

УДК 621.384.326.3

Анализ воздействия излучателей видимого диапазона на работу электронно-оптических преобразователей III и III+ поколений, работающих в составе пилотажных очков ночного видения

© 2021 г. **Ю. К. Грузевич, канд. техн. наук; М. М. Паничев; А. Р. Хуснетдинов**

Научно-производственное объединение «ГЕОФИЗИКА-НВ», Москва

E-mail: artur.khusnetdinov@geo-nv.com

Поступила в редакцию 20.07.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-03-44-50

Рассмотрена проблема обоснования выбора элементной базы излучающих элементов для оборудования вертолетной авиации, совместимого с пилотажными системами ночного видения на основе электронно-оптических преобразователей III и III+ поколений. Получена математическая модель вычисления эквивалентной освещенности в плоскости фотокатода, создаваемой источниками кабинного светосигнального оборудования. На основании полученной модели и ресурсных характеристик электронно-оптических преобразователей III и III+ поколений проведен сравнительный анализ световой обстановки, создаваемой светосигнальным и светотехническим оборудованием, и ее влияния на ресурс их работы в зависимости от применяемой светоизлучающей элементной базы.

Ключевые слова: эквивалентная освещенность, электронно-оптический преобразователь, очки ночного видения, светоизлучающие диоды.

Коды OCIS: 040.3780, 230.0250, 230.3670

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач, связанных с обеспечением возможности пилотирования вертолетной техники в условиях естественной ночной освещенности посредством оснащения членов экипажа очками ночного видения (ОНВ), возникает ряд проблем из-за несоответствия спектральных и энергетических характеристик чувствительных элементов ОНВ и светосигнального (СС) и светотехнического оборудования (СТО) кабинных комплексов (КК) вертолетов [1].

В настоящее время в качестве чувствительных элементов ОНВ используются электронно-оптические преобразователи (ЭОП) III и III+ поколений, а в качестве штатных источников

излучения в составе СС и СТО — светоизлучающие диоды (СИД) видимого диапазона спектра электромагнитных волн зеленого, желтого, красного и белого свечения, а также оставшиеся до сих пор в эксплуатации сверхминиатюрные лампы накаливания (СМН) с цветовой температурой от 1800 до 2300 К.

Процедура приведения в соответствие спектральных и энергетических характеристик СС и СТО к условиям эффективной работы ОНВ называется адаптацией СС и СТО КК и на сегодняшний день выполняется как при серийном производстве СС и СТО, так и в процессе их доработок при проведении ремонтно-восстановительных работ.

Суть адаптации СС и СТО КК вертолетов на этапе их серийного производства заключается в использовании СИД с установленными стандартами спектральными характеристиками. Таким образом, излучение от СС и СТО должно располагаться в видимой области спектра и при этом не попадать в диапазон длин волн от 650 до 930 нм, т.е. в область чувствительности ЭОП в составе ОНВ, что позволит пилоту воспринимать визуальную информацию от СС и СТО, обладающую установленными стандартами координатами цветности и яркостями, а также иметь возможность обозревать внекабинное пространство. Такие СИД будем называть адаптированными, а все иные — неадаптированными.

Суть адаптации, проводимой отдельно от серийного производства СС и СТО, заключается в оснащении всех излучающих или распространяющих излучение элементов специальными светофильтрами, которые эффективно пропускают излучения видимой области спектра в диапазоне длин волн менее 650 нм и интенсивно поглощают в диапазоне остальных длин волн области чувствительности ЭОП III и III+ поколений в составе ОНВ. Это позволяет членам экипажа визуально воспринимать информацию на СС и СТО и обеспечивает безопасное пилотирование вертолета с применением ОНВ.

Однако проведение подобной адаптации для сконструированных и произведенных ранее вертолетов — мероприятие технологически трудоемкое и относительно дорогостоящее. Поэтому сегодня практически все авиационные заводы и конструкторские бюро перешли на разработку и серийное производство новых поколений СС и СТО, способных работать совместно с ОНВ без дополнительного оснащения специальными светофильтрами.

Настоящая статья посвящена анализу световой обстановки, создаваемой элементами СС и СТО, и ее влиянию на ресурс работы ЭОП в зависимости от применяемой элементной базы.

1. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ СС И СТО ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ С ОНВ НА ОСНОВЕ ЭОП III И III+ ПОКОЛЕНИЙ

Можно выделить три основных критерия, позволяющих оценить качество адаптации СС и СТО к работе с ОНВ [2].

1. Способность ОНВ при включенных СС и СТО сохранять свои характеристики по даль-

ности обнаружения и распознавания объектов в закабинном пространстве.

2. Способность ЭОП III и III+ поколений в составе ОНВ при включенных СС и СТО сохранять свои ресурсные характеристики,

3. Соответствие СС и СТО требованиям авиационных стандартов по координатам цветности.

Первый и второй критерии являются зависимыми и поэтому подлежат совместному рассмотрению. Строго говоря, первоочередным и наиболее объективным критерием является первый, однако на практике он является очень трудоемким и требует соблюдения ряда условий эксплуатации ОНВ на местности, поэтому применяется, как правило, только на этапе государственных испытаний новых типов вертолетов, оснащенных пилотажными ОНВ или новых типов пилотажных ОНВ. Целесообразно оперировать вторым критерием пригодности. Он корректен при рассмотрении ЭОП с «классическим» источником питания непрерывного типа, так как импульсные источники питания существенно продлевают ресурс работы ЭОП в условиях повышенных освещенностей, но не обеспечивают требуемых дальностей действия ОНВ для обеспечения безопасного пилотирования вертолетов и поэтому не применяются в современной практике оснащения членов их экипажей.

Вопрос соответствия источников излучения требованиям стандартов по координатам цветности в данной работе не рассматривается.

2. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ОСВЕЩЕННОСТЬ ФОТОКАТОДА ЭОП

Пусть некоторый излучатель создает на поверхности фотокатода (ФК) ЭОП эквивалентную освещенность E_{eq} , если под действием излучения этого источника с ФК возникает фототок I_{phC} такого же значения, что и под действием излучения источника типа A^1 , создающего на той же поверхности ФК действительную освещенность $E_A = E_{eq}$.

Следовательно, зная значения спектральной плотности излучения некоторого реального источника света $\varphi(\lambda)$, представляется возможным оперировать значениями визуаль-

¹ Источник типа А — газонаполненная лампа накаливания с коррелированной цветовой температурой излучения 2856 К.

ных фотометрических величин, заданных в нормативно-технической документации на ЭОП, и учитывать при этом энергетический спектральный состав падающего на ФК излучения и спектральную чувствительность ЭОП.

3. ДАННЫЕ О РЕСУРСАХ РАБОТЫ ТИПОВЫХ ЭОП III И III+ ПОКОЛЕНИЙ

Одним из важнейших параметров ЭОП является временной ресурс его работы в зависимости от освещенности на ФК. Обычно производители современных ЭОП приводят такие данные в табличной форме, удобной для проведения ресурсных испытаний, но непригодной для проведения разного рода расчетов. В статье предлагается использовать непрерывную характеристику — ресурсную кривую, приведенную на рис. 1.

Ресурсная кривая — это зависимость суммарного гарантированного изготовителем ресурса работы ЭОП в часах (при выполненных условиях продолжительности непрерывной работы) от значений постоянной эквивалентной освещенности на чувствительных участках ФК (в люксах).

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ФОТОКАТОДЕ ЭОП (В СОСТАВЕ ОНВ), СОЗДАВАЕМОЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ СС И СТО

При использовании пилотажных ОНВ на основе ЭОП III и III+ поколений для пилотирования вертолета имеем следующие исходные

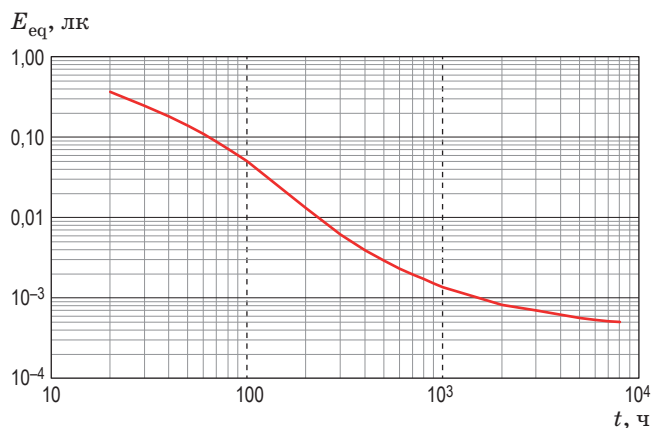


Рис. 1. Ресурсная кривая ЭОП III и III+ поколений.

данные для получения математической модели расчета эквивалентной освещенности на ФК ЭОП ОНВ, создаваемой излучением СС и СТО.

Характеристики источников излучения СС и СТО

— $\varphi_S(\lambda)$ — относительная спектральная плотность излучения одиночного источника. $\varphi_{LED}(\lambda)$ — для СИД, $\varphi_{lamp}(\lambda)$ — для СМН, $\varphi_{lamp, adapt}(\lambda) = \varphi_{lamp}(\lambda)\tau(\lambda)$ — для СМН с адаптирующим светофильтром, где λ — длина волны излучения, τ — коэффициент пропускания,

— A_S — средняя эффективная площадь излучающей поверхности одиночного источника (m^2),

— L — яркость излучающей поверхности одиночного источника ($кд/м^2$),

— r — среднее расстояние от излучающей поверхности одиночных источников на приборных панелях до входного зрачка объектива ОНВ (м).

Характеристики ОНВ на основе ЭОП III поколения

— $S_{NVG, rel}(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность ОНВ на основе ЭОП III и III+ поколений с учетом отрезающего фильтра на входном объективе,

— $S_{Gen3, max}$ — максимальное значение спектральной чувствительности ЭОП (А/Вт),

— A_{PhC} — эффективная площадь приемной поверхности ФК ЭОП (m^2),

— τ_{lens} — интегральный коэффициент пропускания объектива ОНВ,

— A_{EP} — площадь входного зрачка объектива ОНВ (m^2).

Характеристики для глаза пилота-наблюдателя

— $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения,

— $V_{max} = 683$ — световой эквивалент для глаза стандартного наблюдателя (лм/Вт) [3].

По определению интегральной чувствительности фототок связан с падающим энергетическим потоком от некоторого источника следующим соотношением [4]:

$$I_{PhC}^S = S_{Gen3} \Phi_{PhC}, \quad (1)$$

где S_{Gen3} — интегральная чувствительность ФК ЭОП с учетом пропускания входного объектива (А/Вт), Φ_{PhC} — интегральный энерге-

тический поток излучения, падающий на поверхность ФК (Вт).

Та же зависимость, выраженная через спектральные характеристики

$$I_{\text{PhC}}^{\text{S}} = S_{\text{Gen3}}^{\text{max}} \Phi_{\text{S}}^{\text{max}} \int_{380}^{980} S_{\text{NVG}}^{\text{rel}}(\lambda) \varphi_{\text{S}}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{S}}^{\text{max}}$ — максимум спектральной плотности потока излучения источника (Вт/мкм).

Из определения энергетической освещенности на ФК следует

$$\Phi_{\text{PhC}} = A_{\text{PhC}} E_{\text{PhC}}, \quad (3)$$

где E_{PhC} — интегральная энергетическая освещенность на ФК в зоне изображения источника (Вт/м²).

Тогда выражение (2) с учетом (3) примет вид

$$I_{\text{PhC}}^{\text{S}} = A_{\text{PhC}} S_{\text{Gen3}}^{\text{max}} E_{\lambda}^{\text{max}} \times \int_{380}^{980} S_{\text{NVG}}^{\text{rel}}(\lambda) \varphi_{\text{S}}(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где E_{λ}^{max} — максимум спектральной плотности энергетической освещенности на ФК от источника (Вт/(м² мкм)).

Максимум спектральной энергетической освещенности E_{λ}^{max} выразим из формулы освещенности по определению [5]

$$E_{\text{V,PhC}} = 683 E_{\lambda}^{\text{max}} \int_{380}^{980} V(\lambda) \varphi_{\text{S}}(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

С учетом этого преобразуем выражение (4)

$$I_{\text{PhC}}^{\text{S}} = A_{\text{PhC}} E_{\text{V,PhC}} \times \frac{S_{\text{Gen3}}^{\text{max}} \int_{380}^{980} S_{\text{NVG}}^{\text{rel}}(\lambda) \varphi_{\text{S}}(\lambda) d\lambda}{683 \int_{380}^{980} V(\lambda) \varphi_{\text{S}}(\lambda) d\lambda}. \quad (6)$$

Энергетический поток, прошедший через входной зрачок объектива, на расстоянии r от некоторого источника

$$\Phi_{\text{PhC}} = \tau_{\text{lens}} A_{\text{EP}} \frac{A_{\text{S}} L}{r^2} \cos \theta, \quad (7)$$

где θ — угол между направлением излучения и нормалью к поверхности источника излучения (примем $\theta = 0^\circ$).

Значит, освещенность на ФК определим как

$$E_{\text{V,PhC}} = \frac{\tau_{\text{lens}} A_{\text{EP}}}{A_{\text{PhC}}^L} \frac{A_{\text{S}} L}{r^2}, \quad (8)$$

где A_{PhC}^L — площадь на ФК, занятая изображением источника (м²).

Ток с фотокатода при освещении одиночным источником найдем, пользуясь выражениями (6) и (8)

$$I_{\text{PhC}}^{\text{S}} = \frac{A_{\text{PhC}} \tau_{\text{lens}} A_{\text{EP}} A_{\text{S}} L}{A_{\text{PhC}}^L r^2} \times \frac{S_{\text{Gen3}}^{\text{max}} \int_{380}^{980} S_{\text{NVG}}^{\text{rel}}(\lambda) \varphi_{\text{S}}(\lambda) d\lambda}{683 \int_{380}^{980} V(\lambda) \varphi_{\text{S}}(\lambda) d\lambda}. \quad (9)$$

Обратим внимание на отношение площади на ФК, занятой изображением источника, ко всей его площади.

Целесообразно ввести коэффициент

$$\mu = \frac{A_{\text{PhC}}^L}{A_{\text{PhC}}} \leq 1. \quad (10)$$

Данный коэффициент учитывает плотность заполнения площади ФК изображением источника. Опыт работы авторов показывает, что в среднем коэффициент заполнения $\mu = 0,071$. Это соответствует тому, что изображение источника занимает 1/14 часть площади ФК.

С учетом формулы (6) получим выражение для тока с ФК под действием источника типа А, создающего заданную освещенность E_{eq} ,

$$I_{\text{PhC}}^{\text{A}} = A_{\text{PhC}} E_{\text{eq}} \times \frac{S_{\text{Gen3}}^{\text{max}} \int_{380}^{980} S_{\text{NVG}}^{\text{rel}}(\lambda) \varphi_{\text{A}}(\lambda) d\lambda}{683 \int_{380}^{980} V(\lambda) \varphi_{\text{A}}(\lambda) d\lambda}. \quad (11)$$

Из определения освещенности, приравняв фототоки (9) и (11), получим окончательное выражение

$$E_{eq} = \frac{1}{\mu} \frac{\tau_{lens} A_{EP} A_S L}{A_{PhC} r^2} \times \frac{\int_{380}^{980} S_{NVG}^{rel}(\lambda) \phi_S(\lambda) d\lambda \int_{380}^{980} V(\lambda) \phi_A(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{980} V(\lambda) \phi_S(\lambda) d\lambda \int_{380}^{980} S_{NVG}^{rel}(\lambda) \phi_A(\lambda) d\lambda} \quad (12)$$

5. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ РЕСУРСА РАБОТЫ ЭОП В СОСТАВЕ ОНВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для расчета ресурса типовых ЭОП III и III+ поколений в составе современных пилотажных ОНВ в условиях работы при дополнительном световом воздействии различных источников излучения, применяемых в СС и СТО КК вертолета, использовано выражение (12) и данные спектральных измерений элементной базы.

Расчет эквивалентных освещенностей в плоскости ФК ЭОП проведен в условиях за-светки типовым сигнальным табло размером 24,3×11,3 мм на основе следующих типов источников излучения: адаптированных СИД различной цветности (табл. 1), адаптированных СМН со светофильтрами различной цветности и неадаптированных СИД различной цветности (табл. 2).

Дополнительно рассчитаны эквивалентные освещенности в плоскости ФК ЭОП, создаваемые адаптированным и неадаптированным полноцветными многофункциональными индикаторами (МФИ) на основе соответствующих СИД размером 170×107 мм с подсветкой на основе СИД белого, зеленого, желтого и красного свечения.

Для наглядности сравнения на рис. 2а–в приведены графики относительных спектральных характеристик трех типов источников излучения зеленого, желтого и красного цветов свечения и график относительной характеристики спектральной чувствительности ОНВ на основе ЭОП III и III+ поколений. На рис. 2г представлены графики относительных спектральных характеристик двух типов источ-

Таблица 1. Адаптированные светоизлучающие диоды

Наименование	Цвет излучения по описанию изготовителя	E_{eq} , лк
LXML-PE01	Сине-зеленый	$3,1 \times 10^{-6}$
LXML-PM01	Зеленый	$3,3 \times 10^{-6}$
ИПД162А9-Л	Зеленый	$3,7 \times 10^{-6}$
ИПД163А-Л	Зеленый	$2,1 \times 10^{-5}$
КИПД 86Б93-Л	Зеленый	$1,7 \times 10^{-6}$
LXHL-PL01	Желтый	$7,3 \times 10^{-5}$
LXML-PM01	Желтый	$6,9 \times 10^{-5}$
ИПД162А9-Ж	Желтый	$3,2 \times 10^{-5}$
ИПД163А-Ж	Желтый	$4,2 \times 10^{-5}$
КИПД 86Б93-Ж	Желтый	$4,5 \times 10^{-3}$
LXK2-PH12	Красно-оранжевый	$1,1 \times 10^{-3}$
LXM2-PH01	Красно-оранжевый	$1,2 \times 10^{-3}$
LXML-PH01	Красно-оранжевый	$5,8 \times 10^{-3}$
ИПД162А9-К	Красный	$9,5 \times 10^{-4}$
ИПД163А-К	Красный	$1,2 \times 10^{-3}$
LXHL-PW01	Белый 6500 К	$4,9 \times 10^{-3}$
LXML-PWC1	Белый 6000 К	$6,4 \times 10^{-3}$
ИПД162А9-Б-D8	Белый 7000 К	$3,9 \times 10^{-3}$
ИПД163А-Б	Белый 7500 К	$2,5 \times 10^{-3}$

Таблица 2. Адаптированные СМН со светофильтрами различной цветности и неадаптированные СИД различной цветности

Тип источника	E_{eq} , лк		
Цвет свечения источника	зеленый	желтый	красный
Адаптированная СМН	$1,5 \times 10^{-5}$	$8,0 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-3}$
Неадаптированный СИД	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-3}$

ников излучения белого света и график относительной характеристики спектральной чувствительности ОНВ на основе ЭОП III и III+ поколений. Приведенные графики построены по данным, полученным авторами на лабораторном оборудовании предприятия.

Опыт практической работы авторов с вертолетной техникой показывает, что в среднем

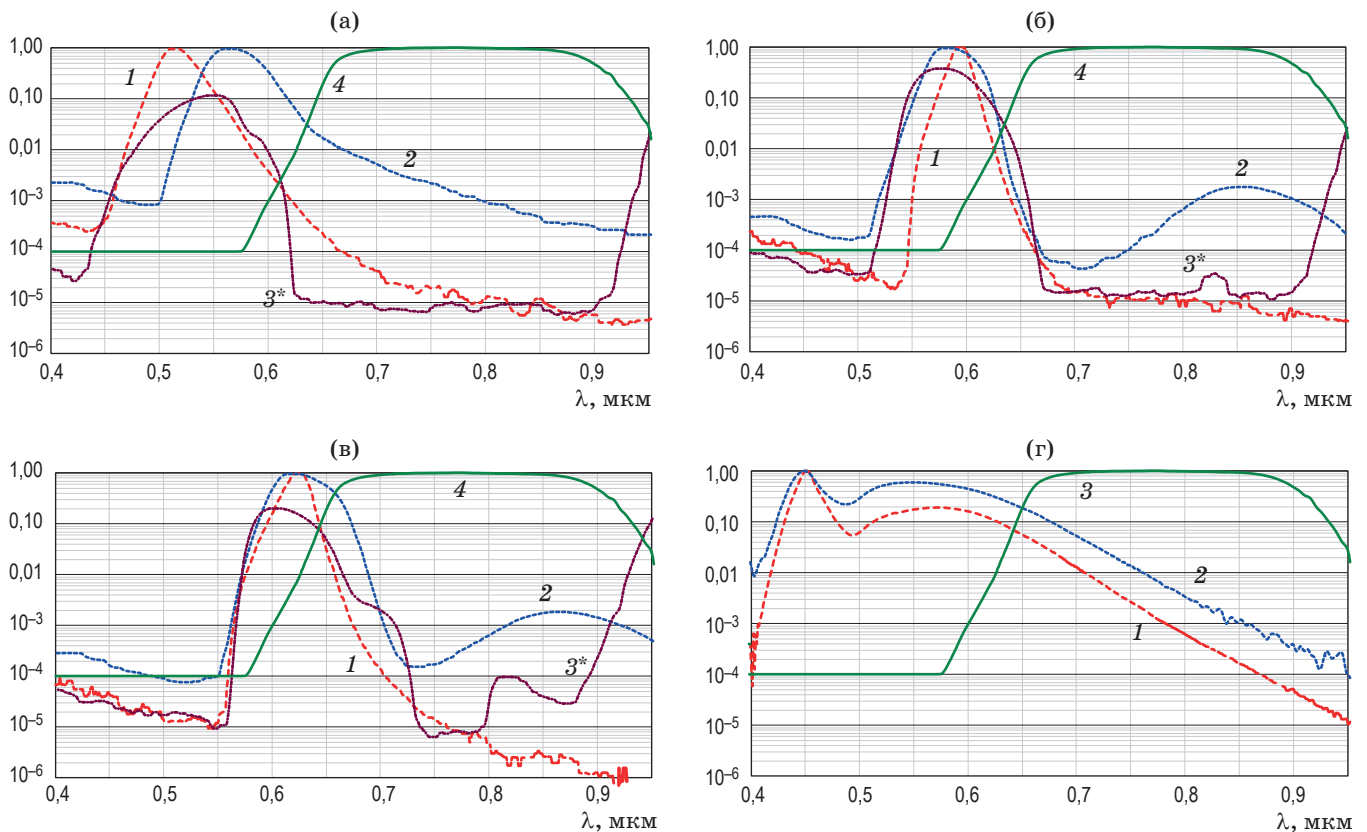


Рис. 2. Относительные спектральные характеристики источников излучения. (а) 1 — адаптированный светоизлучающий диод зеленого цвета, 2 — неадаптированный светоизлучающий диод зеленого цвета, (б) 1 — адаптированный светоизлучающий диод желтого цвета, 2 — неадаптированный светоизлучающий диод желтого цвета, (в) 1 — адаптированный светоизлучающий диод красного цвета, 2 — неадаптированный светоизлучающий диод красного цвета; 3* — лампа накаливания с цветовой температурой 2100 К за зеленым (а), за желтым (б), за красным светофильтрами (в), 4 — чувствительность ОНВ с учетом отсекающего фильтра на входном объективе (а–в); (г) 1 — адаптированный светоизлучающий диод белого света, 2 — неадаптированный светоизлучающий диод белого света, 3 — чувствительность ОНВ с учетом отсекающего фильтра на входном объективе.

*основной максимум спектральной характеристики располагается в области 1,4 мкм, толщина светофильтров подобрана из условия пропускания в видимой области не менее 20%.

на одном борту адаптируется до 400 источников зеленого свечения, 50 — желтого свечения и 15 — красного свечения.

При штатной ситуации в процессе пилотирования вертолета в угловом поле ОНВ в среднем по времени может находиться от 15 до 35 зеленых, от 2 до 3 желтых и не более 1 красного источника излучения. В кабинах, оборудованных МФИ, в угловом поле ОНВ могут находиться от 10 до 20 зеленых, от 1 до 2 желтых и не более 1 красного источника излучения, а также от 1 до 2 МФИ.

Расчет эквивалентных освещенностей от перечисленных выше элементов СС и СТО

проведен при уровне естественной ночной освещенности $E = 5 \times 10^{-3}$ лк, соответствующей фоновой освещенности на ФК ЭОП $E_{eq} = 5 \times 10^{-4}$ лк.

Результаты расчета эквивалентной освещенности в плоскости ФК ЭОП

– СС и СТО на базе адаптированных СИД

$$E_{eq\Sigma}^{LED,adapt} = 6,2 \times 10^{-4} - 1,7 \times 10^{-3} \text{ лк,}$$

– СС и СТО на базе СМН с адаптирующими светофильтрами

$$E_{eq\Sigma}^{Lamp,adapt} = 8,9 \times 10^{-4} - 3,5 \times 10^{-3} \text{ лк,}$$

– СС и СТО на базе неадаптированных СИД

$$E_{\text{eq}\Sigma}^{\text{LED}} = 2,3 \times 10^{-3} - 1,1 \times 10^{-2} \text{ лк},$$

– полноцветных МФИ с адаптированными СИД

$$E_{\text{eq}\Sigma}^{\text{MFD,adapt}} = 3,2 \times 10^{-3} - 6,9 \times 10^{-3} \text{ лк},$$

– полноцветных МФИ с неадаптированными СИД

$$E_{\text{eq}\Sigma}^{\text{MFD}} = 8,3 \times 10^{-3} - 2,2 \times 10^{-2} \text{ лк}.$$

На основе указанных выше значений эквивалентных освещенностей при использовании интерполированной ресурсной характеристики ЭОП III и III+ поколений (рис. 1) получены значения гарантированного непрерывного ресурса ЭОП III и III+ поколений в составе ОНВ в условиях безаварийного полета для следующих вариантов построения СС и СТО:

- СС и СТО на основе адаптированных СИД — не менее 950 ч,
- СС и СТО на основе адаптированных СМН — не менее 500 ч,
- СС и СТО на основе неадаптированных СМН — не менее 300 ч.

Таким образом, использование СС и СТО на основе адаптированных СИД увеличивает ресурс ЭОП по сравнению с СС и СТО на основе адаптированных СМН почти в 2 раза, а использование СС и СТО на основе неадаптированных СИД снижает ресурс ЭОП по сравнению с СС и СТО на основе адаптированных СИД более чем в 3 раза.

При этом включение в состав СС и СТО полноцветных МФИ на основе адаптированных СИД неминуемо снизит ресурс ЭОП почти в 2 раза, а при МФИ на основе неадаптированных СИД это снижение будет уже более 4 раз.

Выводы

Разработана методика расчета эквивалентной освещенности на ФК ЭОП, создаваемой элементами СС и СТО кабины вертолета, позволяющая оценивать гарантированный ресурс непрерывной работы типовых ЭОП III и III+ поколений в составе ОНВ при действии постоянных внешних засветок от источников света различного спектрального состава.

По данной методике проанализирован ресурс работы типовых ЭОП III и III+ поколений в составе ОНВ под действием СС и СТО, содержащих адаптированные и неадаптированные СИД, адаптированные светофильтрами СМН, адаптированные и неадаптированные полноцветные МФИ.

Полученные результаты расчетов позволяют утверждать, что при идентичных условиях эксплуатации современных ОНВ на основе ЭОП III и III+ поколений использование в составе СС и СТО вертолетов неадаптированных источников оптического излучения приводит к существенно большему снижению ресурса работы ЭОП III и III+ поколений в составе пилотажных ОНВ, чем применение соответствующих адаптированных источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грузевич Ю.К., Поздняков В.В., Хорохоров А.М. Исследование влияния светотехнического оборудования кабины вертолета на дальность действия пилотажных очков ночного видения // Вестник МГТУ. М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. С. 76–88.
2. Грузевич Ю.К. Оптико-электронные приборы ночного видения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 276 с.
3. Хорохоров А.М. Фотометрия. Законы теплового излучения: уч. пособие для уч. заведений. М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 42 с.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения: пер. с англ. / под ред. Горячева А.И. М.: Мир, 1978. 414 с.
5. Закаэнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем: учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.