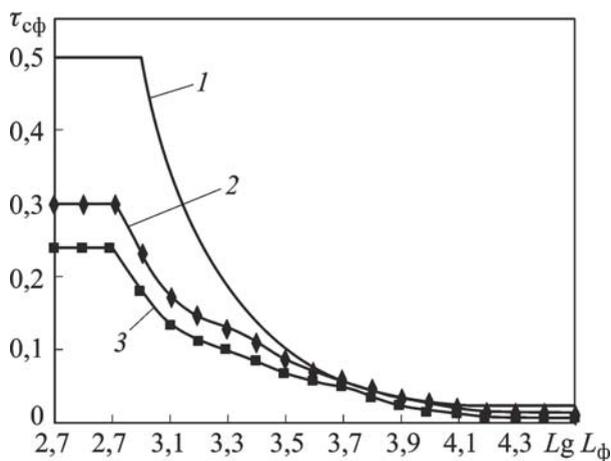


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициентов пропускания АСФ от яркости Ф:

1 — теоретическая; 2 и 3 — экспериментальные для АСФ-3 и АСФ-1

Физические эффекты, на основе которых принципиально можно строить с той или иной эффективностью модуляторы света для интегральных АСФ, условно делятся на следующие основные типы: 1) электро(фото)хромные и электрофоретические эффекты; 2) электрооптические эффекты в жидких кристаллах (ЖК); 3) электрооптические эффекты в иных (чем в пп. 1, 2) средах. При этом АСФ первых типов недостаточно адекватны по потребным диапазонам изменения $\tau_{\text{сф}}$ и по быстродействию их светомодуляторов, которое составляет лишь секунды [2–6]. Эффекты по п. 3 являются перспективными, но по комплексу технико-технологических характеристик таких светомодуляторов еще не совершенны (особенно по п. 7), что не позволяет пока использовать их для создания АСФ. Это заставило авторов настоящей работы обратиться к п. 2 — АСФ на современных электрооптических эффектах в ЖК (электроуправляемые — вращение плоскости поляризации света, двулучепреломление, рассеяние, дифракция, поглощение света и др.) [6].

Интегральные АСФ, основанные на эффектах в ЖК, в том числе капсулированных полимерных пленках, отличаются угловой зависимостью индикатрисы рассеяния, недостаточными глубиной модуляции и контрастом. Этим недостаткам лишен эффект электроуправляемого вращения плоскости поляризации падающего света в нематических ЖК (НЖК), имеющих следующие преимущества этого эффекта: низкие управляющие напряжения, высокое быстродействие, значительные углы обзора, диапазон регулировки $\tau_{\text{сф}}$ и малую потребляемую мощность, — поэтому этот эффект в НЖК взят авторами за основу построения АСФ.

Реализация и апробация вариантов управления НЖК в АСФ. Проработаны технико-эргономические решения вариантов построения АСФ и проведены сравнительные исследования НЖК-светомодуляторов с различными способами управления: 1) АСФ-1 с амплитудным управлением $\tau_{\text{сф}}(L_{\text{ф}})$ НЖК от аналогового электронного блока (ЭБ); 2) АСФ-2 с НЖК самокомпенсирующейся конфигурации с фазовым управлением от аналого-цифрового ЭБ $\tau_{\text{сф}}(L_{\text{ф}})$; 3) АСФ-3 с НЖК и ШИМ-управлением от цифрового ЭБ $\tau_{\text{сф}}(L_{\text{ф}})$. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) осуществлялась посредством синхронной регулировки длительностей минимального/максимального поперечного затемнения отдельно в двух окнах оптических модуляторов АСФ при фиксированной частоте переключений (~ 60 Гц) изменением скважности ШИМ с увеличением длительностей затемнения при возрастании яркости ФЦО.

Демонстрационные макеты АСФ-1, 2, 3 реализованы на интеллектуализированных светомодуляторах (с использованием указанных

НЖК + ЭБ). Они предназначены для поддержания постоянной освещенности $E'_ф$ зрачков ЗА Оп и обеспечивают за счет реализации для них входной яркости $L'_ф \approx \text{const}$ в НК ЧМС ПВ в условиях меняющихся отношений $L_{он}/L_ф$ [1, 2] постоянно комфортные светотехнические условия для ЗА Оп [3, 4] при вариациях интегральной, в том числе слепящей, яркости ФЦО. Макеты также использовались для верификации научных положений и апробации изложенных выше технико-технологических решений.

На рис. 3 для примера представлен демонстрационный макет ШИМ-управляемого АСФ-3, показавший лучшие по сравнению с образцами АСФ-1 и АСФ-2 параметры. Он включает в свой состав несущую конструкцию от стереочков ЗАО “Щит” с оголовьем, в которой закреплены два ЖК-светомодулятора (ЖКМ), фотоприемное устройство (ФПУ) с блендой ($\gamma = 20^\circ \dots 40^\circ$) на входе и ЭБ.

Входной световой поток от ФЦО в АСФ, построенный по схеме “циклоп”, одновременно попадает как в два окна наблюдения Оп [сквозь апертуру ЖКМ], так и на ФПУ [через бленду с угловым полем γ , полосовой фильтр и идентичный ЖКМ – ЖКМЭ]. ЖКМ позволяет попеременно управлять уровнями освещенностей $E'_ф$ на выходах окон наблюдения (на зрачках глаз Оп) в зависимости от уровня яркости ФЦО $L_ф$. Значения светового потока, достигающего в поле γ бленды апертуру ФПУ (с фотоприемником ФД-24), практически линейно связаны с значениями $L_ф$. Выходной сигнал ФПУ усиливается в ЭБ и поступает на вход блока ИВУ, выдающего на ЖКМ и ЖКМЭ управляющее напряжение U , реализуя обратно пропорциональную зависимость $\tau_{сф}(L_ф)$ в ЖКМ и АСФ в целом. Конструктивно-технологическая идентичность в АСФ угловых полей ИК (β) и ФПУ (γ), а также оптико-электронных параметров ЖКМ и ЖКМЭ создает одинаковость изменения уровней яркостей световых потоков на зрачках Оп и входе ФПУ при условии, что максимумы спектральных чувствительностей человеческого глаза и ФПУ реализованы близкими (в макетах – за счет оптического фильтра СЗС-21 в ФПУ).

Апробация функционирования и испытания макетов (АСФ-1, 2, 3) проведены на разработанном светотехническом стенде [2], позволяющем создавать посредством проектора ЕР-Х350 регулируемый компьютером световой по-



Рис. 3. Демонстрационный образец АСФ-3

ток 0...3500 лм на экране с диффузным покрытием и изменять в больших пределах яркость имитируемой ФЦО ($L_{\phi} = 0 \dots 30000$ кд/м²) на входе АСФ в типовых полях β и γ НК. Яркости и освещенности на входе и выходе АСФ измерялась цифровым яркомером-люксметром ЯРМ-3-БПРУ.

Зависимости $\tau_{сф}$ от яркости L_{ϕ} на входах АСФ-1 и АСФ-3, экспериментально полученные на их макетных образцах, приведены на рис. 2 (кривые 2 и 3). Характеристики для АСФ-2 не приводятся, так как из-за технологических погрешностей создания его НЖК не был обеспечен участок четкой обратно пропорциональной зависимости $\tau_{сф}(L_{\phi})$. Из рис. 2 следует, что значения $\tau_{сф}$ у АСФ-1 и АСФ-3 ниже теоретических (кривая 1), т.е. они отличаются меньшими значениями $\tau_{сф}(L_{\phi})$, но обратно пропорциональный характер зависимости $\tau_{сф}(L_{\phi})$ сохраняется аналогично теоретической кривой, хотя и при несколько меньших значениях L_{ϕ}^{τ} . Экспериментально установлено, что при увеличении (до 30000 кд/м²) внешней яркости L_{ϕ} величина $\tau_{сф}$ уменьшается в 150/300 раз (соответственно в макетах АСФ-1/АСФ-3), а значения освещенности ЗА составляют 70...250 лк. Более низкие значения $\tau_{сф}^{\max}$ (около 30% при малых значениях L_{ϕ}) связаны с поглощением и рассеянием света в поляроидах, электродах и светофильтрах НЖК.

Для измерения быстродействия АСФ использовались оптопары, а на их ЖКМ подавались управляющие импульсы в виде меандра с амплитудой 12 В. Время фотоотклика с ФПУ (ФД-24) регистрировалось осциллографом и составило $\sim 0,3$ мс и 2,5 мс для времени включения и выключения (релаксации) НЖК-ячеек, что удовлетворяет требованиям к современным ТС/ВВСТ по быстродействию АСФ их ЧМС ПВ (менее 0,2 с).

Таким образом, в результате корректного учета технико-эргономических требований к оптическому и информационному каналам ЧМС ПВ и психофизиологических особенностей ЗА Оп ТС/ВВСТ получены аналитические зависимости рациональных изменений коэффициента пропускания $\tau_{сф}$ в НК (от яркости падающего на АСФ светового потока от ФЦО) и коэффициента пропускания $\tau_{и}$ в ИК (от яркости СГИ в АСОИ). С их учетом созданы действующие на различных эффектах в ЖК-светомодуляторах и принципах управления демонстрационные макеты АСФ-1, 2, 3 и на специальном стенде изучены их электрооптические свойства.

Экспериментальная апробация макетных образцов АСФ и АСОИ подтвердила работоспособность предложенных методов их построения и технико-эргономических решений создания, показала целесообразность дальнейших работ по повышению их эксплуатационных параметров, приближению к теоретически обоснованным значениям

эксплуатационных характеристик АСФ, построенных на перспективных электрооптических эффектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системный подход к проектированию и созданию наслемной информационно-управляющей системы космонавта / В.С. Маслов, Н.И. Сенова, П.П. Долгов и др. // Пилотируемые полеты в космос: Тез. докл. 5-й МНПК. Звездный городок, 2003. – С. 41–42.
2. Адаптивный светофильтр наблюдательных и информационных систем космонавта / В.С. Маслов, Г.Д. Березин, Н.И. Сенова и др. // Пилотируемые полеты в космос: Тез. докл. 6-й МНПК. Звездный городок. 2005. – С. 20–21.
3. Г р а з и н Г. Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства. – Л: Машиностроение. 1988. – 224 с.
4. Х а ц е в и ч Т. Н. Физиологическая оптика: Учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 1988. – 704 с.
5. З а к а з н о в Н. П. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
6. Б л и н о в Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. – М.: Наука. 1975. – 384 с.

Статья поступила в редакцию 23.11.2011

Владимир Сергеевич Маслов окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник отдела НИИ “Информатика и системы управления”, доцент кафедры “Компьютерные системы и сети”. Автор более 150 научных работ в области человеко-машинных информационных и управляющих систем.

V.S. Maslov graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph. D. (Eng.), senior researcher, head of department of the Research Institute for Information Technology and Control Systems of the Bauman Moscow State Technical University, assoc. professor of “Computer Systems and Networks” department of the Bauman Moscow State Technical University Author of more than 150 publications in the field of man-machine information and control systems.

Владимир Григорьевич Румянцев окончил МФТИ в 1967 г. Канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер НИИ “Информатика и системы управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области жидкокристаллических материалов, модуляторов и дисплеев.

V.G. Rumyantsev graduated from the Moscow Institute of Physics and Technology in 1967. Ph. D. (Phys.-Math.), leading engineer of the Research Institute for Information Technology and Control Systems of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of liquid-crystal materials, modulators and displays.

Наталья Ивановна Сенова окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1976 г. Старший научный сотрудник НИИ “Информатика и системы управления”. Автор более 50 работ в области человеко-машинных и управляющих систем.

N.I. Senova graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1976. Senior researcher of the Research Institute for Information Technology and Control Systems of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of man-machine and control systems.

Юрий Михайлович Рыцарев окончил МФТИ в 1980 г. Научный сотрудник НИИ “Информатика и системы управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 30 научных работ в области оптико-электронных компонентов человеко-машинных систем.

Yu.M. Rytsarev graduated from the Moscow Institute of Physics and Technology in 1980. Researcher of the Research Institute for Information Technology and Control Systems of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 30 publications in the field of optic-electronic components of man-machine systems.