



Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая
академия «Контенант»
Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ НАУЧНОЙ РОТЫ ВОЙСК ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОБОРОНЫ	3
Асулян А.Р. Разработка математических моделей бесконтактных мо- ментных двигателей приводов ориентации компактной аэ- рофотокамеры	4
Белоусов С.А. Комбинированный алгоритм поиска плагиата в исходных текстах программ	11
Буньков Д.С. Разработка алгоритма защиты от критических изменений напряжения питающей сети	15
Генжаев Ш.А. Анализ корреляции направления поляризации микроволнового реликтового фона и излучения квазаров ...	19
Дулов Д.В. Выбор управляющего флэш-контроллера для высокоско- ростного запоминающего устройства	21
Игнатьев К.С., Калугин Ю.А. Повышение ключевых характеристик основных узлов пер- спективных ИК зондировщиков высокого спектрального разрешения	24
Карандин А.В. Исследование путей создания имитатора динамической фоно-целевой обстановки	31
Патин Г.А. Инфракрасная панорамная аэрофотокамера	37
Патин Г.А., Карев А.В. Робототехническая система тактической разведки	41
Сероченков А.А. Исследование путей автоматизации оптико-электронных прицелов и систем управления огнем бронетанковой тех- ники на их основе	48
Хугаев Б.А. Модернизация датчика меток для балансировки роторных вибрационных гироскопов станка АТМ-001Х	52
Чурляев Ф.А. Создание контрольно-юстировочной служебной системы спутника дистанционного зондирования земли	56
Хуббиев Р.В. Разработка системы автоматического управления бескон- тактным моментным двигателем перспективного зонди- ровщика дистанционного зондирования земли	59



СОДЕРЖАНИЕ

(продолжение)

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ

Архипов С.А.

Термостабильность оптико-электронной съемочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Часть III. 69

Филатов А.В., Карпов В.В., Сусов Е.В., Кузнецов Н.С., Петренко В.И.

Фоторезисторы для тепловизионной техники и датчиков лазерного излучения из эпитаксиальных структур CdHgTe для области спектра 8-12 мкм 88

Карпов В.В., Козырев М.Е., Кузнецов Н.С., Ильин А.С., Марущенко А.В., Никологорский С.В.

Разработка микрокриогенных систем для фотоприемных устройств 95

Карпов В.В., Козырев М.Е., Кузнецов Н.С., Петренко В.И., Семенов В.И., Чиж К.В., Чишко В.Ф.

Разработка матричных и субматричных фотоприемных модулей второго поколения 102

СОЗДАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

И КОМПЛЕКСОВ

Томас Рефельдт

Инновационные направления деятельности фирмы FLP Microfinishing GmbH 110

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ НАУЧНОЙ РОТЫ ВОЙСК ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОБОРОНЫ

*«РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК В ИНТЕРЕСАХ ВОЙСК
ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОБОРОНЫ, ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ
ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА»*

Ежегодные научно-практические конференции операторов третьей научной роты Вокс ВКО традиционно проводятся на базе Научно-технического центра ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева» с участием членов «Общественной научно-технической академии «Контенант» в области оптических наук» и руководства Войск ВКО.

Научно-исследовательская деятельность операторов научных рот является важным элементом их становления, как высококвалифицированных специалистов, так и будущих офицеров.

Высокий уровень теоретической подготовки операторов, полученный в ведущих ВУЗах страны, подкрепленный практическими знаниями, полученными в процессе прохождения службы на базе Научно-технического центра ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева» неоднократно отмечен медалями и грамотами престижных научных конференций и выставок.

В июне 2015 года операторы третьей научной роты вместе с ПАО КМЗ приняли участие в Международном военно-техническом форуме «Армия-2015», где Президент России, Верховный Главнокомандующий ВС РФ В.В. Путин и Министр обороны России С.К. Шойгу ознакомились с перспективными разработками операторов третьей научной роты Войск ВКО, заслушали доклад оператора научной роты Д.В. Дулова, представлявшего свою разработку - электронный блок для аппаратуры ДЭЗ из космоса, в котором решена задача полного импортозамещения. По итогам форума третья научная рота награждена кубками за лучшую продукцию и разработки научных рот.



РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БЕСКОНТАКТНЫХ МОМЕНТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВОДОВ ОРИЕНТАЦИИ КОМПАКТНОЙ АЭРОФОТОКАМЕРЫ

АСУЛЯН А.Р. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Асулян А.Р.

Рассмотрены возможные варианты математического моделирования бесконтактных моментных двигателей безредукторных приводов ориентации компактной аэрофотокамеры. Произведён энергетический расчёт системы, выбор двигателей, разработка их полных и эквивалентных моделей. Полученные результаты исследований подтвердили возможность реализации данной приводной схемы для компактной аэрофотокамеры.

Ключевые слова: привод ориентации, бесконтактный моментный электродвигатель, математическое моделирование.

Системы ориентации являются неотъемлемой частью любой оптико-электронной системы, в задачи которой входит слежение за объектами наблюдения. Основой привода ориентации является электродвигатель, от параметров которого зависят параметры системы в целом. Бесконтактные моментные электродвигатели дают возможность реализации компактных, безредукторных приводов ориентации для оптико-электронных систем.

Математическое моделирование электродвигателей значительно упрощает процесс синтеза систем управления (СУ) электроприводами, погрешности в используемых моделях приводят к недостаточной точности получаемой СУ, из-за чего возникает необходимость в длительной калибровке системы и «ручном» подборе переменных параметров СУ, поэтому повышение точности моделирования является приоритетной задачей. Был рассмотрен способ реализации полной математической модели бесконтактного моментного двигателя высокого порядка и проведён сравнительный анализ с эквивалентной моделью двигателя постоянного тока.

ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОМПАКТНОЙ АЭРОФОТОКАМЕРЫ

Обоснование выбора двигателя стабилизированной платформы:

- приведённый момент инерции относительно вертикальной оси вращения: $0.04 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- момент трения: $0.03 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- максимальный динамический момент, необходимый для удовлетворения требований, предъявляемых к динамическим характеристикам привода:

$$M_H = J_{np} \varepsilon_{\max}$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{20 \cdot \pi}{180 \cdot 0.15} = 2.33 \text{ рад/с}^2$$

$$M_\partial = 0.04 \cdot 2.33 = 0.09 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

- Необходимый пусковой момент:

$$M_{\partial, \max} = M_H + M_{тр}$$

$$M_{II} = 0.09 + 0.03 = 0.12 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Тогда, требуемый пусковой момент двигателя будет:

$$M_{треб} = K_3 \cdot M_{II},$$

где K_3 – коэффициент запаса по моменту. В данном случае примем его равным 1,5:

$$M_{треб} = 1.5 \cdot 0.12 = 0.18 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- Предельно допустимый ток в обмотках: 12 А.

Таблица 1.
Паспортные данные двигателя ДБМ-70

Наружный диаметр статора, D	70
Внутренний диаметр ротора, d	35
Осевая линия, L не более	37
Число пар полюсов	8
Число фаз	2
Номинальное напряжение питания, В	27
Частота вращения при идеальном холостом ходе, об/мин	3000
Пусковой момент, Н·м не менее	0.8
Сопротивление секции фазы постоянному току при температуре 20°C, Ом	1.65
Электромагнитная постоянная времени фазы, мс не более	0.4
Приведённые к фазе коэффициенты: момента C_m , Н·м/А; ЭДС C_E , В·с/рад	0.10-0.12
Момент инерции ротора, кг·м ²	$0.6 \cdot 10^{-4}$
Момент сопротивления при обесточенных обмотках, Н·м не более	0.04
Предельно допустимая амплитуда тока в фазе обмотки статора, А	10
Термическое сопротивление статора, °С/Вт	0.85..1
Масса, кг не более	0.36
Электромеханическая постоянная времени (усреднённая), мс	22
Материал магнитов	самарий-кобальт

Данным требованиям удовлетворяет двигатель 2ДБМ70-0,16-1,5-2

Двигатели ДБМ изначально проектировались для создания на их основе малогабаритных безредукторных приводов. По типу электрической машины двигателя ДБМ относятся к классу вентильных электродвигателей. Конструктивно двигатель ДБМ представляет собой электрическую машину встраиваемого

типа (поставляется в виде двух отдельных компонентов – статора и ротора). При этом необходимое взаимное положение и крепление статора и ротора должно обеспечиваться конструкцией механизма, в который встраивается двигатель, что накладывает ограничение на использования данного типа двигателей в некоторых системах.

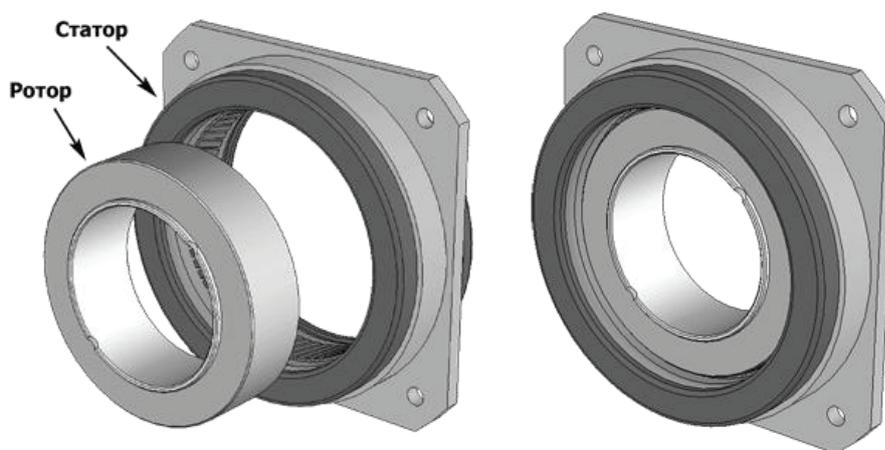


Рисунок 1.
Компоненты двигателя ДБМ-70 и двигатель в рабочем состоянии

**Допущения, принимаемые
при построении ММ**

При получении математических моделей электроприводов постоянного тока приходится учитывать ряд гипотез и предположений. При упрощенном исследовании электродвигателей постоянного тока с использованием линеаризованных математических моделей обычно принимают следующие допущения:

– поток возбуждения машины постоянен во всех режимах работы двигателя, которые будут проанализированы с помощью создаваемой модели;

– сопротивление и индуктивность не зависят от значения тока возбуждения, тока якорной цепи и других факторов и считаются неизменными;

– преобразователь, питающий двигатель, рассматривается как идеальный источник и его внутреннее сопротивление и индуктивность учитываются эквивалентными параметрами, определяющими электромагнитную постоянную времени якорной цепи электропривода;

– момент инерции привода не зависит от параметров его движения.

– падением напряжения под щётками ротора пренебрегаем.

**Разработка математической модели
двигателя ДБМ-70**

Бесконтактные моментные электродвигатели серии ДБМ предназначены для работы в локально замкнутой (с датчиками положения ротора) или разомкнутой по углу системам регулирования и находят широкое применение в следующих областях: быстродействующих программных или следящих системах и системах угловой стабилизации высокой точности с динамической ошибкой 1-3 угловых минуты и менее (обычно в безредукторном исполнении); системах автоматического управления различного назначения в редукторном или безредукторном исполнении повышенной надежности и срока службы, в том чис-

ле, работающих в особо тяжелых условиях эксплуатации; исполнительных системах управления роботов и манипуляторов; приводе лентопротяжных механизмов звуко- и видеозаписывающей аппаратуры, а также устройствах внешней памяти ЭВМ и т. п.; в медицинском приборостроении (аппаратах искусственной почки, аппаратах принудительного кровообращения, перистальтических насосах, где предъявляются повышенные требования к уровню шума, уровню пульсаций вращающего момента и т.п.); в микробиологической, химической и пищевой промышленности для передачи вращающего момента через размещаемую в воздушном зазоре между ротором и статором герметичную перегородку в замкнутую полость с агрессивной жидкостью или в вакуум; товарах культурно-бытового назначения (стиральные машины, кухонные комбайны и т. п.); приводах мотор-колес электрифицированных транспортных средств, а также в качестве генераторов, например в ветросиловых установках, для создания регулируемой нагрузки в велотренажерах и т. д.

Двигатели серии ДБМ выпускаются в двух исполнениях: с гладким (беспазовым) и пазовым статором. Гладкий (беспазовый) статор, с двухслойной петлевой обмоткой, расположенной непосредственно в воздушном зазоре, позволяет обеспечить: отсутствие реактивного остаточного момента сопротивления и пульсаций вращающего момента, им вызываемых; малые электромагнитные постоянные времени обмоток.

Пазовый статор с двухслойной петлевой обмоткой, уложенной в пазы сердечника, позволяет обеспечить: более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре, чем в двигателях с гладким статором, и соответственно более высокую статическую добротность; меньшую электромеханическую постоянную времени, чем у двигателей с гладким статором.

Уравнения равновесия ЭДС в обмотках статора и моментов на валу записываются в виде:

$$\begin{aligned}
U_\alpha &= R i_\alpha + \frac{d\psi_\alpha}{dt}, \\
U_\beta &= R i_\beta + \frac{d\psi_\beta}{dt}, \\
J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H.
\end{aligned} \quad (1)$$

В уравнениях (1) $U_\alpha, U_\beta, i_\alpha, i_\beta$ - проекции мгновенных значений напряжения и тока статора на оси α и β , R - сопротивления статорных обмоток, $\omega_m, M, M_H, \theta_m$ - механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала, J - момент инерции ротора.

В уравнениях (1) потокосцепления по неподвижным осям α, β находятся из выражений:

$$\begin{aligned}
\psi_\alpha &= L_\alpha i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta + \psi_{0\alpha} = L_\alpha i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta + \Phi_0 \cos \theta, \\
\psi_\beta &= L_{\alpha\beta} i_\alpha + L_\beta i_\beta + \psi_{0\beta} = L_{\alpha\beta} i_\alpha + L_\beta i_\beta + \Phi_0 \sin \theta.
\end{aligned} \quad (2)$$

где Φ_0 - поток, созданный постоянным магнитом ротора на пару полюсов.

Если пренебречь насыщением стали, то выражения для собственных индуктивностей и взаимной индуктивности имеют вид:

$$\begin{aligned}
L_\alpha &= \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta, \\
L_\beta &= \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta, \\
L_{\alpha\beta} &= \frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta.
\end{aligned} \quad (3)$$

где L_d, L_q - индуктивность обмотки статора по продольной и поперечной оси.

С учетом уравнений (1), (2), (3) полное описание синхронной магнитоэлектрической машины в неподвижной системе координат запишется в виде:

$$\begin{aligned}
U_\alpha &= R_1 i_\alpha - (L_d - L_q) \omega \cdot \sin 2\theta \cdot i_\alpha + \left(\frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_\alpha}{dt} + \\
&+ (L_d - L_q) \omega \cdot \cos 2\theta \cdot i_\beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \cdot \frac{di_\beta}{dt} - \Phi_0 \omega \sin \theta, \\
U_\beta &= R_1 i_\beta + (L_d - L_q) \omega \cdot \cos 2\theta \cdot i_\alpha + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \cdot \frac{di_\alpha}{dt} + \\
&+ (L_d - L_q) \omega \cdot \sin 2\theta \cdot i_\beta + \left(\frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_\beta}{dt} + \Phi_0 \omega \cos \theta, \\
M &= p \frac{m}{2} \left[\frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta \cdot (i_\beta^2 - i_\alpha^2) + (L_d - L_q) \cos 2\theta \cdot i_\alpha i_\beta + \Phi_0 \cos \theta i_\beta - \Phi_0 \sin \theta i_\alpha \right].
\end{aligned} \quad (4)$$

$$J_{\text{пр}} \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m, \quad \omega = p\omega_m, \quad \theta = p\theta_m$$

где $p=8$ - число пар полюсов, $m=2$ - число фаз в машине.

Уравнения (4) описывают синхронную магнитоэлектрическую машину с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре. Для того, чтобы из этих уравнений получить уравнения ВД необходимо связать

напряжения на статоре ВД с углом поворота ротора, который определяется сигналом с ДПР.

В этом случае напряжения U_α, U_β должны зависеть от начальной установки датчика положения ротора и от угла поворота ротора и определяться выражениями:

$$U_\alpha = U_1 \cos(\theta + \theta_0), \quad U_\beta = U_1 \sin(\theta + \theta_0), \quad (5)$$

где U_1 амплитуда первой гармоники напряжения на выходе инвертора.

РАСЧЕТНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (МЕХАНИЧЕСКАЯ ДЛЯ НОМИНАЛЬНОГО МОМЕНТА)

Далее приведена рассчитанная по полученной математической модели механическая характеристика двигателя.

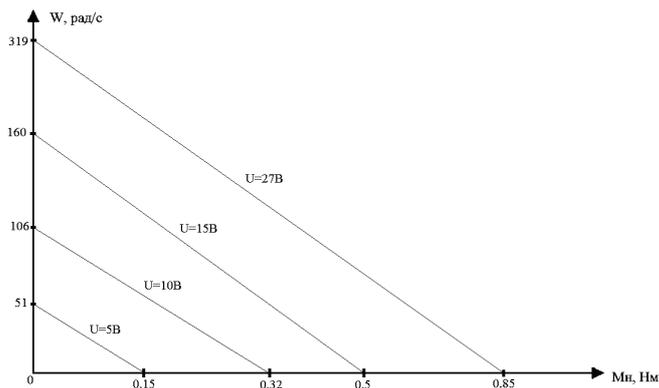


Рисунок 2.

Расчётная механическая характеристика двигателя ДБМ-70

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК (ПАСПОРТНЫЕ ДАННЫЕ И РАСЧЕТ ПО ПОЛНОЙ МОДЕЛИ)

Полная модель двигателя ДБМ-70 имеет вид (рис. 3):

Параметры модели:

$R = 1.65 \text{ Ом};$

$T = 0.4 \text{ мс};$

$C_m = 0.12 \text{ Н·м/А};$

$J_i = 0.6 \cdot \text{кг·}$

$C_e = 0.1 \text{ В·с/рад.}$

$P = 8;$

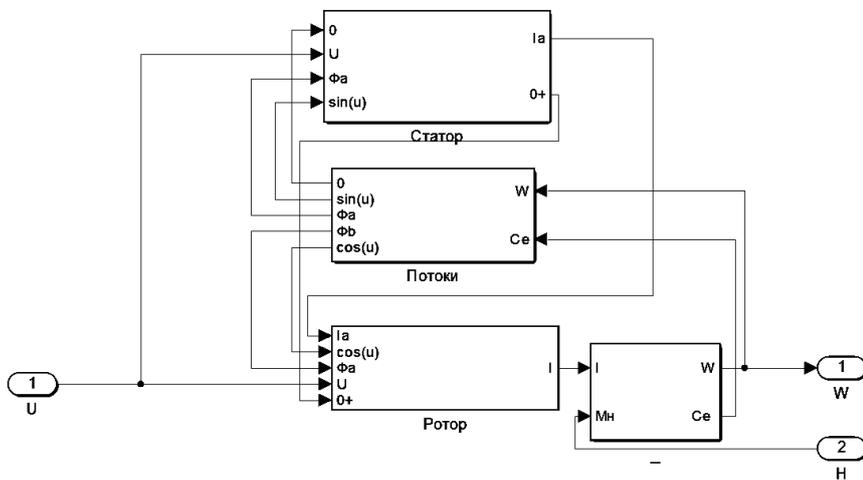
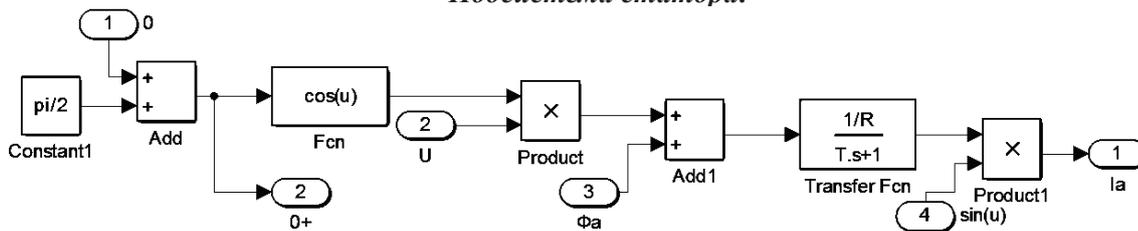


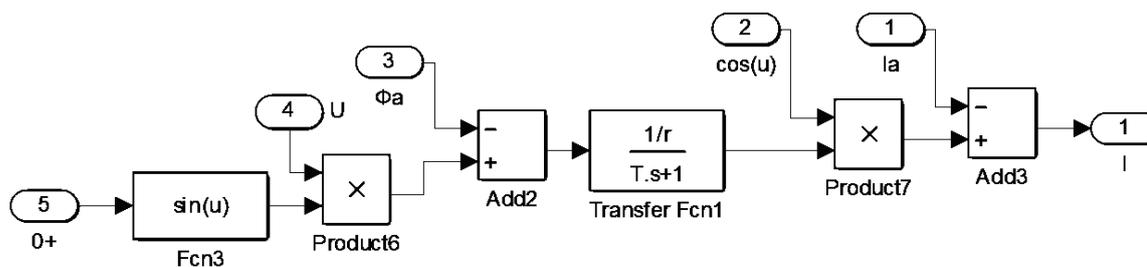
Рисунок 3.

Модель ДБМ-70

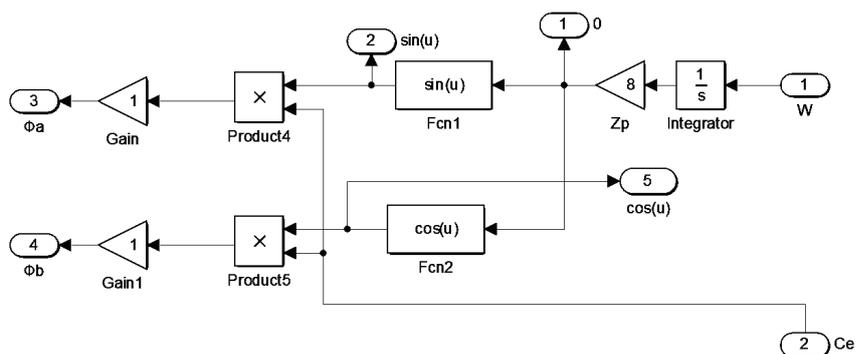
Подсистема статора:



Подсистема ротора:



Потокоцепление:



Механическая часть и противо-ЭДС:

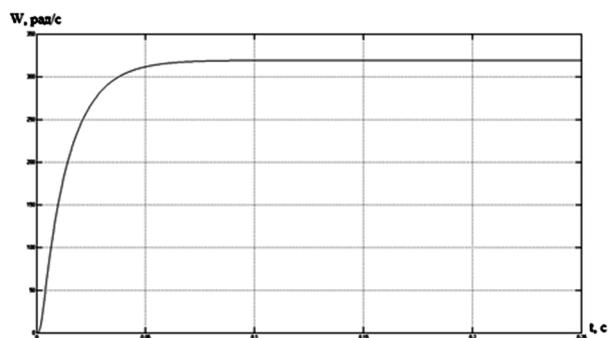
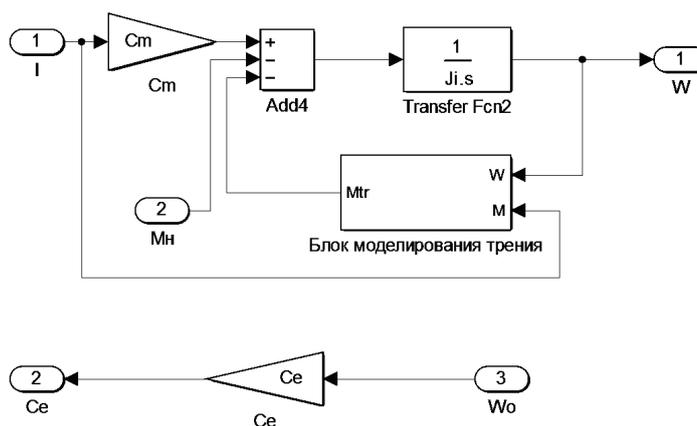


Рисунок 4.

Разгон двигателя на холостом ходу

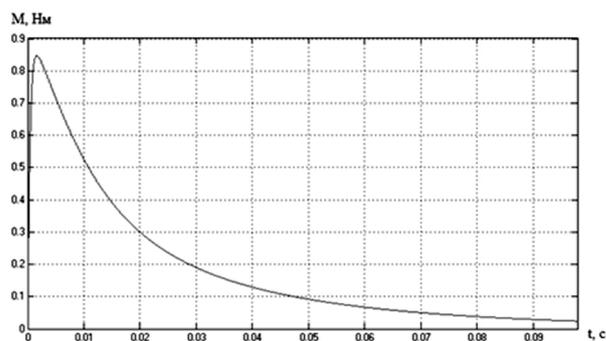


Рисунок 5.

Пусковой момент двигателя

Частота вращения при идеальном ХХ:
Паспортные данные – 3000 об/мин
Полная модель – 319 рад/с = 3047 об/мин

Пусковой момент:
Паспортные данные – 0.8 Нм
Полная модель – 0.84 Нм

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ МОДЕЛЬ (АНАЛОГ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА)

Для упрощения синтеза и проверки корректности работы полной мат. Модели двигателя была составлена упрощенная модель, представляющая из себя аналог двигателя постоянного тока.

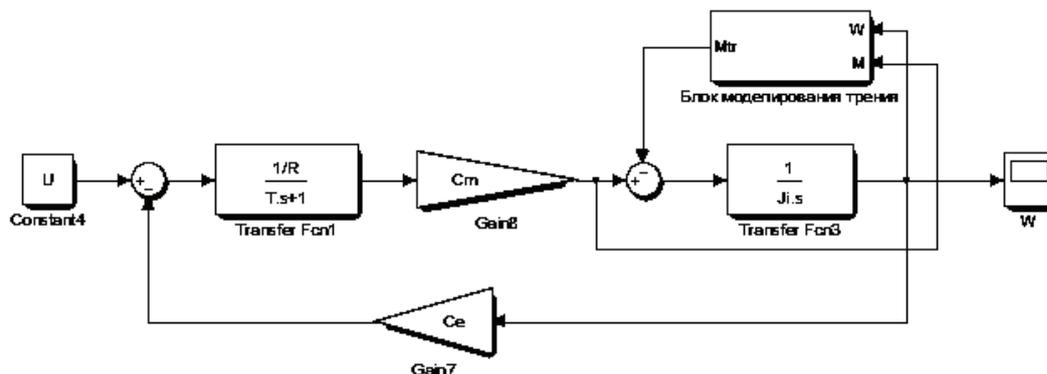


Рисунок 6.

Эквивалентная модель ДБМ-70

Где:

$R = 1.65 \text{ Ом};$

$T = 0.4 \text{ мс};$

$C_m = 0.12 \text{ Н·м/А};$

$J_i = 0.6 \cdot \text{кг}$

$C_e = 0.1 \text{ В·с/рад}.$

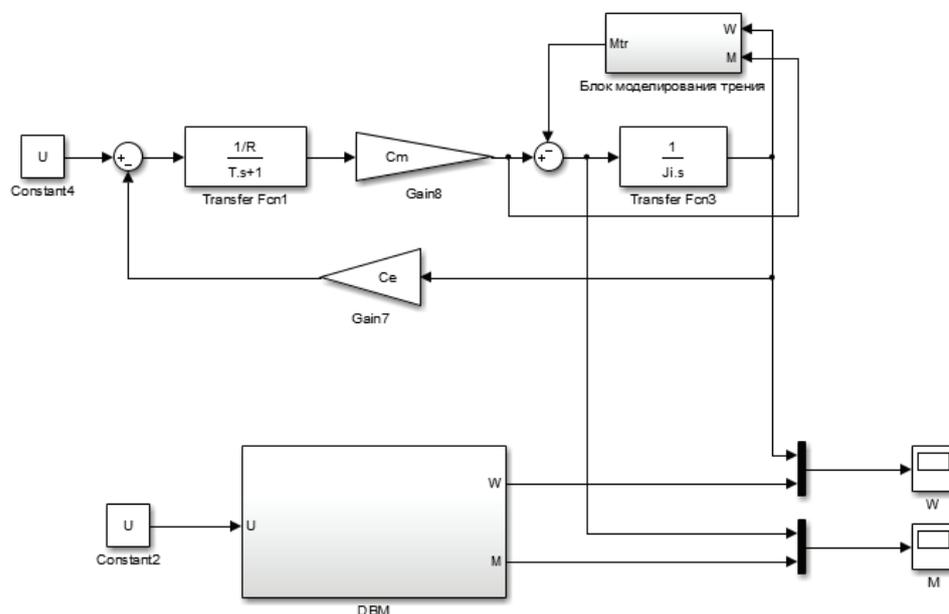
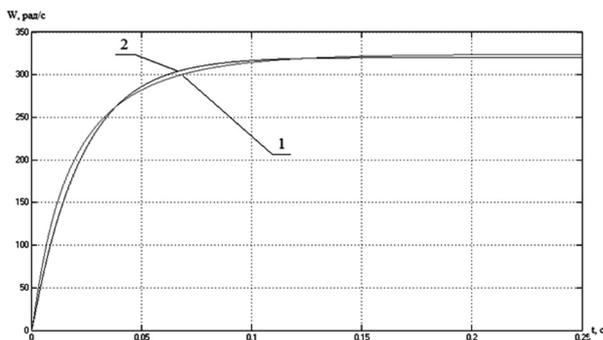


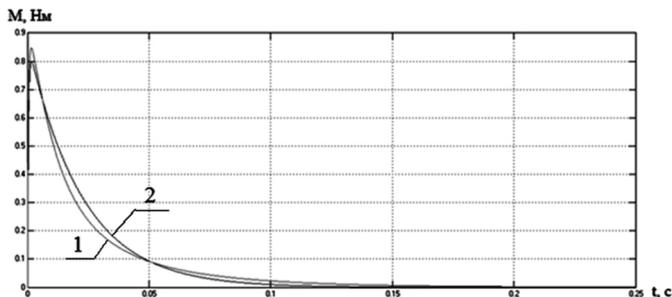
Рисунок 7.

Схема для сравнения характеристик полной и эквивалентной моделей.
Сравнительный анализ характеристик (паспортные данные, расчет по полной модели и расчет по упрощенной модели)

Скорость вращения:



Момент:



Линия 2 – упрощённая модель, линия 1 – полная.

Как видно из графиков, переходные процессы в обеих моделях достаточно близки и

соответствуют паспортным данным, что позволяет использовать эквивалентную модель для синтеза алгоритма управления, а полную для получения достоверных данных в ходе моделирования полученной системы.

Список литературы:

1. Черных И. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ИД Питер, 2007. - 288 с.
2. Поршнев С.В. MATLAB 7. Основы работы и программирования. Учебник. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. - 320 стр.
3. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. MATLAB 7. Самоучитель. М.: ИТ Пресс, 2006. - 348с.
4. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М.: Солон-Пресс, 2005. - 576с.
5. Кондрашов В., Королев С. Matlab как система программирования научно-технических расчетов. М.: Мир, Институт стратегической стабильности Минатома РФ, 2002. - 257с.
6. Герман-Галкин С. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. - 368с.

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА ПЛАГИАТА В ИСХОДНЫХ ТЕКСТАХ ПРОГРАММ

БЕЛОУСОВ С.А. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Белоусов С.А.

Анализируются особенности алгоритмов анализа плагиата программного кода, величины семантического шума в текстах программ на основе исследуемых методов. Приводится алгоритм с использованием комбинированного подхода некоторых текстовых и семантических алгоритмов. Показано, в какое представление переводится исходный код программ в большинстве современных алгоритмов, далее описаны классы современных алгоритмов поиска плагиата в исходных текстах программ. В результате представлен усовершенствованный алгоритм поиска плагиата, предлагаемый для использования в учебной практике для выявления плагиата среди лабораторных работ студентов.

Ключевые слова: плагиат, исходный код, программный код, токен, семантика, семантические алгоритмы, коэффициент совпадения, коэффициент схожести.

ВВЕДЕНИЕ

Плагиат в исходных кодах программ встречается как в коммерческой разработке программного обеспечения, так и в учебной практике. Проблема особенно актуальна в сфере высшего образования, которая заключается не только в присвоении чужих работ, но и подрыве самой сути образовательного процесса. Необходимость инструментов для выявления плагиата непосредственно связана и с защитой интеллектуальной собственности. Таким образом, задача выявления плагиата приобретает все большую актуальность в различных сферах человеческой деятельности, и как следствие необходимы методы и средства, позволяющие автоматизировать этот процесс.

Формально определить понятие плагиата крайне сложно. Обычно под этим понимают случай, когда между исходными кодами двух программ есть существенная (на уровне языка программирования) общая часть. При этом производная программа получается из оригинальной несложными преобразованиями, цель которых – скрыть факт заимствования вставкой лишних операторов, изменением порядка следования в программе независимых операторов, разбиением одной функции на две, изменением имен переменных и т.п. Такое определение в большинстве случаев пригодно, ибо серьезные изменения исходного кода, сделанные для сокрытия плагиата вручную, крайне трудоемки, если же для этого используются автоматические средства, то по виду исходного кода это легко определяется человеком.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ

Существующие в данной области алгоритмы принято классифицировать следующим образом [Prechelt L., Malpohl G., Philippsen M.]:

- текстовые алгоритмы;
- структурные алгоритмы;
- семантические алгоритмы;

Текстовые алгоритмы представляют программу в виде строки над алфавитом, сим-

волы которого представляют оператор или группу операторов языка программирования. Причем аргументы операторов (которые сами могут быть операторами) игнорируются, что делает многие элементарные действия по сокрытию плагиата (например, изменения имен переменным) бесполезными. Символ такого алфавита традиционно называют токеном.

Текстовые алгоритмы [Huang X., Hardison R.C., Miller W.] включают в себя как наиболее эффективные современные алгоритмы поиска плагиата в исходных кодах программ, так и самые старые алгоритмы. Примером последних может служить подсчет некоторых характеристик программ (например, количество операторов ветвления в программе), а затем полученные векторы характеристик сравниваются между собой. Очевидна крайняя неэффективность такого подхода.

Практически во всех алгоритмах текстовой группы полагается, что если исходные коды программ являются похожими, то и на уровне строковых представлений у них присутствуют существенные общие части. Причем эти общие части не обязательно должны быть непрерывны. Из современных текстовых алгоритмов и методов выделим следующие:

– алгоритм на основе выравнивания строк - раздвигает символы строк так, чтобы выявить совпадающие участки;

– алгоритм на основе строкового замощения [Wise M.J.] - эвристический алгоритм, выдающий наибольшее множество непересекающихся совпадающих подстрок, используют 2 эвристики:

1) более длинные последовательные совпадения лучше, чем набор меньших и непоследовательных, даже если сумма длин последних больше,

2) алгоритм игнорирует совпадения, длины которых меньше определенного порога,

– метод просеивания - ищет все общие подстроки фиксированного размера;

– метод отпечатков - сравнивает выборочные участки программ.

Структурные алгоритмы [Baxter I., Yahin A., Moura L., Anna M.S., BierL.], что следует из названия, используют саму структу-

ру программы, обычно это или граф потока управления, или абстрактное синтаксическое дерево. Вследствие такого представления алгоритм сводит на нет многие возможные действия плагиатора. Но все алгоритмы этого класса являются крайне трудоемкими, поэтому не используются на практике.

Семантические алгоритмы [Moussiades L.M., Vakali A.] в чем-то похожи на структурные и текстовые, но в их основе лежат логические выводы, поиск в пространстве состояний. Например, в них может использоваться представление исходного кода программы в виде графа с вершинами двух типов. Одни строятся из последовательности операторов, которым назначается определенная семантика (например, математическое выражение, цикл), другие задают отношение, в котором состоят соседние с ней вершины (например, вхождение). Между двумя вершинами первого типа обычно стоит вершина второго.

2. КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД

Предлагаемый подход объединяет в себе идеи некоторых текстовых и семантических алгоритмов. Ниже расписана последовательность действий алгоритма.

2.1. Семантическая часть

2.1.1. Преобразуем исходный код сравниваемых программ в поток токенов (токен-оператор или идентификатор языка программирования)

2.1.2. Разбиваем полученный поток токенов на слова, где под словом подразумевается простой оператор языка (в большинстве языков таким словом будет набор операторов между разделителями). В большинстве случаев исходный код, соответствующий одному слову занимает одну строчку.

2.1.3. Используя полученный набор слов, строим дерево, в узлах которого будут лишь те слова, которые соответствуют условным операторам, циклическим операторам или вызовам пользовательских функций, а листьями дерева будут остальные слова (а также пустое слово, например, для случая, когда в блоке выполнения условного оператора ничего нет).

При этом все циклические операторы (for, ghereat, и т.д.) сводим к эквивалентному оператору while, все операторы условия (тернарный оператор '? :', switch, else, и т.д.) сводим к эквивалентному оператору if, оператор вызова пользовательской функции становится родительским для всех слов, соответствующих исходному коду данной функции.

2.2. Текстовая часть

2.2.1. Сравниваем соответствующие узлы следующим образом: каждый условный оператор первой программы с каждым условным оператором второй, аналогично с циклическими операторами и операторами вызова функций. Все прочие ветвления дерева внутри выбранного узла игнорируются, и сравнивается набор слов, входящий прямо или косвенно в выбранный для сравнения узел.

Группу сравниваемых наборов слов обозначим блоком, коэффициент совпадения блоков будет рассчитываться по формуле $\sum_n^i k_i/n$, где k_i – коэффициент схожести i -го слова, а n – их количество.

Полученный коэффициент можно использовать в метрике для выделения блоков, потенциально скопированных (полностью или частично) из другой программы.

2.2.2. При сравнении двух наборов слов, сравнивается каждое слово одного набора с каждым словом из другого, получаем соответствующие коэффициенты схожести. Чтобы получить конечный коэффициент схожести для одного слова, выбираем максимальный коэффициент его схожести на любое из слов другого набора.

2.2.3. Чтобы сравнить два слова между собой и получить коэффициент схожести, показывающий, какая доля первого слова включена во второе, будем перебирать размер окна и 'двигать' его по первому слову, окно – подстрока первого слова.

Выполняются следующие шаги:

- размер окна k изменяем в следующем диапазоне: от длины первого слова len до t (шумовой порог – совпадение подстрок данного размера и меньше считаются случайными, например, 2),

- двигаем окно по первому слову (шаг = 1

символ, соответственно количество шагов = $len - k + 1$),

- если подстрока, соответствующая положению окна первого слова, входим во второе, помечаем все соответствующие символы первой строки,

- по достижении окном текущего размера k конца слова, могут возникнуть следующие ситуации:

- отмеченных символов нет (ни одна подстрока размера k первого слова не встречается во втором), коэффициент схожести при данном k равен 0

- в противном случае, текущий коэффициент для данного k в зависимости от количества помеченных символов линейно находится в интервале $[\min .. \max]$,

где $\min = k / len$,

$\max = 1 + 1/len - 1/k$

- после перебора всех k выбираем наибольший коэффициент из полученных.

Выбор границ \min и \max обусловлен следующим:

\min – если было хоть одно совпадение подстроки длины k , то логичным будет вывод о том, что хотя бы k / len часть первой строки совпадает с частью второй,

\max – при уменьшении размера окна, увеличивается шумовой эффект, уменьшаем полученный коэффициент схожести.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный алгоритм объединяет в себе как плюсы текстовых алгоритмов, так и се-

мантических, при этом основная вычислительная часть имеет очень хороший параллелизм, что сокращает время ее выполнения при наличии вычислительных мощностей. Стоит отметить, что эмпирических данных о работе данного алгоритма еще недостаточно, но для приемлемой скорости выполнения (до 2 сек, при сравнении двух программ до 1000 строк исходного кода) достаточно и обычного ПК, при выполнении основной части программы на графическом процессоре.

Список литературы

1. *Wise M.J.* String similarity via greedy string tiling and running Karp-Rabin matching. // Dept. of CS, University of Sydney. December 1993.
2. *Baxter I., Yahin A., Moura L., Anna M.S., Bier L.* Clone Detection Using Abstract Syntax Trees. // Proceedings of ICSM. IEEE. 1998.
3. *Prechelt L., Malpohl G., Philippsen M.* JPlag: Finding plagiarisms among a set of programs. // Technical Report No. 1/00, University of Karlsruhe, Department of Informatics. March 2000.
4. *Moussiades L.M., Vakali A.* PDetect: A Clustering Approach for Detecting Plagiarism in Source Code Datasets. // The Computer Journal Advance Access. June 24, 2005
5. *Manber U.* Finding similar files in a large filesystem. // Proceedings of the USENIX Winter 1994 Technical Conference. San Francisco. 1994. P. 1–10.
6. *Huang X., Hardison R.C., Miller W.* A space-efficient algorithm for local similarities. // Computer Applications in the Biosciences 6. 1990. P. 373–381.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЗАЩИТЫ ОТ КРИТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

БУНЬКОВ Д.С. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Буньков Д.С.

Статья раскрывает принцип функционирования современного алгоритма выявления критических отклонений питающего напряжения, подходящего для применения в различных системах электропривода. Основной задачей при создании данного алгоритма являлось обеспечение правильной работы системы во всем рабочем диапазоне устройства, не зависимо от возможных изменений питающего напряжения. Главной особенностью предлагаемого алгоритма является адаптивность и способность адекватно выявлять различные аварийные состояния, исключая при этом ложные срабатывания.

Ключевые слова: электропривод, критическое напряжение, питающее напряжение, защиты.

В настоящее время проблема выявления аварийных состояний электропривода является достаточно актуальной [3], так как несвоевременное их обнаружение ведет к падению выходной мощности или же к выходу оборудования из строя, и, как следствие, к большим экономическим потерям. Среди возможных аварийных состояний электропривода, касающихся питающего напряжения, принято различать обрыв входной фазы, одной или нескольких, пониженное или повышенное напряжение сети [4]. Данные аварийные ситуации требуют четкого и правильного их выявления и диагностики с целью принятия системой управления электроприводом соответствующих решений [2]. Для решения данной задачи потребовалось разработать специальный алгоритм. Основой предлагаемого алгоритма является комплекс функций, позволяющих надежно выявлять аварийные состояния при отклонениях питающего напряжения во всем рабочем диапазоне напряжений устройства.

Вычисление ошибки $dU_{i\%}$ для каждой из фаз питающего напряжения, которая в дальнейшем сравнивается с соответствующим порогом срабатывания защиты $dU_{MAX_i\%}$ производится по формуле:

$$dU_{i\%} = \frac{|U_{DURING_i} - U_{REF_i}|}{U_{REF_i}} \cdot 100\%,$$

где U_{DURING_i} – текущее фазное напряжение в i -ой фазе, U_{REF_i} – опорное зафиксированное напряжение в i -ой фазе.

Для правильного выявления ситуации пониженного напряжения или обрыва питающей фазы, либо повышенного напряжения необходимо адекватно определить опорное напряжение U_{REF_i} , относительно которого производится вычисление ошибки. Данную задачу реализует функция поиска опорного напряжения, описанная ниже.

При начальном запуске системы текущее фазное напряжение U_{DURING_i} в первую очередь проверяется на принадлежность к диапазону рабочих напряжений ($U_{MIN} \div U_{MAX}$). В случае невыполнения данного условия для конкретной фазы, в качестве опорного U_{REF_i} устанавливается среднее напряжение, записанное в память устройства при предыдущем удачном пуске системы.

Если условие выполняется, то происходит поиск опорного напряжения U_{REF_i} и его фиксация с определенной задержкой. Таким образом, проверка на превышение поро-

га срабатывания $d_{UMAX_i\%}$ будет непрерывно осуществляться относительно опорного напряжения U_{REF_i} конкретной фазы. Рис. 1 иллюстрирует ситуацию просадки напряжения в фазе T на величину dU_T после нахождения опорных напряжений для всех фаз, причем рассматриваемая трехфазная система напряжений существенно несимметрична.

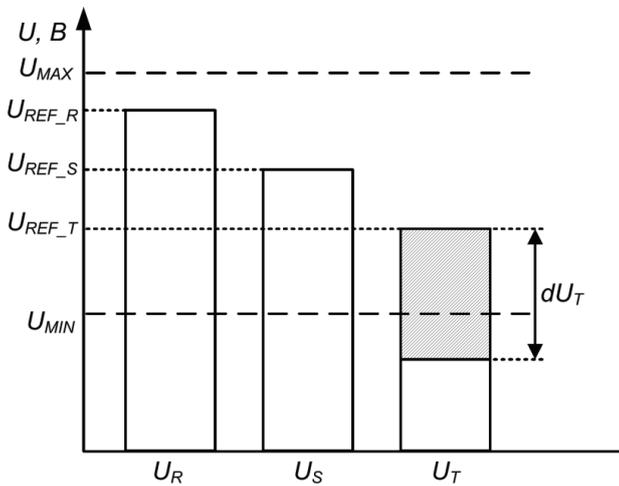


Рисунок 1.

Столбчатая диаграмма изменения фазного напряжения

Работу функции во временной области для данной ситуации иллюстрирует рис. 2. Таким образом, в момент времени t_1 начинается снижение текущего напряжения U_{DURING_T} до уровня U_{DURING_T1} . При этом вычисление ошибки dU_T происходит относительно напряжения U_{REF_T} , а выявление аварийной

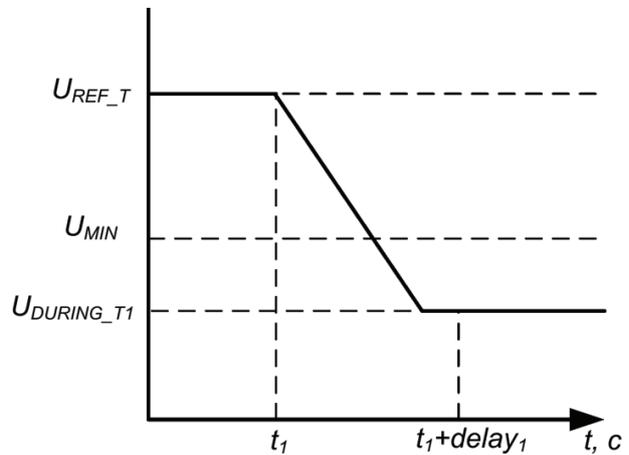


Рисунок 2.

Временная диаграмма при просадке напряжения в фазе T

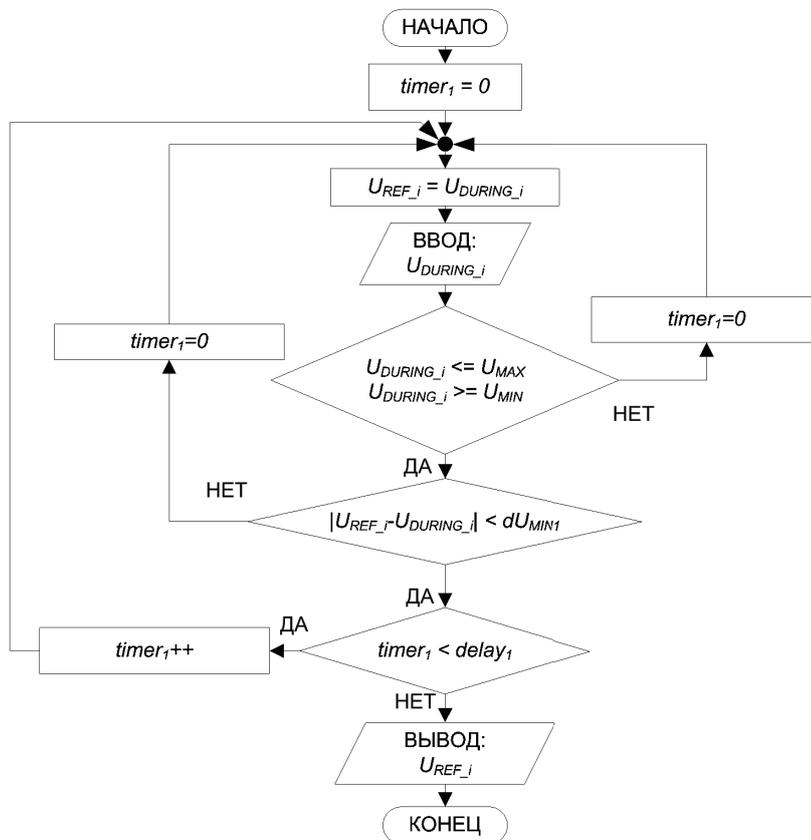


Рисунок 3.

Алгоритм функции поиска опорного напряжения для отдельной фазы

ситуации произойдет с задержкой ($t_1 + delay_1$), необходимой для игнорирования помех и случайных бросков напряжения, которые являются частыми явлениями в сети.

Программную реализацию алгоритма поиска опорного напряжения в каждой фазе иллюстрирует рис. 3.

Таким образом, в начальный момент на этапе запуска разработанного алгоритма происходит обнуление таймера $timer_1$, а опорное напряжение U_{REF_i} присваивается текущему напряжению U_{DURING_i} . Так, если в течение заданного промежутка времени $delay_1$ значение U_{REF_i} будет примерно равно U_{DURING_i} (dU_{MIN1} – малая величина), то приравнивание U_{REF_i} завершится, а значение будет возвращено вызывающей функции. В противном случае таймер $timer_1$ обнуляется, и проверка начинается заново.

Таким образом, разработанный алгоритм для поиска опорного фазного напряжения позволяет эффективно определять опорное фазное напряжение, что дает возможность надежно выявлять аварийные ситуации при изменениях питающего напряжения.

В случае подключения или отключения параллельно с электротехническим устройством мощной нагрузки возможно значительное симметричное изменение напряжений во всех трех фазах вследствие неиде-

альности источника напряжения. В данной ситуации необходимо заново определить опорные напряжения всех фаз, для чего применяется функция переопределения опорных напряжений.

Рис. 4 иллюстрирует ситуации симметричного уменьшения и увеличения фазных напряжений, при которых должен произойти пересчет опорных напряжений. Таким образом, функция должна учитывать не только величины изменений напряжений dU_i , но и их знак.

Логику работы алгоритма для переопределения опорных напряжений иллюстрирует рисунок 5.

В начальный момент времени действия рассматриваемого алгоритма происходит обнуление таймера $timer_2$. Далее проверяется знак изменения напряжения dU_i во всех трех фазах. В случае выполнения условия происходит сравнение величин изменений напряжения dU_i . Далее в случае их примерного равенства (dU_{MIN2} – малая величина) происходит переопределение опорных напряжений ($U_{REF_i} = U_{DURING_i}$) с определенной задержкой $delay_2$. В противном случае таймер $timer_2$ обнуляется, и проверка начинается снова.

Таким образом, разработанная функция переопределения опорных напряжений дает возможность улавливать симметричные изменения фазных напряжений, адаптируя опорные напряжения.

Главным отличием предлагаемого алгоритма является простота его реализации, не требующая глубокого анализа энергосистемы [1]. Другой отличительной особенностью алгоритма является наличие в системе опорных напряжений, исключающих возможность ложного срабатывания защит.

Разработанный алгоритм в настоящее время нашёл применение в программном обеспечении системы управления блоком электронного управления БУР, выпускаемом ЗАО «ЭлеСи» (г. Томск) для электроприводов запорной арматуры.

Анализируя комплекс разработанных функций, реализованных в виде отдельного алгоритма, можно заключить, что заложенные

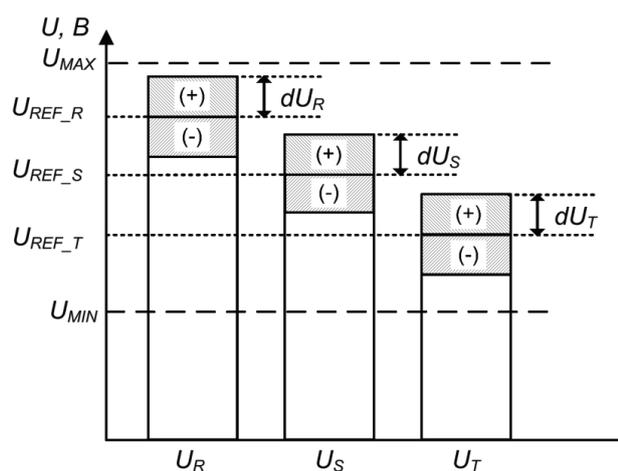


Рисунок 4.

Столбчатая диаграмма симметричного изменения фазных напряжений

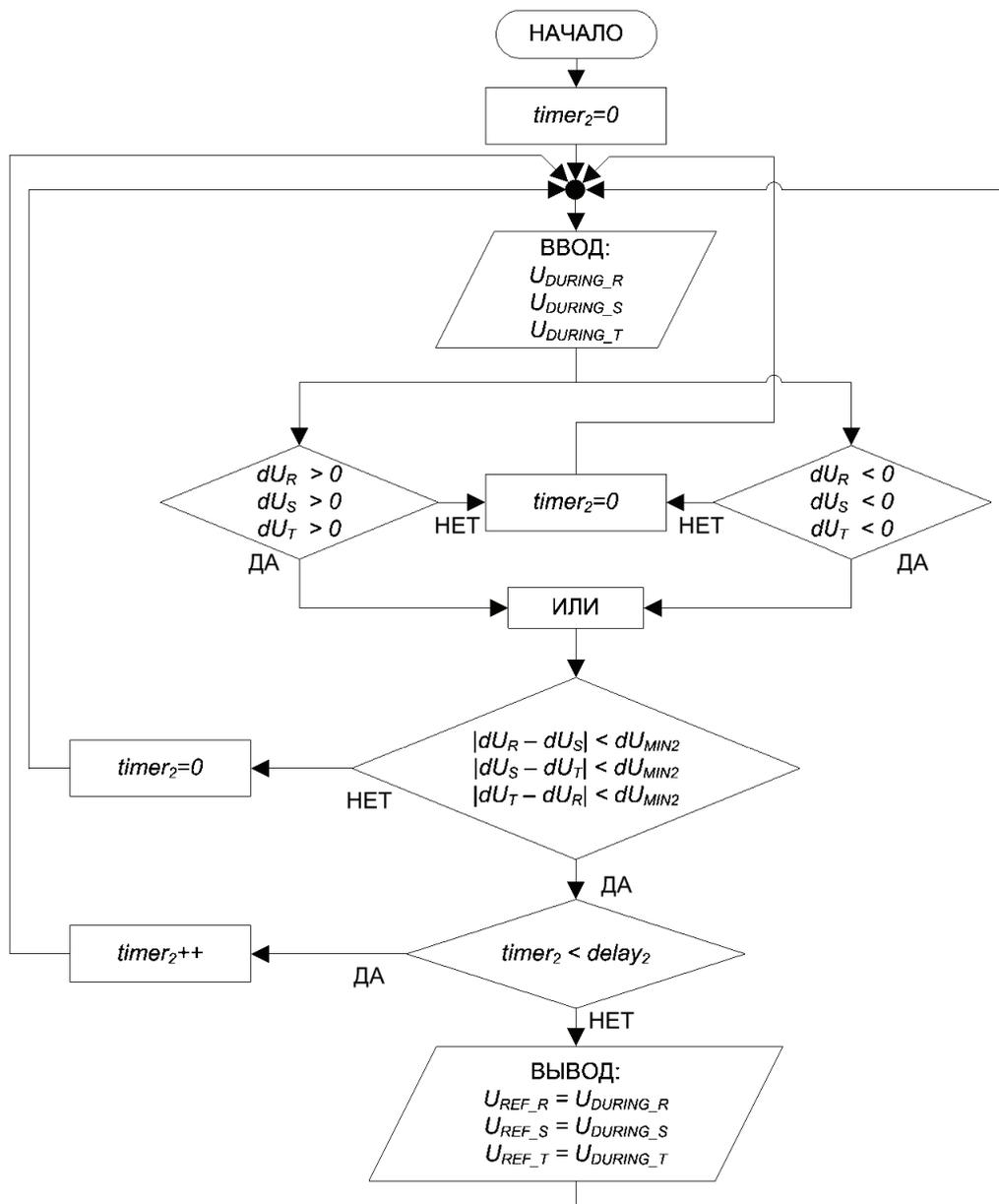


Рисунок 5.
Логика работы алгоритма переопределения опорных напряжений

подходы к выявлению критических уровней напряжения являются высокоэффективными и значительно повышают надежность и безопасность работы электропривода.

Список литературы:

1. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Автоматизированный анализ аварийных ситуаций энергосистем. – Москва: «Энергопрогресс», 2000. – 76 с.
2. Исмаилов Ф.Р., Ахматнабиев Ф.С. Микропроцессорные устройства релейной защиты

энергосистем: учебное пособие / Ф.Р. Исмаилов, Ф.С. Ахматнабиев / Уфимск. гос. Авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2009. –171 с.

3. Итоги развития и проблемы электропривода / Н. Ф. Ильинский, М. Г. Юньков. – Автоматизированный электропривод, 1990.

4. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ МИКРОВОЛНОВОГО РЕЛИКТОВОГО ФОНА И ИЗЛУЧЕНИЯ КВАЗАРОВ

ГЕНЖАЕВ Ш.А. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Генжаев Ш.А.

Экспериментально установлено, что излучение квазаров является поляризованным. Существует большая вероятность того, что если время зарождения флуктуаций плотности вещества Вселенной, из которых впоследствии зародились квазары, соответствует времени последнего рассеяния электромагнитного излучения Вселенной, то можно предполагать наличие корреляции между параметрами поляризации излучения квазаров аналогичными параметрами поляризации микроволнового реликтового излучения

Ключевые слова: поляризации микроволнового реликтового излучения, поляризации квазаров, микроволновый реликтовый фон.

Согласно концепции горячего Большого Взрыва, ранняя Вселенная представляла собой горячую плазму, состоящую из фотонов, электронов и барионов. В рамках эффекта Комптона, фотоны взаимодействовали с остальными частицами плазмы путём столкновения с ними и обмена энергией. Излучение находилось в состоянии теплового равновесия с веществом, а его спектр соответствовал спектру абсолютно чёрного тела.

По мере расширения Вселенной, космологическое красное смещение вызывало остывание плазмы и, на определённом этапе расширения, для электронов стало энергетически предпочтительным соединение с протонами и альфа-частицами, при котором сформировались атомы. Это случилось при температуре плазмы вещества около 3000 K и примерном возрасте Вселенной 400 000 лет. Наблюдаемая сфера, соответствующая данному моменту, называется поверхностью последнего рассеяния. Её радиусу соответствуют самые удалённые объекты, которые можно наблюдать в электромагнитном спектре.

При рассеянии реликтового излучения на частицах вещества оно подверглось поляризации.

На рис. 1 изображена карта Вселенной полученная по данным /1/, на которой наклонном условных штрихов показано направление поляризации микроволнового реликтового фона.

Экспериментально установлено /2/, что излучение квазаров является поляризованным. На рис. 2 изображена карта Вселенной, аналогичная рис. 1, на которой длиной и наклоном штрихов показаны направление и числовое значение коэффициента поляризации квазаров. Если время зарождения флуктуаций плотности вещества Вселенной, из которых впоследствии зародились квазары, соответствует времени последнего рассеяния электромагнитного излучения Вселенной, то можно предполагать наличие корреляции между параметрами поляризации излучения квазаров аналогичными параметрами поляризации микроволнового реликтового излучения.

Если названная корреляция будет обнаружена, то можно сделать вывод о том, что время возникновения зародышей квазаров приблизительно соответствует времени последнего рассеяния.

Погрешности измерений /1-2/ коэффициента поляризации, а также угла поляризации

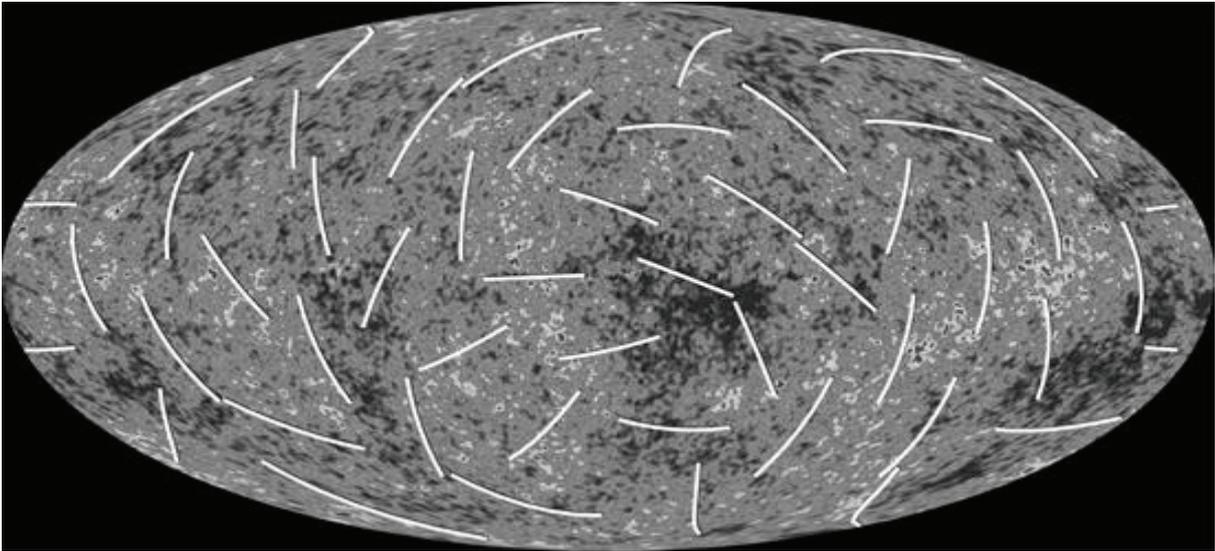


Рисунок 1.
Поляризация микроволнового реликтового фона

составляют около $5 \cdot 10^{-4}$. Относительно высокая точность определения координат квазаров и точек фона позволяет считать направление небесной сферы на квазар, а также

направление, в котором измерялся микроволновый реликтовый фон, практически совпадающими. Это позволяет в ближайшее время перевести в плоскость практического

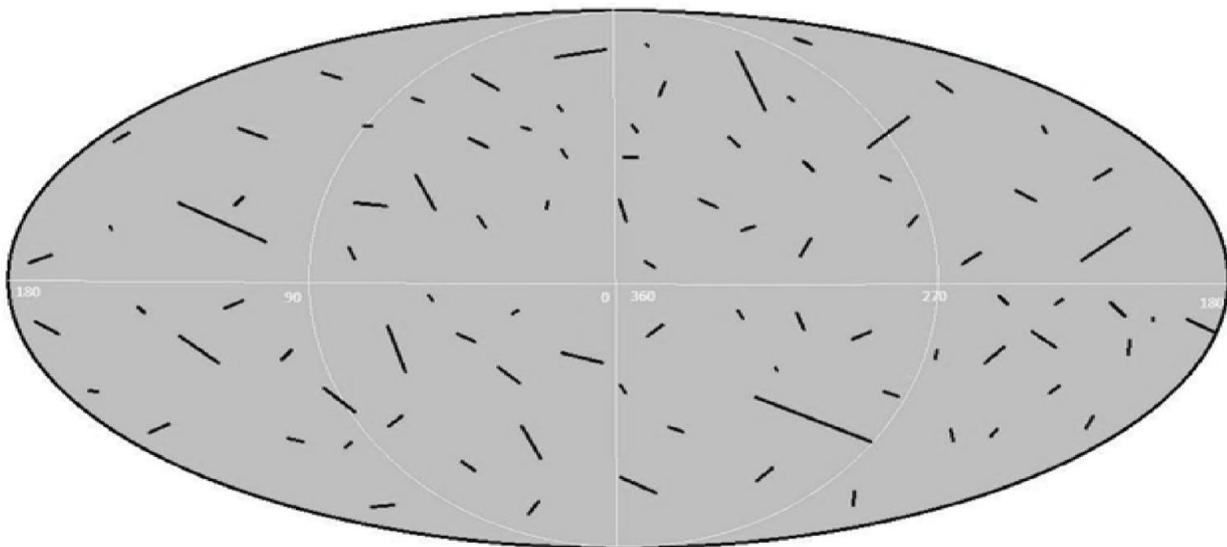


Рисунок 1.
Поляризация излучения квазаров /2/

решения высказанное выше предположение о корреляции между параметрами поляризации квазаров и микроволнового реликтового фона.

Список литературы:

1. <http://www.kininui.3bb.ru>
2. <http://www.quasars.org/>

ВЫБОР УПРАВЛЯЮЩЕГО ФЛЭШ-КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЗАПОМИНАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

ДУЛОВ Д.В. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Дулов Д.В.

При разработке высокоскоростного запоминающего устройства (ЗУ) ключевым моментом является подбор элементной базы. Перспективными являются ЗУ на основе микросхем памяти (МП). Такие ЗУ называют твердотельными накопителями (ТН). Для обеспечения высоких скоростных показателей обмена информацией между пользователем и ЗУ особое внимание необходимо уделить выбору управляющего флэш-контроллера (УФК), так как они зависят в большей степени именно от него.

Ключевые слова: твердотельный накопитель, флэш-контроллер, PSiе, микросхема памяти, NAND.

ВВЕДЕНИЕ

Современные ТН получают все большее распространение за счет низкого энергопотребления, отсутствию подвижных частей и, как следствие, бесшумной работе и стойкость к механическим повреждениям, а также, в отличие от накопителей на магнитных дисках, невосприимчивость к электромагнитным полям. На сегодняшний день для обмена информацией с ТН главным образом используются следующие три интерфейса: SATA, PSiе и USB. Последний применяется во внешних ТН. Сравнивая интерфейсы SATA и PSiе, то наиболее перспективным является последний, несмотря на то, что в подавляющем большинстве современных ТН используется именно SATA. Это связано с поддержкой данного интерфейса управляющим контроллером. Подобных SATA-контроллеров производит достаточно большое число компаний, что и способствует популяризации одноименного интерфейса. Однако, максимальная заявленная пропускная способность последней версии SATA 3.0 составляет 6 Гб/с против 8 Гб/с PCiе 3.0 только с одной линией связи при передаче данных в одну сторону. В зависимости от используемого интерфейса связи обеспечивается различная

скорость обмена информацией между УФК и МП: в режиме Toggle версий 1.0 или 2.0 скорость передачи информации (на один вывод микросхемы) составляет от 200 до 400 МБ/с, а в режиме ONFi версий 2.0 и 3.0 от 133 до 400 МБ/с. Но скорость развития интерфейсов высокоскоростной передачи данных гораздо выше скорости развития элементной базы, способной функционировать на скоростях порядка десятка гигабит. Но, не смотря на это, некоторые компании уже ведут разработки в этой сфере и добиваются конкретных результатов.

ПРОИЗВОДИТЕЛИ КОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ТН

На современном рынке компаний, выпускающих под своим брендом ТН, гораздо больше, чем, собственно, производителей контроллеров. Далее будут рассмотрены компании, чьи УФК применяются в большинстве современных ТН.

SandForce

В 2012 году американская компания LSI Corporation приобрела молодую фирму SandForce (основана в 2006 году), специализирующуюся на производстве УФК для ТН. Приобретение это оказалось очень удачным, так как на сегодняшний день УФК SandForce

используются большинством производителей ТН, такими как OCZ, Silicon Power, Transcend, Kingmax и многими другими. Это и не удивительно: SandForce является не только разработчиком и производителем УФК, но и предоставляет широкий спектр услуг по технической поддержке, таких как готовая прошивка контроллера, ПО для обслуживания ТН и даже готовый проект печатной платы. Исходя из этого не возникает ни каких проблем с применением УФК SandForce в собственных ТН и дальнейшим обслуживанием.

До недавнего времени SandForce выпускала УФК, которые поддерживали только интерфейс SATA. Но в 2013 году компания объявила о выпуске нового поколения УФК для ТН SF3700. Контроллеры этой серии помимо SATA версии 3.0 уже имеют встроенную поддержку PCIe версии 2.0, максимальный объем МП составляет 2ТБ, для обеспечения связи с микросхемами NAND flash используются 9 каналов. Заявленные производителем характеристики впечатляют и выпуск УФК этого семейства должен был начаться еще в начале 2014 года, однако по неизвестным причинам выпуск был отложен до 2015 года.

Marvell

Контроллеры данной компании также являются одними из самых распространенных в сфере производства ТН. Однако, в отличие от SandForce, контроллеры Marvell не оснащаются готовой прошивкой, от которой и зависят скоростные характеристики ТН. Производителю ТН необходимо самому разрабатывать программу для работы УФК, а кроме того и сам дизайн-проект печатной платы. Отсюда следует вывод, что производитель, использующий в своих ТН подобные контроллеры, должен обладать собственной мощной инженерной базой. Но, не смотря на это ТН, работающие на контроллерах Marvell, обладают стабильными скоростными характеристиками за счет качественной отработки TRIM¹, так как ТН не теряет своей

¹Команда, с помощью которой операционная система сообщает ТН о состоянии блоков данных, для дальнейшего их физического удаления.

производительности из-за наличия нерабочих блоков.

Компания Marvell уже несколько лет выпускает на рынок УФК, оснащенные интерфейсом PCIe версии 2.0 (такие модели, как 88ss9145, 88ss9183 и т.п.). К плюсам можно отнести отсутствие необходимости конвертации интерфейса PCIe в SATA. Но существенным недостатком является наличие всего четырех каналов связи с МП и одной линии передачи данных. ТН на их основе не получили широкого распространения в виду высокой стоимости за небольшой объем памяти. Но, не смотря на это, Marvell делает уверенные шаги в сторону разработки новых УФК с PCIe. Вот, например, в этом году был анонсирован 88ss1093. Вот его основные параметры: поддержка МП общим объемом до 2ТБ, интерфейсов Toggle версии 2 и ONFI версии 3 связи с МП, а также PCIe версии 3.0 с четырьмя линиями связи. Выпуск этого УФК намечен на начало 2015 года.

PMC-Sierra

До 2013 года компания PMC-Sierra производила УФК, работающие только по средством интерфейса SATA. Однако, выкупив у Integrated Device Technology (IDT) бизнес по производству УФК, PMC-Sierra стала обладателем одного из самых перспективных семейств УФК – Flashtec NVMe Controllers. В него входят две модели NVMe 1016 и NVMe 1032. К данным УФК возможно подключать до 8ТБ флэш-памяти. Единственное различие между этими моделями лишь в количестве канала связи с МП: 16 и 32 соответственно. Обмен данными между ТН (работающего на NVMe 1016 и NVMe 1032) и пользователем будет осуществляться по средством интерфейса PCIe версии 3.0 x8², который также может работать и в режиме двух независимых PCIe 3.0 x4. Также при обмене информацией данные шифруются дополнительным кодом коррекции ошибок ECC с целью выявления сбоя или ошибки и дальнейшего их устранения.

²Соединение будет обеспечиваться восьмью (x8) двуправленными последовательными линиями.

Таблица 1.
Сравнительные характеристики передовых УФК

Компания	Модель	Поддерживаемые интерфейсы	Максимально поддерживаемый объем	Интерфейс связи с NAND	Протокол передачи данных	Число линий связи с NAND
SandForce	SF3759	PCIe Gen2 x2/x4	2ТБ	Toggle ONFI	AHCI NVMe	9
PMC-Sierra	NVMe1016	PCIe Gen3 x4/2x2	8ТБ*	Toggle ONFI	NVMe	16
	NVMe1032	PCIe Gen3 x8/2x4				32
Marvell	88ss9145	PCIe Gen2 x1	64ГБ (SLC) 128ГБ (MLC)	Toggle ONFI	AHCI	4
	88ss9183	PCIe Gen2 x2	–	Toggle	AHCI	–
	88ss1093	PCIe Gen3 x4	2ТБ	Toggle ONFI	NVMe	–

*при использовании 128Гб МП.

Другие производители

Помимо вышеперечисленных собственные УФК производят такие компании как Phison, Link A Media Devices, Toshiba, Indinix, JMicron, SiliconMotion, Greenliant и другие. Но общим недостатком всех УФК, которые они выпускают, поддерживают только интерфейс SATA, что, как уже говорилось ранее, накладывает существенные ограничения по скорости обмена данными. Некоторые компании, покупая лицензию на УФК Marvell и аппаратно их модифицируя, продают под своим брендом. Однако, в 2014 году, компания Intel выпустила ТН с PCIe 3.0 на МП и УФК собственного производства. Ни какой информации касаясь их характеристик в открытом доступе нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были выявлены лидеры на рынке УФК, сравнительные характеристики которых приведены в табл. 1.

Из приведенной таблицы видно, что несомненными лидерами являются УФК компании PMC-Sierra ввиду их богатого функционала. Но найти более подробную информа-

цию, например, о системе команд или правилах схемотехнической обвязки этих микросхем, не представляется возможным. Это связано с высоким уровнем конкуренции на рынке ТН. Использование интерфейса PCIe в ТН идея не новая, но добиться высоких скоростных показателей практически ни кому не удастся. Все сводится к разработке УФК и теперь та компания, которая будет обладать УФК, способными взаимодействовать и с интерфейсом PCIe и МП типа NAND, и займет эту нишу первой.

Список литературы:

1. [http:// www.marvell.com/storage/ssd/88SS1093](http://www.marvell.com/storage/ssd/88SS1093)
2. <http://www.micron.com/products/nand-flash/slc-nand>
3. http://pmcs.com/products/storage/flashtec_nvme_controllers
4. <http://www.seagate.com/nl/nl/products/solid-state-flash-storage/flash-controllers/>
5. Алямкин Д.И., Анучин А.С., Дроздов А.В., Козаченко В.Ф., Тарасов А.С. Козаченко В.Ф. Встраиваемые высокопроизводительные цифровые системы управления — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — 270 с.
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т.1 Пер. с англ. 4-е изд. перераб. и доп. - М.: Мир, 1993. - 413 е., ил.

ПОВЫШЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИК ЗОНДИРОВЩИКОВ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

ИГНАТЬЕВ К.С., КАЛУГИН Ю.А. - операторы 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Игнатъев К.С.



Калугин Ю.А.

Рассмотрены возможные варианты по повышению качества получаемой ИК зондировщиком информации, защиты внутренних компонентов от воздействия условий космоса.

Ключевые слова: ик зондирование, компенсация смещения визирной оси, размеростабильные конструкции, углепластик.

В настоящее время количество наземных метеостанций постоянно сокращается, а их размещение над океанскими акваториями (2/3 поверхности планеты), и в труднодоступных районах невозможно. В связи с этим роль спутникового зондирования атмосферы сильно возрастает. В дополнение к этому обслуживание метеозондов обходится ежегодно в весьма большую сумму, в то время как запуск одного спутника обходится дешевле и время работы его на орбите составляет от 5 до 7 лет. Спутник, оснащенный инфракрасным Фурье-спектрометром, может собирать информацию не только о температуре и влажности слоев атмосферы, но также и информацию о подстилающей поверхности, информацию о содержании различных веществ в атмосфере. Таким образом, можно решать задачи не только в области метеорологии, но и в области экологии и разведки лесных пожаров. Для того чтобы данные получаемые со спутника удовлетворяли современным требованиям для использования их при анализе погоды, его аппаратура должна иметь высокое спектральное разрешение. Актуальности данному вопросу добавляет

нахождение РФ в глобальной системе метеонаблюдений Всемирной Службы Погоды (World Weather Watch's Global Observing System - WWW GOS), для которой требуются данные высокой точности. В настоящее время информацию, для составления прогноза погоды, Гидрометецентр России получает из международных глобальных источников. Это означает что при обострении международной обстановки отечественная система определения погоды и экологической обстановки становится крайне уязвимой, что в свою очередь негативно скажется на ведении боевых действий и обнаружении экологических катастроф.

1. ПРОБЛЕМАТИКА

При разработке ДЗЗ (дистанционных зондировщиков земли) космического базирования возникают следующие конструкторские задачи:

- 1). Разработка корпуса устройства, подбор его материала, обеспечение необходимой размеростабильности, прочности и надежности на всем периоде эксплуатации (5-7 лет).
- 2.) Разработка системы компенсации смещения визирной оси прибора.

Корпус устройства является одной из важнейших его частей. Он отвечает за защиту находящихся за ним элементов и систем от ионизирующего излучения. Обеспечивает жесткое закрепление деталей и узлов относительно друг друга.

Во время съема интерферограммы, из-за движения космического аппарата, возникает смещение визирной оси прибора. Система компенсации позволяет повысить качество получаемой прибором информации.

2. РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

Смещение визирной оси прибора возникает вследствие того, что за время съема интерферограммы (50 мс.) космический аппарат успевает сместиться относительно точки где был начат съем на некоторое расстояние. Данные полученные в таком случае будут не совсем корректны, так как часть будет полученная от одного участка подстилающей поверхности, а часть от совсем другой. Для компенсации этого эффекта необходимо осуществлять поворот зеркала в направлении противоположном движению аппарата. При отвороте при сканировании на угол $\alpha_{ск}$ масштаб проекции полевой диафрагмы меняется, при этом линейные размеры в направлении полёта увеличиваются в $1/\cos\alpha_{ск}$. Для

нивелирования данного эффекта, системе компенсации необходимо отклонять зеркало на больший угол, с увеличением угла сканирования. Точное соотношение угла сканирования и угла компенсации отображено на циклограмме работы.

Сканирующее зеркало подвешено на двух торсионных опорах, вокруг осей которых и происходит вращение зеркала системой компенсации. Поворот зеркала осуществляется с помощью перемещения наконечника пьезоактюатора на заранее вычисленное значение. Возврат в исходное положение осуществляется с помощью пружин. Выбор в пользу пьезоактюатора объясняется высокой точностью отработки перемещения – 0,35 нм, высокой надежностью, малым энергопотреблением и низкой массой – 25 г. Надежность обеспечивается отсутствием трущихся и движущихся деталей. Масса 25 г.

Указывается для самого пьезоактюатора, в эту массу не входит серво контроллер, который обеспечивает управление. Но это не критично, так как возможно расположить серво контроллер не на вращающемся основании зеркала, а в неподвижном корпусе. Тем самым повышенной нагрузки на шаговый двигатель сканирования (вращающий основание зеркала) оказываться не будет. Максималь-

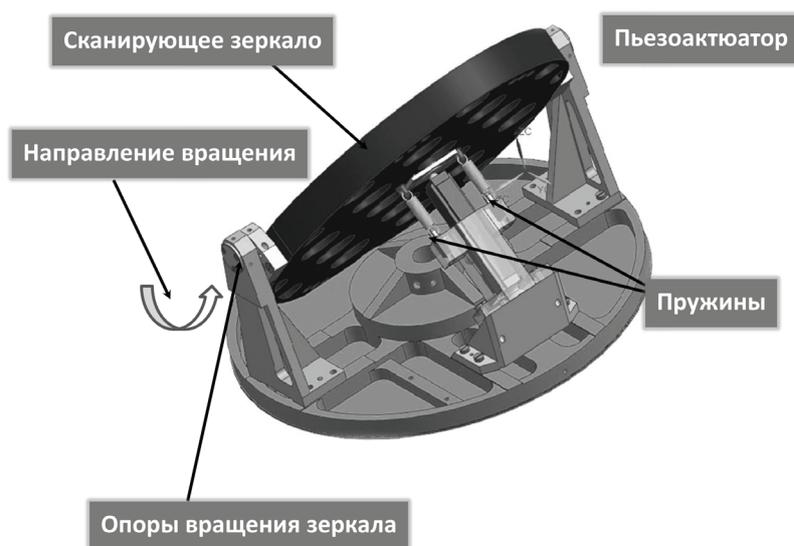


Рисунок 1.

Конструктивное исполнение системы компенсации смещения визирной оси

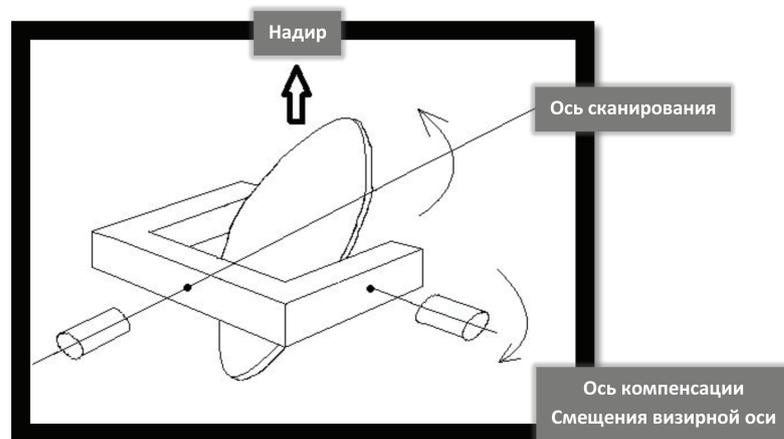


Рисунок 2.
Схема сканирования устройства

ное перемещение наконечника актюатора составляет 23 мкм, что обеспечивает наклон зеркала на угол $0,11^\circ$, достигаемая точность всей системы $40''$. Стоит отметить, что данная точность возможна при наличии в пьезоактюаторе датчика обратной связи.

3. ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩЕГО КОРПУСА ИНФРАКРАСНОГО ФУРЬЕ СПЕКТРОМЕТРА

Для сохранения высоких тактико-технических характеристик на протяжении всего срока эксплуатации оптико-электронных комплексов дистанционного зондирования земли, конструкция приборов должна обе-

спечивать стабильность положения оптических компонентов. В связи с возникновением тепловых градиентов на конструкции оптико-электронного комплекса, важнейшим требованием, обеспечивающим стабильность положения оптической оси, является снижение коэффициента температурного расширения материалов, составляющих конструкцию прибора (КТР) до значений, близких к нулю.

При создании размеростабильных конструкций следует учитывать факторы космического пространства, таких как: глубокий вакуум, ультрафиолетовое, инфракрасное, радиационное излучение, а также перепады температур, которые приводят к деградации

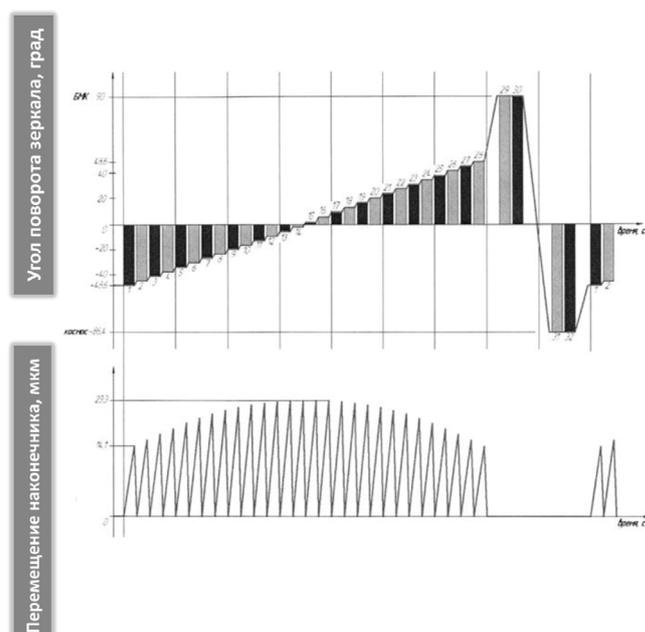


Рисунок 3.
Циклограмма работы

Таблица 1.
Характеристики материалов

Характеристики	Карбид кремния	Титан (ОТ4-1)	Алюминий (АМг6)	Сталь (30ХГСА)	Углепластик (КМУ-4л)
Плотность, ρ , г/см ³	3,14	4,55	2,73	7.85	1,5
Предел прочности, σ_b , МПа	1260	1240	470	1100	700
Модуль упругости, E, ГПа	380	110	71	215	162
КТР, α , 10^{-6} K^{-1}	3.5	8	24	11.7	1.5
Теплопроводность λ , Вт/м · К	180	9.63	117	39.4	9.2
Теплоемкость, C, Дж/кг · К	680	527	900	496	1400
Жесткость, E/ ρ	133	24	26	27.4	90
Однородность микроструктуры, остаточные напряжения	+ Опред. технологией	+ Опред. технологией	+	+	- Ортотропн.
Размерная стабильность	+	+	- Старение	- Старение	+
Конструктивные возможности соединения деталей	+/- Закладные детали	+	+	+	+/- Закладные детали

свойств и разрушению конструкционных материалов. Необходимо учитывать, что скорость протекания пагубных процессов увеличивается при одновременном воздействии данных факторов. С учетом невозможности обслуживания космических комплексов, необходимо обеспечить требуемый ресурс в полном объеме.

Рассмотрим конструкционные материалы, приведённые в таблице.

В данной таблице представлены конструкционные материалы с их физико-механическими свойствами. Если рассматривать металлы, то они хороши с точки зрения обрабатываемости деталей (технологичности) и прочностными показателями, но высокая масса, старение в условиях КП, и высокий КТР делает их неконкурентоспособными по сравнению с карбидом кремния и композитными материалами. Также при использовании металлов как конструкционных материалов для размеростабильных конструкций становится необходимым использование спе-

циальных систем регулирования температуры или систем компенсации температурных деформаций, что приводит к усложнению конструкции, снижению её надежности и, как правило, к увеличению массы комплекса.

Наиболее перспективным материалом является карбид кремния, как по механическим свойствам, так и потому, что из него можно сделать как несущую конструкцию, так и зеркала, что обеспечит отсутствие температурной расстраиваемости. Размерная стабильность карбида кремния требует дальнейшего изучения, а так же технология его производства в России не отлажена, и его качество на сегодняшний день не удовлетворительно. Близкие к карбиду кремния по характеристикам и физико-механическим свойствам являются композиционные материалы. В России налажено производство углепластиков и стеклопластиков.

Стеклопластики не в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам, используемым в

Таблица 2.
Свойства углепластиков

Свойства углепластиков, кгс/мм ²	Структура армирования		
	[0]	[0, 90, ±45]	[0, 90]
σ_x^+	80	30	50
σ_x^*	75	50	42
E_x	14000	5400	7000
G_{xy}	600	1750	700-800

космосе, из-за небольшого модуля упругости, слабой износостойкости и гетерогенности структуры, способствующей ускоренному проникновению внешней среды в материал.

Наиболее подходящими при этом представляются материалы на основе углеродных волокон и полимерных матриц (углепластики). К настоящему времени накоплен значительный объем информации о физико-механических свойствах эпоксидных углепластиков, их поведении при различных видах нагружения (статике, повторной статике, динамике) и деформирования (растяжении, сжатии, сдвиге), а также сведений о ресурсе и календарном сроке эксплуатации. Вследствие анизотропных свойств углеродных волокон коэффициент линейного расширения слоистого композита может быть близким к нулю в широком диапазоне температур. Высокая удельная прочность углеродных волокон позволяет создавать из них с помощью прогрессивных технологических методов формообразования достаточно жесткие конструктивные элементы – трубчатые, панельные и их комбинации.

Однако из-за анизотропии физико-механических свойств возникают дополнительные сложности при проектировании, как самого материала, так и конструкции. О конструктивных свойствах углепластиков можно судить по данным табл. 2, в которой приведены механические характеристики углепластика КМУ-4л типовых структур армирования [0], [0, 90, ±45]. Следует отметить, что перекрестная укладка монослоев обеспечивает существенное понижение анизотропии материала,

устраняя сдвиговую и трансверсальную слабость, чувствительность к концентрациям напряжений в плоскости укладки слоев. В то же время благодаря анизотропии проявляются достаточно широкие возможности управления свойствами изделия, т.е. возможна оптимизация конструкций по массовым, жесткостным и геометрическим параметрам. Изменяя тип волокна, матрицы, их соотношения и схемы армирования, используя другие технологические возможности, можно создавать формостабильные конструктивные элементы с заданными параметрами.

Ассортимент отечественных углеродных армирующих наполнителей для высокопрочных и высокомодульных углепластиков включает два вида однонаправленных лент шириной 215–280 мм: ЛУ-П толщиной 0,1 и 0,2 мм и ЭЛУР-П толщиной 0,08 и 0,1 мм, а также углеродные жгуты «Кулон», ВМН-4 и УКН-П. Углепластики на основе углеродных лент имеют прочность при растяжении до 100 кгс/мм², на основе углеродного жгута УКН-П – до 160 кгс/мм², однако невысокая его стабильность (коэффициент вариации до 26%) служит причиной повышенного разброса свойств углепластика на основе жгута.

Проведя анализ Российского рынка углепластика, был сделан вывод, что наиболее подходящим является материал марки КМУ-4л, изготовленный методом прямого прессования и состоявший из чередующихся слоев поверхностно обработанной на воздухе ленты ЛУ-П-0,2, пропитанной эпоксидным связующим ЭНФБ.

Анализ результатов проведенного ком-

плекса экспериментальных исследований выполненных ВИАМ (Всероссийский Институт Авиационных Материалов) по оценке влияния факторов КП на характеристики композиционных материалов позволяет сделать следующие выводы:

- прочностные характеристики КМУ-4л, не уменьшаются после 456-1501 суток экспозиции в космосе, а при повышенных температурах даже возрастают;
- подтверждена радиационная стойкость эпоксидного углепластика;
- в следствии доотверждения связующего замечено уменьшение термического расширения материала после экспонирования.

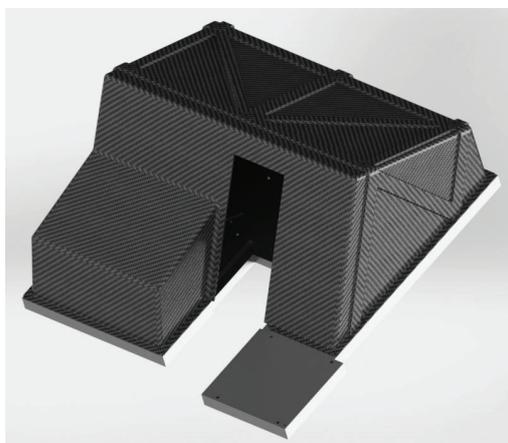


Рисунок 4.
Внешний вид корпуса

Исходя из анализа испытаний и данных по углепластику КМУ-4л, можно сделать заключение о том, что длительное воздействие природных факторов вызывает появление дополнительных поперечных связей за счет образования реакционноспособных групп, снижение внутренних напряжений и повышение структурной однородности связующего, что приводит к улучшению ряда физико-механических показателей, расширению температурного интервала работоспособности и стабилизации физико-механических характеристик. Данный углепластик соответствует требованиям и пригоден для использования его в качестве конструкционного материала для проектирования размеростабильных конструкций эксплуатирующийся в условиях космического пространства.

При проектировании корпуса учитывалась коррозионная активность углепластика к большинству металлических материалов, сборочные единицы, включающие углепластик, требуют особого подхода к их конструированию и противокоррозионной защите. Из результатов исследований проведённых ВИАМ по коррозионной активности углепластиков и защите металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком был сделан вывод, что для соединений алюминиевый сплав-углепластик необходимо предусмотреть следующие способы защиты от коррозии.

- Для защиты от контактной коррозии соединений металл-углепластик в качестве разделительных изоляционных слоев рекомендуется применять стеклоткань, напрессованную в процессе формования углепластика, или герметики.

- Элементы конструкции из алюминиевых сплавов, контактирующие с углепластиком, перед сборкой должны быть подвергнуты анодному оксидированию в сернокислотном электролите с последующим наполнением покрытия в растворе бихромата калия.

- В конструкциях их углепластиков использовать крепёж из титановых сплавов с анодно-оксидным покрытием.

- Для поставки крепежа рекомендуется применение пасты ВП-1 на основе эпоксидно-каучукового олигомера, содержащего ингибиторы коррозии.

На рис. 1 представлена 3Д модель спроектированного корпуса инфракрасного Фурье спектрометра. Корпус представляет собой конструкцию из крышки типа полумонokok с ребрами жесткости изготовленной из углепластика КМУ-4л, закладных деталей из титанового сплава ВТ-6 и размеростабильной облегченной плиты из алюминия Д16. Использование углепластика как конструкционного материала несущей конструкции корпуса позволило уменьшить массу по сравнению с алюминиевой версией более чем в 2 раза при этом, сохранив прочностные характеристики, так же переход на углепластик позволил сократить количество деталей конструкции.

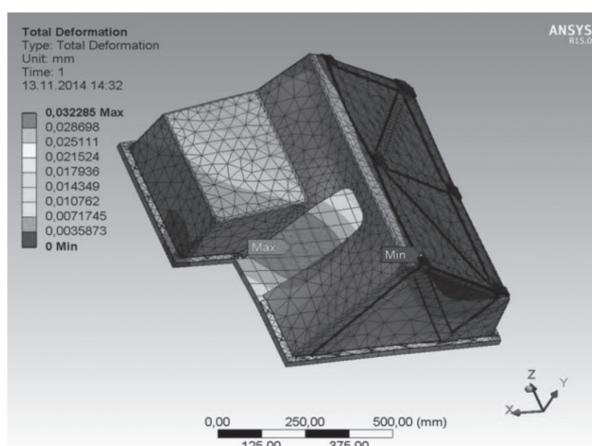
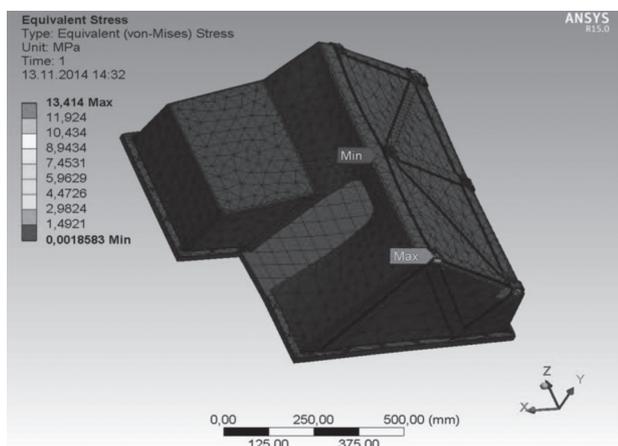


Рисунок 5.
Результаты измерений

Так же был произведён предварительный прочностной расчет соответствующий требованиям по стойкости к механическим воздействиям, прописанным в техническом задании к аппаратуре. Расчет производился в программной среде ANSYS, результаты расчёта показаны на рис. 5.

Список литературы:

1. *Ортенберг Ф.С.* //Методы инфракрасного зондирования Земли из космоса. – М.: «Знание»
2. *Кругер М.Я.* // Справочник конструктора оптико-механических приборов.- М.: «Машиностроение».
3. *Афонин С.М.* //Исследование и расчет статических и динамических характеристик пьезоактюатора нано- и микроперемещений. - Библиогр.: с 41.
4. *Деев И.С., Никушин Е.Ф.* //Модель космоса. Т.2. Воздействие космической среды на материа-

лы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Новикова Л.С.

5. *Карташов Е.А., Душин М.И., Ивонин Ю.Н. и др.* / Космическая технология и материаловедение. М.: Изд. «Наука».
6. *Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов Ф.Ф.* / Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М.: «Машиностроение».
7. *Акишин А. И., Новиков Л. С.* / Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. – М.: «Знание».
8. *Кабалов Е.Н., Старцев О.В.* / Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах. М.: «ВИАМ».
9. *Каримова С.А., Павловская Т.Г.* / Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком. М.: «ВИАМ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ ИМИТАТОРА ДИНАМИЧЕСКОЙ ФОНО-ЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ

КАРАНДИН А.В. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Карандин А.В.

Для обеспечения надлежащей контроля качества пассивных оптико-электронных систем обнаружения (ОЭСО) воздушных целей в инфракрасной (ИК) области спектра требуются имитаторы динамической фоно-целевой обстановки (ФЦО). Нужны приборы позволяющие имитировать множество целей с разной динамикой движения, что позволит более точно оценить разрабатываемые приборы.

Ключевые слова: имитатор фоно-целевой обстановки, оптико-электронные системы, ИК техника, аппаратура для стендовых контрольных оптических испытаний.

ВВЕДЕНИЕ

ОЭСО воздушных целей, работающие в ИК области спектра, в настоящее время начинают применяться в приборах военного назначения (ПВН) и технике. Применение таких систем повышает скрытность ПВН в военное время, в то время, как использование ПВН только с радиолокационными станциями приводит к быстрому обнаружению ПВН силами противника. Именно поэтому для обеспечения своевременного обнаружения воздушных целей, как днем, так и ночью, целесообразно использовать ОЭ обнаружители, работающие по собственному излучению нагретых тел в ИК диапазоне спектра.

Однако такие ОЭС обнаружения не нашли широкого применения в российском производстве, что объясняется:

- недостаточностью знаний об излучении воздушных и ложных целей;
- малым энергетическим контрастом фона и цели;
- отсутствием оптимальных алгоритмов обработки информации, ограничивающих возможности вычислительной техники, которая должна обеспечивать решение задачи обнаружения в реальном времени.

В настоящее время складывается благоприятные условия для создания ОЭС обна-

ружения, работающих в тепловом диапазоне и способными адаптироваться к конкретной ФЦО: совершенствуются многоэлементные фотоприемные устройства (ФПУ) высокой чувствительности, постоянно повышается возможности создания вычислительных средств, способных осуществлять решение задач обнаружения в реальном масштабе времени по сложным алгоритмам обработки оптической информации.

Еще одним препятствием на пути широкого использования подобных систем является отсутствие приборов контроля, имитирующих боевую задачу и тем самым оценивающим работоспособность ОЭС обнаружения. Существующие на данный момент имитаторы ФЦО, не могут дать достаточной информации о правильности работы ОЭС обнаружения.

Испытания прибора проводятся на специальных стендах, с помощью которых физически и математически моделируются внешние воздействия на ОЭС обнаружения. Если по результатам испытаний оказывается, что получить нужные показатели качества ОЭС обнаружения невозможно, то с помощью заложенных в стенд моделей можно провести параметрический или схемотехнический анализ конструкции проверяемого прибора

и, изменяя отдельные параметры конструкции ОЭС обнаружения или его схемы, прийти к требуемому результату.

В состав стенда для испытания ОЭС входят средства воспроизведения ФЦО, средства контроля и измерения параметров и характеристик приборов и условий испытаний. Такие стенды обычно включают следующие основные узлы:

- излучатели, чаще всего в виде черных тел;
- блоки задания спектральных, пространственных и временных параметров излучения, в состав которых могут входить различные тест-объекты-миры, оптические фильтры, маски-транспаранты, для имитации расположения которых в бесконечности используются коллиматоры;

- системы считывания сигналов, в состав которых могут входить видеоконтрольные или другие устройства отображения, записывающая аппаратура, устройства для предварительной обработки результатов испытаний и др.

Так же при разработке имитаторов стоит учитывать, что очень трудно одновременно имитировать излучения объектов и фонов, изменяющиеся по интенсивности, спектру длин волн, пространству, времени, состоянию поляризации. Поэтому часто в состав стенда включают несколько отдельных излучателей, каждый из которых, включая собственные средства воспроизведения спектральных, пространственных и временных характеристик имитируемых целей и фонов, с помощью собственной же или общей оптической системы создает на входе испытуемого ОЭС отдельную составляющую физической модели ФЦО.

Для сохранения постоянного температурного контраста между целью и фоном при изменении температуры окружающей среды нужно в состав стенда имитатора включить устройства контроля и регулировки температуры отдельных его частей, а так же датчики температуры окружающей среды [1].

Современные методы имитации ФЦО делятся на два основных типа: одноканальные, где излучение фона и цели совмещены

и передаются одним оптическим каналом, и многоканальные, где фон и цель передаются разными оптическими каналами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существующие системы имитации ФЦО, как уже было сказано выше, не могут в достаточной степени контролировать ОЭС. В этом можно убедиться, рассмотрев приборы, которые в основном применяются как у нас, так и за рубежом. На основании минусов и плюсов этих приборов нужно будет составить основные требования к разрабатываемому имитатору и определится с конструкцией и оптической системой прибора.

Одноканальные системы имитации ФЦО не могут в полной мере отобразить ФЦО для контроля ОЭСО, но их необходимо рассмотреть, так как на основе этих простых систем построено большинство имитаторов.

На рис. 1 показаны две типовые схемы таких имитаторов.

В первой из них (рис. 1, а) излучение источника 1, воссоздающего излучение цели, поступает на непрозрачную маску-транспарант 2, прорезь в которой имитирует видимые размеры и форму цели. Температура маски соответствует температуре фона.

В связи с этим доработать систему до динамической можно только для одной цели, но для подобной модернизации придется сильно усложнить конструкцию прибора. Так же нужно учитывать, что имитируемое движение будет относиться не только к цели, но и к фону.

Во второй схеме (рис. 1, б) с объективом коллиматора в виде внеосевой параболы 5 используется зеркально-отражающая маска 4, облучаемая дополнительным источником фона 3.

В обеих системах для борьбы с излучением окружающей среды и элементов конструкции, воздействующим на маски-имитаторы и создающим вредные составляющие сигналов на выходе испытуемых систем, используются бленды.

В подобных системах для имитации спектрального состава и яркости или силы излучения обычно используют достаточно широ-

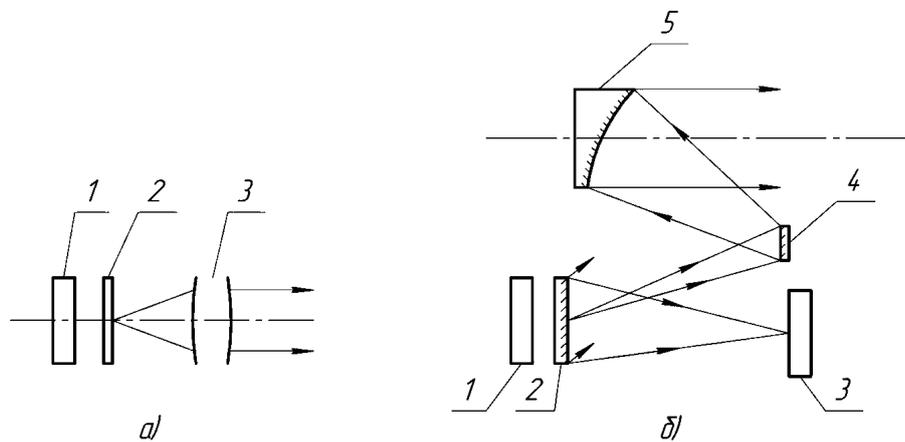


Рисунок 1.

Схемы двух типов имитаторов ФЦО:

а) с излучающей маской с прорезями:

1 – источник излучения; 2 – маска-транспарант; 3 – коллиматор;

б) с отражательной маской:

1 – источник излучения; 2 – дихроичное зеркало; 3 – источник фона;

4 – отражательная маска; 5 – объектив коллиматора [1]

кополосный по спектру и мощности излучатель – как правило, черное тело в сочетании с оптическими фильтрами [1].

Но имитация ФЦО при помощи широкополосных излучателей не единственный способ реализации приборов. В качестве имитации ФЦО можно использовать преобразование лазерного излучения в тепловое излучение на мишенях из различных материалов [2]. Но реализация такой системы довольно сложна, так как поддерживать температурный контраст, что увеличивает энергопотребление имитатора.

В иностранной литературе, за исключением первых двух систем, упоминается еще один вариант [3] показанный на рис. 2. От большинства систем его отличает вид коллиматора, в данной системе его роль выполняет асферическое зеркало и цилиндрической оправы с перегородками (для отсечения лишнего излучения и засветки), которое преобразует пучок расходящихся лучей поступающий из фокуса асферики в параллельный пучок.

Прибор предусматривает возможность смены мира, для имитации различной по интенсивности фоно-целевой обстановки.

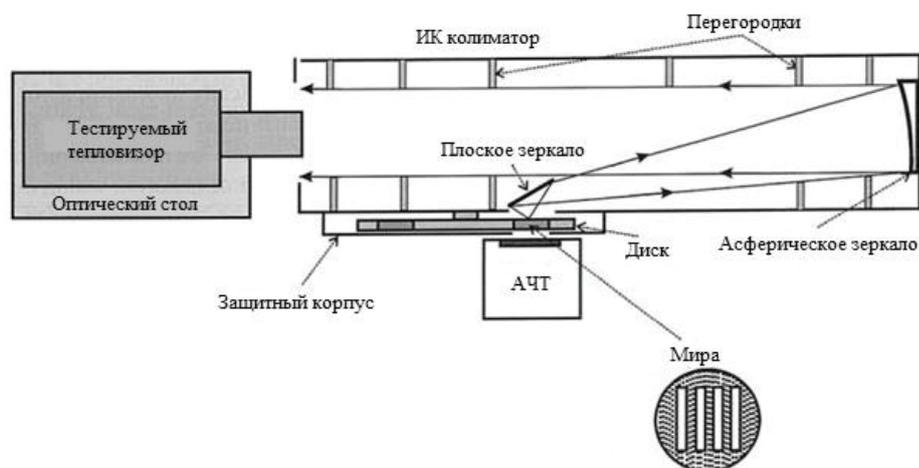


Рисунок 2.

Имитатор статической фоно-целевой обстановки [3]

Такой имитатор обеспечивает минимальные поглощения энергии исходящие от АЧТ, что является весомым плюсом прибора. Минус же заключается в том, что доработать такой имитатор до динамического не представляется возможным в связи с особенностями геометрии асферических зеркал.

В большинстве своем многоканальные системы имитации фоно-целевой делятся на два вида: призмочно-линзовые и зеркально-линзовые системы. Сразу можно отметить основные минусы таких систем в отличие от одноканальных:

- малая светосила из-за большого количества оптических элементов;
- большие габариты и более сложная конструкция оправы оптической системы станда;

- дополнительные требования к юстировке системы;

- большая стоимость прибора.

Но, несмотря на эти минусы преимущества у подобных систем значительнее:

- возможность применения данных систем для имитации динамической ФЦО;
- возможность имитации ложных целей;
- создание ФЦО более приближенной к реальной.

Рассмотрим один из вариантов многоканальных систем имитации ФЦО – зеркально-линзовая система, вид которой показан на рис. 3. Такой имитатор содержит коллиматор имитации фона 2, состоящий из оптически связанных источника излучения 9, тест-объекта 14, плоского зеркала 12 и зеркального объектива 13, и оборачивающей системы 11.

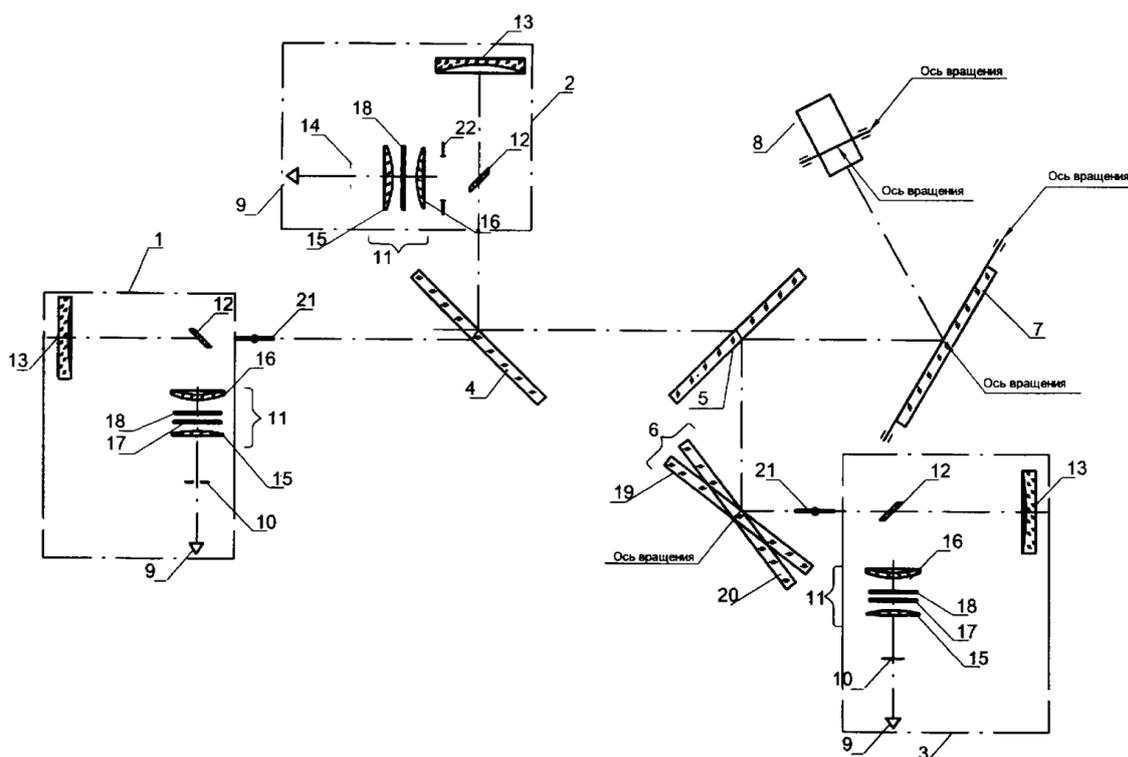


Рисунок 3.

Имитатор фоно-целевой обстановки:

- 1 – коллиматор имитации цели; 2 – коллиматор имитации фона;**
- 3 – коллиматор имитации ложных целей; 4, 5 – светоделители; 6 – блок зеркал;**
- 7- выходное зеркало; 8 – устройство для крепления проверяемого изделия;**
- 9 – источник излучения; 10 – сменный тест-объект; 11 – оборачивающая система;**
- 12 – плоское зеркало; 13 – зеркальный объектив; 14 – тест-объект; 15, 16 – объектив;**
- 17, 18 – спектральные фильтры; 19, 20 – зеркала; 21 – шторка;**
- 22 – ирисовая диафрагма [4]**

Так же прибор содержит коллиматоры имитации цели 1 и ложных целей 3, которые состоят из оптически связанных источников излучения 9, сменного тест-объекта 10, обрабатывающей системы 11, плоского зеркала 12 и зеркального объектива 13.

Излучение коллиматора имитации цели 1 проходит через первый светоделитель 4, второй светоделитель 5, отражается от выходного зеркала 7 и попадает на входной зрачок проверяемого изделия, установленного в устройстве 8 для крепления проверяемого изделия.

Излучение коллиматора имитации фона 2 отражается от первого светоделителя 4, и далее идет также, как излучение коллиматора имитации цели 1.

Излучение коллиматора имитации ложной цели 3 попадает на блок зеркал 6 разделяется блоком зеркал на два пучка, имитирующих излучение от двух ложных целей. Далее излучение отражается от второго светоделителя 5, от выходного зеркала 7 и попадает на входной зрачок проверяемого изделия, установленного в устройстве 8 для крепления проверяемого изделия. При качании в противоположных направлениях зеркал 19, 20 изменяется угол между пучками, имитирующими излучение от двух ложных целей, и происходит имитация разлета ложных целей.

Выходное зеркало 7, осуществляющее качания по двум осям, обеспечивает возможность имитации сложного движения цели и ложных целей в поле зрения проверяемого изделия.

Устройство 8 для крепления проверяемого изделия обеспечивает возможность заклона проверяемого изделия по двум осям.

Данный вариант построения имитатора близок для решения поставленной задачи, но не в полной мере позволяет обеспечить все необходимые требования к разрабатываемому прибору. В частности – имитацию динамических объектов, движущихся по определенному закону, и обладает слишком малой энергетикой [4].

Исходя из выше сказанного, можно обозначить основные требования к разрабатываемому прибору:

- минимизация габаритов элементов имитатора;
- возможности имитации нескольких динамических целей в одном канале прибора;
- по возможности избегать оптических элементов, сильно понижающих светосилу системы;
- найти вариант реализации динамического движения целей с наименьшими энергетическими затратами;
- в канале фона ввести дополнительный элемент, который будет имитировать движение контролируемого прибора с заданной скоростью.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Начать разработку прибора стоит с определения одной из основных частей – элемента, обеспечивающего динамику объектов.

Из рассмотренных вариантов (зеркало, вращающееся по двум осям; вращение источника излучения и т.д.) наиболее перспективным видится использование в имитаторе тонкостенное зеркало, установленное на двухкоординатный пьезодефлектор. Пьезодефлекторы оптического излучения – это устройства, позволяющие изменять направление распространения луча по определенному закону с помощью пьезоэлементов. Пьезоэлемент – электромеханический преобразователь, изготавливаемый из пьезоэлектрических материалов, определенной формы и ориентации относительно кристаллографических осей, с помощью которого механическая энергия преобразуется в электрическую (прямой пьезоэффект), а электрическая в механическую (обратный пьезоэффект). Следовательно, при использовании пьезодефлекторов мы получаем элемент удовлетворяющий требованиям к имитатору ФЦО.

На основе остальных требований были разработаны три варианта построения имитатора, два из которых имели существенные минусы по малой светосиле и сложности конструкции канала цели.

Основными минусами разработанной системы являются:

- необходима система охлаждения корпуса

имитатора цели для уменьшения шумов от его нагревания;

- усложненная юстировка канала цели;
- необходимость внесения фокусирующих объективов для фокусировки излучения от абсолютно черного тела (АЧТ) цели в фокальную плоскость коллиматора.

Плюсами, компенсирующими большинство отрицательных моментов прибора, являются:

- возможность изменения интенсивности и величины пучка для имитации каждой цели независимо друг от друга;
- возможность одновременной имитации пяти целей;
- малые углы поворота зеркал пьезодефлектором, достаточные для покрытия входного зрачка ОЭС обнаружения полностью;
- небольшой световой диаметр системы;
- высокая светосила;
- предусмотрена смена светофильтров для имитации различных целей;
- размещение АЧТ между коллиматором и дефлекторами уменьшают габариты прибора;

- возможность имитации движения фона.

Разработанная система приведена на рис. 4. При данном построении оптической системы прибора АЧТ 1 делится на пять независимых источников (предполагается использовать вольфрам, нагретый до 1500 К). Корпус 2 представляет собой кольцо с вырезом для помещения и установки АЧТ 1 и имеющее пять ирисовых диафрагм 3 для изменения величины излучаемого плоскостью АЧТ 1 (а то и вовсе исключая определенный источник из работы данный момент времени). Для устранения возможных паразитных излучений и отрезания определенных спектральных интервалов канал фона содержит сменные светофильтры 4. Излучение фокусируется в фокальной плоскости коллиматора 7 с помощью перемещаемого, в зависимости от угла поворота зеркала пьезодефлектором 6, фокусирующего объектива 5. С помощью полупропускающей пластинки 12, расположенной под углом 45° от оптических осей обоих каналов, излучение целей поступает в общий канал.

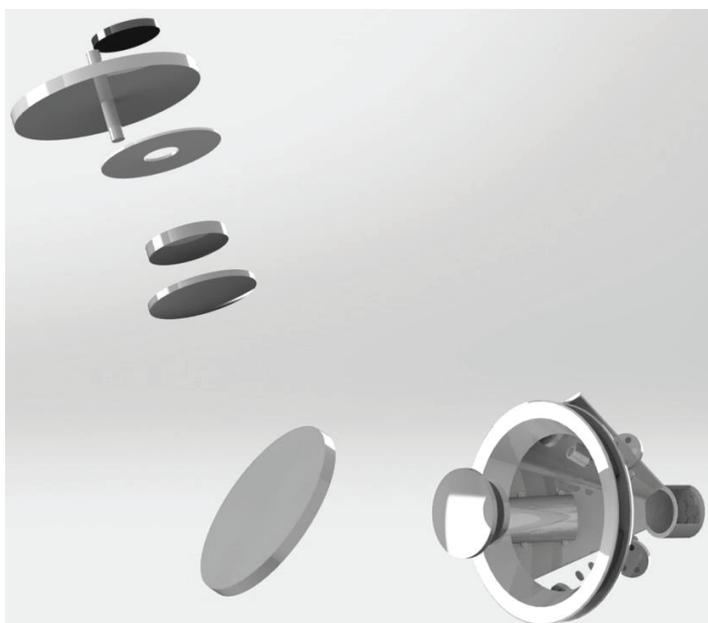


Рисунок 4.

Разработанная оптическая система:

1 – АЧТ канала цели; 2 – корпус; 3 – ирисовые диафрагмы; 4 – блок светофильтров;

5 – фокусирующий объектив; 6 – пьезодефлектор; 7,11 – коллиматор;

8 – АЧТ канала фона; 9 – вращающаяся мира; 10 – точечная диафрагма;

12 – полупропускающая пластинка

Канал фона представляет собой АЧТ 8 излучающее на вращающуюся миру 9. Проходя через точеную диафрагму 10, расположенную в фокальной плоскости коллиматора 11, и коллиматор 11 параллельный оптической оси пучок лучей попадает на полупропускающую пластинку 12 и проходит в общий канал имитатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные работы (разработка конструкции канала цели и фона, патентный поиск и др.) показали возможность создания приборов имитации динамической ФЦО с использованием разработанных конструкций для контроля пассивных ОЭСО воздушных целей в ИК области спектра. Она удовлетворяет всем предъявленным требованиям, учитывает возможность присоединения канала контроля воспроизводимой ФЦО.

Данный имитатор может быть использован

в стендах контроля качества большинства ОЭСО для имитации боевой задачи и оценки работоспособности этих систем.

Список литературы:

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004 г. 444 с.
2. Дмитриев Е.И. Метод оптической имитации динамических объектов излучающих в инфракрасной области спектра. // Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, 2005 г. 153 с.
3. Chrzanowski K. Testing of military optoelectronic system // Opto-electronics review 9(4), 2001 г. 337-384 с.
4. Маслакова Н.Ф., Касилович В.Б., Калинин А.Н., Азамов А.М. Патент на полезную модель 81305 Стенд для имитации фоно-целевой обстановки // Открытое акционерное общество «Пеленг», 2009 г.

ИНФРАКРАСНАЯ ПАНОРМАНАЯ АЭРОФОТОКАМЕРА

ПАТИН Г.А. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Патин Г.А.

Рассмотрена возможность создания инфракрасной панорамной аэрофотокамеры. Создана оптическая схема аэрофотоаппарата, приведена оценка качества изображения получаемых снимков. Произведен выбор приемника излучения, и рассчитана разрешающая способность прибора. Полученные результаты расчетов подтвердили возможность создания панорамных аэрофотокамер работающих в диапазоне длин волн 8-14 мкм.

Ключевые слова: аэрофотокамера, инфракрасная съемка, панорамная аэрофотосъемка.

ВВЕДЕНИЕ

Материалы воздушного фотографирования находят свое применение в разных областях деятельности, таких как создание карт мест-

ности, морской съемке, геологических изысканиях, военной разведке, пожарной безопасности и др. Появление болометрических приемников излучения привело к созданию малогабаритных тепловизоров. Результатом

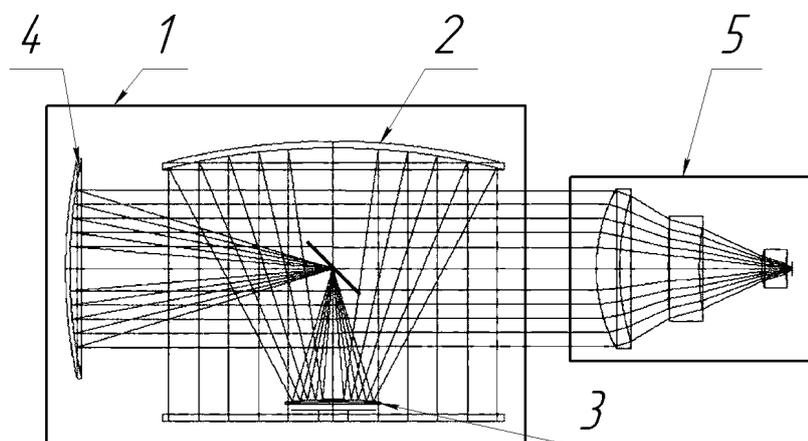


Рисунок 1.
Оптическая схема аэрофотокамеры

цифровой инфракрасной (ИК) аэросъемки являются цифровые ИК-снимки или тепловые снимки, представляющие собой изображение температурных полей, излучаемых земной поверхностью и инженерными сооружениями, расположенными как на поверхности земли, так и под землей.

Аэрофотосъемка в ИК диапазоне актуальна для:

- выявления теплотерь трубопроводов;
- выявление мест незаконного сброса отходов производства;
- съемки почвенного покрова;
- военных целей.

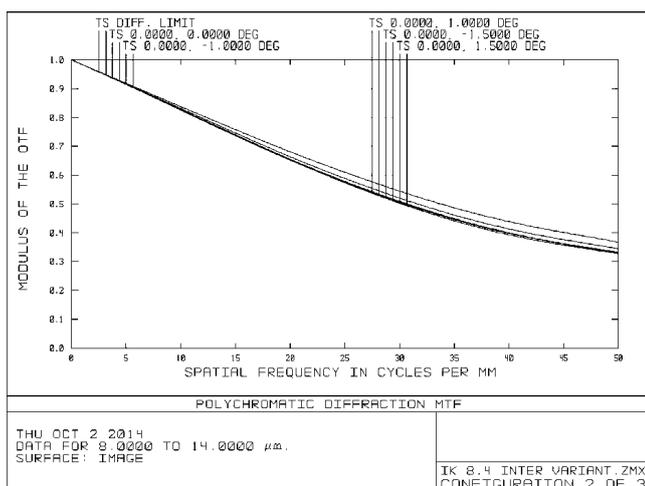


Рисунок 2.
График МПФ аэрофотокамеры

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является создание панорамной аэрофотокамеры, производящей съемку в дальнем инфракрасном диапазоне 8-14 мкм (LWIR).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Была создана инфракрасная панорамная аэрофотокамера, оптическая схема, которой представлена на рис. 1. Панорамирование осуществляется с помощью перебрасывания афокальной зеркальной насадки 1. Афокальная насадка состоит из зеркал 2 и 3 образующих предфокальный объектив Кассегрена, в фокусе которого находится плоское наклонное зеркало. Наклонное зеркало стоит в фокусе параболического зеркала 4 образующего параллельный пучок лучей на выходе из афокальной насадки, где стоит фокусирующий линзовый инфракрасный объектив 5. В плоскости наилучшего изображения объектива 5 находится болометрический приемник излучения.

На рис. 2 представлен график модуляционно-передаточной функции аэрофотокамеры.

На рис. 3 представлено пятно рассеяния точки аэрофотокамеры.

Для получения высокого качества изображения диаметр энергетического пятна рассеяния должен быть меньше или соизмерим с размером пикселя приемника излучения. Из рисунка 3 видно, что наибольший радиус пятна, в котором сконцентрировано 70%

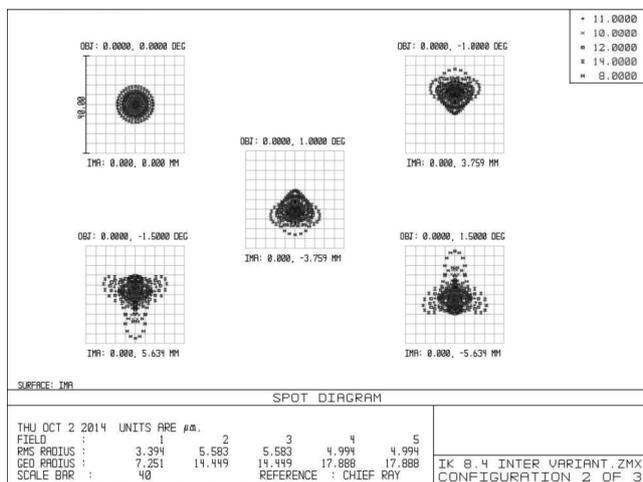


Рисунок 3.
Пятно рассеяния точки

энергии излучения составляет 5.583 мкм. Отсюда можем найти диаметр пятна рассеяния точки, в котором сосредоточено 70% энергии, диаметр будет равен $d \approx 1.2$ мкм. Приемник излучения нужно выбирать так, чтобы размер пикселя превышал 11.2x11.2 мкм.

Параметры аэрофотокамеры представлены в табл. 1.

В качестве приемника излучения выберем болометрическую матрицу UL04272-032 Pico640P™, ее характеристики представлены в табл. 2.

Разрешающая способность объектива на контрасте 0.3 равна $N_1 = 50$ л/мм, это подтверждается рисунком 2.

Разрешающая способность матрицы равна:

$$N_{\text{матр}} = \frac{1}{2 \cdot a} = \frac{1}{2 \cdot 17 \cdot 10^{-3}} = 29.4 \text{ л/мм}$$

Разрешающая способность аэрофотоаппарата будет равна:

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_{\text{матр}}} = \frac{1}{50} + \frac{1}{29.4} = 0,054$$

$$N = \frac{1}{0,054} = 18.5 \text{ л/мм}$$

В табл. 3 приведены характеристики носителя аэрофотокамеры

За счет движения афокальной насадки осуществляется так же компенсация крена носителя аппарата.

Ширина захвата снимаемой местности:

$$T_{0^\circ} = \text{tg}(\beta) \cdot L_1 = 2 \cdot \text{tg}(16.2^\circ) \cdot 5000 = 2.9 \text{ км}$$

$$T_{0^\circ} = \text{tg}(\beta) \cdot L_2 = 2 \cdot \text{tg}(16.2^\circ) \cdot 7500 = 4.35 \text{ км}$$

где: L_1, L_2 , - высота полета летательного аппарата 5000 м, и 7500 м соответственно.

Разрешение на местности при съемке перпендикулярно объекту съемки, будет равно:

$$S_{0^\circ} = \frac{L_1}{N \cdot f'} = \frac{5000}{18.5 \cdot 225} = 1.2 \text{ м}$$

$$S_{0^\circ} = \frac{L_2}{N \cdot f'} = \frac{7500}{18.5 \cdot 225} = 1.8 \text{ м}$$

где: N - разрешающая способность аэрофотоаппарата;

f' - фокусное расстояние объектива.

Таблица 1.
Параметры аэрофотокамеры

Параметры	Значение
Фокусное расстояние, мм	225
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8-14
Угловое поле объектива, град	3
Угол панорамирования β , град	34.2
Относительное отверстие, 1/К	0.9
Разрешение на контрасте 0.3, л/мм	50

Таблица 2.
Характеристики болометрической матрицы

Размер пикселя a , мкм	17 x 17
Размер чувствительной площадки приемника	640 x 480
Частота кадров, fps	30

Таблица 3.
Характеристики носителя и аэрофотоаппарата

Характеристика	Значение	
Высота полета Н, м	5000	7500
Скорость полета V, м/с	100	150
Максимальное перекрытие кадров Р, %	20	

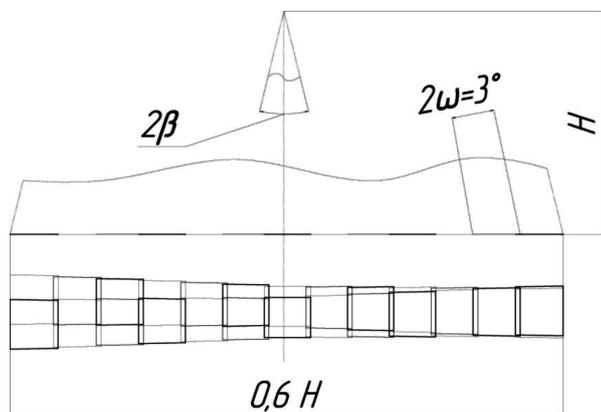


Рисунок 4.

Покадровое формирование панорамного снимка

Разрешение на местности в крайней точки перспективной съемки, будет равно:

$$S_{32.4^\circ} = \frac{L_{11}}{N \cdot f'} = \frac{5207}{18.5 \cdot 225} = 1.25 \text{ м}$$

$$S_{32.4^\circ} = \frac{L_{22}}{N \cdot f'} = \frac{7810}{18.5 \cdot 225} = 1.87 \text{ м}$$

где: L_{11} -расстояние до объекта съемки в крайней точки на высоте 5000 м;

L_{22} - расстояние до объекта съемки в крайней точки на высоте 7500 м.

На рис. 4 представлено покадровое формирование панорамного снимка.

ВЫВОД

Проведенные расчеты показали, что разработанная схема инфракрасной панорамной аэрофотокамеры, может быть применена для создания малогабаритных панорамных аэрофотоаппаратов. Фокусирующий линзовый объектив обеспечивает высокое качество изображения, что подтверждается высокой разрешающей способностью 50л/мм на контрасте 0.3.

Данная аэрофотокамера может устанавливаться на беспилотных летательных аппаратах как в разведывательных целях, так и в обнаружении очагов возгорания лесных массивов, обнаружении мест незаконного сброса производственных отходов, выявление теплотерьер в трубопроводах.

Список литературы:

1. *Артюхина Н.К., Корсак Н.В.* Композиция зеркальной анастигматической афокальной системы // УДК 535.317.- Вестник БНТУ.-2006.- №1.-С.41-44.
2. <http://fly-photo.ru/ik-termosemka.htm> [Интернет] 2014 год.
3. *Русинов М.М.* Несферические поверхности в оптике.- М. :Недра, 1992.-С. 145-149.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТАКТИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

ПАТИН Г.А., КАРЕВ А.В. - операторы 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Патин Г.А.



Карев А.В.

Рассмотрена возможность создания робототехнической системы тактической разведки. Рассчитаны три оптические схемы объективов. Создана 3D модель системы. Промоделированы снимки получаемые системой. Дана характеристика целесообразности применения данных спектральных диапазонов. Создана 3D модель комплекса оперативной тактической разведки, носителем в которой является БЛА. Полученные результаты расчетов подтвердили возможность создания ро-

бототехнической системы производящей лазерную дальнометрию и видео разведку в трех спектральных диапазонах:

- Видимом: 0.48-0.7 мкм;
- Инфракрасном: 3.4-5.2 мкм (MWIR);
- Инфракрасном: 8-14 мкм (LWIR).

Ключевые слова: робототехнический комплекс, оптико-электронная система, инфракрасная съемка, тепловые сигнатуры, привод слежения, лазерный дальномер.

ВВЕДЕНИЕ

Мы живем в переходный период. Скоро придет время, когда самоуправляемые беспилотники (БЛА) начнут вытеснять пилотируемую авиацию, роботы пойдут в бой вместо солдат, господство в космосе и в воздухе приобретут ещё больший вес. Компьютеры частично заменят человека при принятии решений на поле боя. Потребность вооруженных сил РФ, в современных роботизированных комплексах разведки позволяющих вести наблюдение, как днем, так и ночью - высока. Наиболее эффективны для ведения круглосуточной разведки многоканальные оптико-электронные системы. Каждый канал такой системы работает в собственном спектральном диапазоне и имеет ограничение по информативности, накладываемые внешними условиями: уровнем освещенности, влажностью воздуха, задымленность атмосферы [1]. Комплексование разнеспектральных

изображений повышает информативность снимка, а также обнаружительную способность оптико-электронной многоканальной системы.

К приоритетным направлениям совершенствования вооружения относится создание робототехнических комплексов военного назначения, позволяющих производить много-спектральную съемку местности, в целях выявления замаскированных средств ВВСТ и живой силы противника [3].

Целью данной работы является создание робототехнического комплекса военного назначения предназначенного для решения задач воздушной сигнатурной технической разведки.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КАНАЛОВ НАБЛЮДЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

Известно, что максимальная эффективность работы ОЭС достигается в «окнах» прозрачности атмосферы. При этом в раз-

личных участках спектра основные потери, связанные с поглощением излучения толщей атмосферы вдоль трассы наблюдения, определяется различными составами газовых сред и примесей. Так, если в диапазоне 1-2 мкм коэффициент пропускания определяется, главным образом, величиной концентрации углекислого газа (CO_2), то в диапазонах 3-5 и 8-12 мкм основные потери происходят из-за поглощения излучения водяными парами (H_2O), концентрация остальных примесей влияет меньше [1].

Применение рабочего тепловизионного диапазона 8-14 мкм эффективно при задымлении места съемки, тепловизионный диапазон 3-5 мкм эффективен при повышенной влажности.

Комплексирование разноспектральных изображений позволяет вести разведку местности при различных состояниях атмосферы.

Освещенность объекта излучением атмосферы определяет уровень интенсивности отраженного излучения от объекта, фиксируемого ОЭС. Уровень освещенности определяет эффективность работы ОЭС видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов [2].

Так, ОЭС, работающие в видимой части спектра эффективны при достаточно больших уровнях освещенности начиная от 10-50 лк и заканчивая десятками тысяч люкс.

Эффективность работы ОЭС тепловизионного-диапазона не зависит от освещенности на местности, так как определяющую роль в данном случае играет собственное тепловое излучение объекта и фона. ОЭС тепловизионного-диапазона обладают возможностью круглосуточной работы, но более низкой информативностью, чем ОЭС видимого диапазона. Поэтому комплексирование ОЭС различных спектральных диапазонов позволяет добиться непрерывного круглосуточного ведения разведки [1].

Одним из основных параметров фоноцелевой обстановки можно считать контраст между объектом разведки и подстилающим фоном. В условиях одной и той же фоноцелевой обстановки ОЭС различного диапазона показывают различную эффективность.

Объекты разведки при смене рабочего спектрального диапазона ОЭС изменяют величину контраста с фоном вплоть до смены знака. В различных фоноцелевых условиях преимущества имеют ОЭС различных спектральных диапазонов. Для ОЭС тепловизионного-диапазона контраст (температурный контраст) определяется разностью температуры объекта и фона. Для диапазона 3-5 мкм температурный контраст между объектами и фоном выше, и в соответствии с законом Планка более отчетливо видны тела с большой температурой. В диапазоне 8-14 мкм более информативна подстилающая поверхность местности [1, ...]. Следовательно, одновременное использование обоих диапазонов будет увеличивать вероятность правильного обнаружения целей по сравнению со случаем использования одного канала. Таким образом, задача обеспечения круглосуточности и всепогодности боевого применения ОЭС разведки в широком диапазоне внешних условий наиболее эффективно решается путем комплексирования изображений, полученных в различных спектральных диапазонах работы ОЭС. Синтезируя в едином изображении отличительные признаки изображений различных каналов и акцентируя на них внимание, можно резко повысить информативность и эффективность ведения тактической разведки [1].

Задачи, которые должна решать разрабатываемая многоспектральная оптико-электронная система, это:

- многоспектральная разведка местности;
- обнаружение замаскированных объектов ВВСТ и живой силы противника;
- сопровождение колон авто/бронемашин;
- разведка мест чрезвычайных ситуаций.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является создание трехспектральной оптико-электронной системы, производящей съемку в трех спектральных диапазонах:

- видимом: 0.48-0.7 мкм;
- среднем инфракрасном: 3.4-5.2 мкм (MWIR);

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

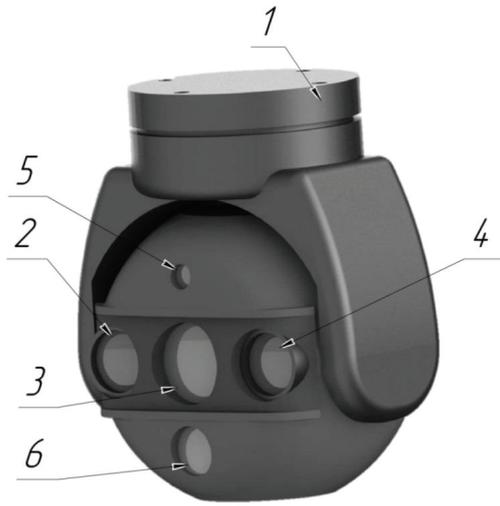


Рисунок 1.
3D модель аэрофотокамеры

- дальнем инфракрасном: 8-14 мкм (LWIR).

Система должна иметь возможность слежения за объектом съемки, а также содержать алгоритм обработки разноточных изображений.

Была создана трехспектральная оптико-электронная роботизированная система, на рисунке 1 представлена 3D модель системы. Многоспектральная камера устанавливается в 2-ух координатный подвес – 1. Объектив – 2 производит съемку в спектральном диапазоне 0.48-0.7 мкм, объектив – 3 производит съемку в средневолновом инфракрасном диапазоне 3.4-5.2 мкм, объектив – 4 производит съемку в дальнем инфракрасном диапазоне 8-14 мкм, 5 – излучающий канал лазерного дальномера, 6 – приемный канал лазерного дальномера. Благодаря использованию дальномера появляется возможность осуществить вывод координат цели на экран оператора.

На рис. 2 представлено перекрытие угловых полей объективов.

Параметры объективов представлены в таблице 1.

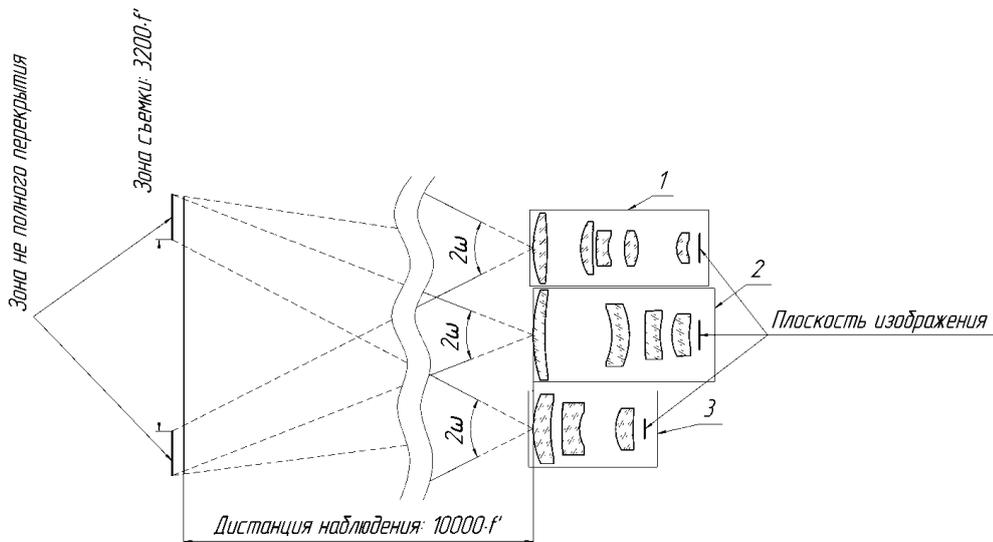


Рисунок 2.
Перекрытие угловых полей объективов

Таблица 1.
Параметры объективов

Параметры	Спектральный диапазон, мкм		
	0.48-0.7	3.4-5.2	8-14
Фокусное расстояние f' , мм	50	50	50
Угловое поле объектива 2ω , град	10	10	10
Относительное отверстие, 1/К	2.0	1.0	1.4

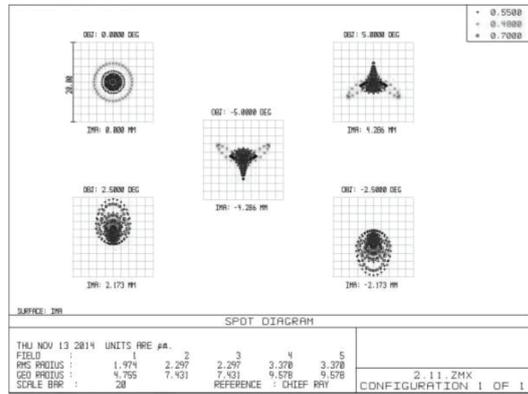
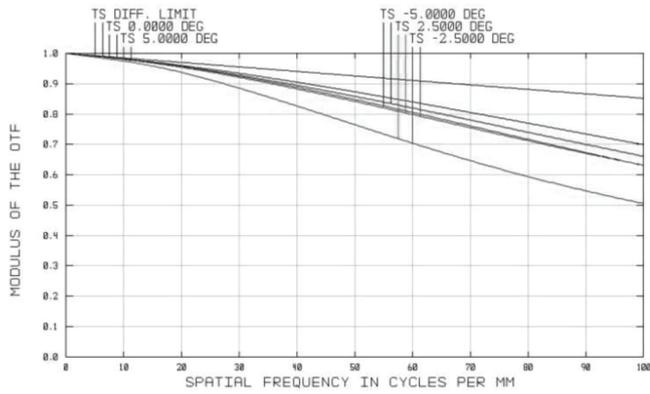


Рисунок 3.

МПФ и вид пятна рассеяния точки объектива рассчитанного для работы в диапазоне длин волн 0.48-0.7 мкм

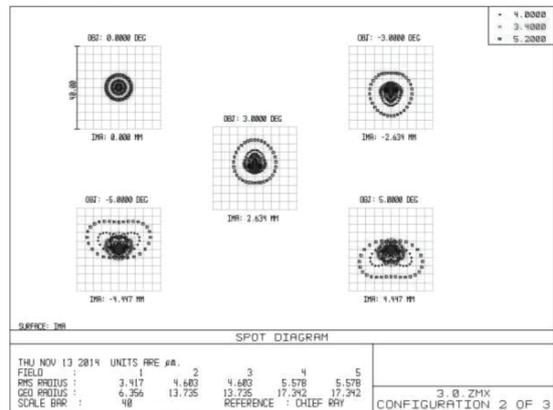
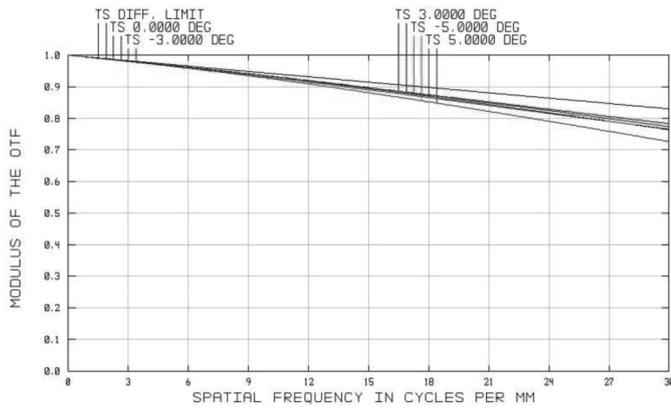


Рисунок 4.

МПФ и вид пятна рассеяния точки объектива рассчитанного для работы в диапазоне длин волн 3.4-5.2 мкм

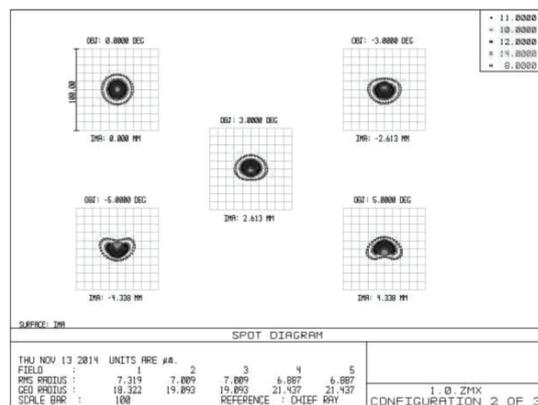
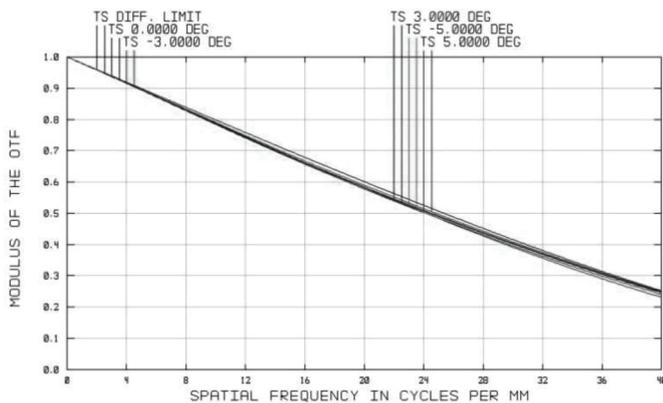


Рисунок 5.

МПФ и вид пятна рассеяния точки объектива рассчитанного для работы в диапазоне длин волн 8-14 мкм

На рисунках 3, 4, 5 представлены графики модуляционно-передаточных функций, а также пятна рассеяния точки объективов. Качество изображения всех объективов близко

к дифракционному пределу, это один из критериев высокого качества изображения оптической системы. Согласовка диаметра пятна рассеяния точки, и размера пикселя ПИ дает

Таблица 2.
Пример аэрофотоснимков

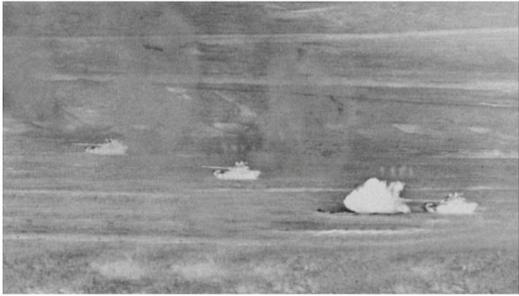
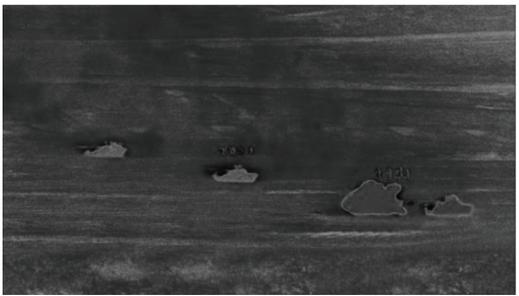
<p>Изображение, получаемое объективом видимого диапазона (0.48-0.7 мкм). Изображение информативно в хороших погодных условиях, днём, без применения дымовых завес.</p>	
<p>Изображение, получаемое объективом среднего ИК диапазона (3.4-5.2 мкм). На снимке хорошо видны объекты ВВТ, и высокотемпературные тепловые сигнатуры. Температурный контраст между объектами и фоном выше, этот спектральный диапазон эффективен при повышенной влажности.</p>	
<p>Изображение, получаемое объективом дальнего ИК диапазона (8-14 мкм). В этом спектральном диапазоне начинают излучать тела с температурами около нуля градусов Цельсия. Изображение информативно в случае применения дымовых завес, а также в сумерках. На изображении хорошо видна живая сила противника. Объекты ВВТ, и высокотемпературные тепловые сигнатуры засвечены, и неотличимы друг от друга.</p>	



Рисунок 6.

3D модель комплекса тактической разведки

высокую разрешающую способность аппарата. Для получения высокого КПД приемника излучения (ПИ), 70% энергии в пятне рассеяния точки объектива, должно укладываться в размер пикселя ПИ. Данная система ведет видео съемку в трех спектральных диапазонах, это позволяет избавиться от компенсации сдвига изображения.

Для получения высокого качества изображения диаметр энергетического пятна рассеяния должен быть меньше или соизмерим с размером пикселя приемника излучения.

Проведено предварительное проектирование системы многоспектральной оптико-электронной тактической разведки, в ходе которого произведен расчет оптических систем объективов (дана оценка качества изображения получаемым снимкам), создана 3D модель системы, а также представлена 3D модель комплекса тактической разведки на базе БЛА.

Приведен пример исполнения комплекса оперативной тактической разведки.

Пример изображений, полученных рассчитанными объективами представлен в табл. 2.

Разработан алгоритм обнаружения объектов на изображениях по тепловым сигнатурам. Алгоритм позволяет выделять признаки объектов на изображениях и в результате их анализа выделять объекты на изображении видимого диапазона. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 7.

Основные операции данного алгоритма, обеспечивающие выделение объектов и их анализ: бинаризация, выделение контуров и границ методом Канни, морфологическая обработка бинаризованных изображений.

Операция порогового разделения, которая в результате дает бинарное изображение, называется бинаризацией. Целью операции бинаризации является радикальное уменьшение количества информации, содержащейся на изображении. В процессе бинаризации исходное полутоновое изображение, имеющее некое количество уровней яркости, преобразуется в черно-белое изображение, пиксели которого имеют только два значения – 0 и 1 [4].

Оператор Канни используется для выделения границ объектов на изображении и работает в следующей последовательности:

- изображение сглаживается гауссовым фильтром с заданным отклонением σ для сокращения шума;
- в каждой точке вычисляется градиент $g(x, y) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2}$ и направление края $\alpha(x, y) = \arctg(G_x / G_y)$. Точки перепада определяются как точки локального максимума градиента;
- точки перепада вызывают рост гребней на изображении модуля градиента. Затем алгоритм отслеживает верх этих гребней и присваивает нулевое значение точкам, которые не лежат на гребне. Затем пиксели гребня подвергается пороговой обработке с использованием двух порогов $T1$ и $T2$, причем $T1 < T2$. Пиксели гребня, величина которых больше $T2$ называются «сильными», а пиксели, значения которых попадают в интервал $[T1, T2]$, называются «слабыми»;

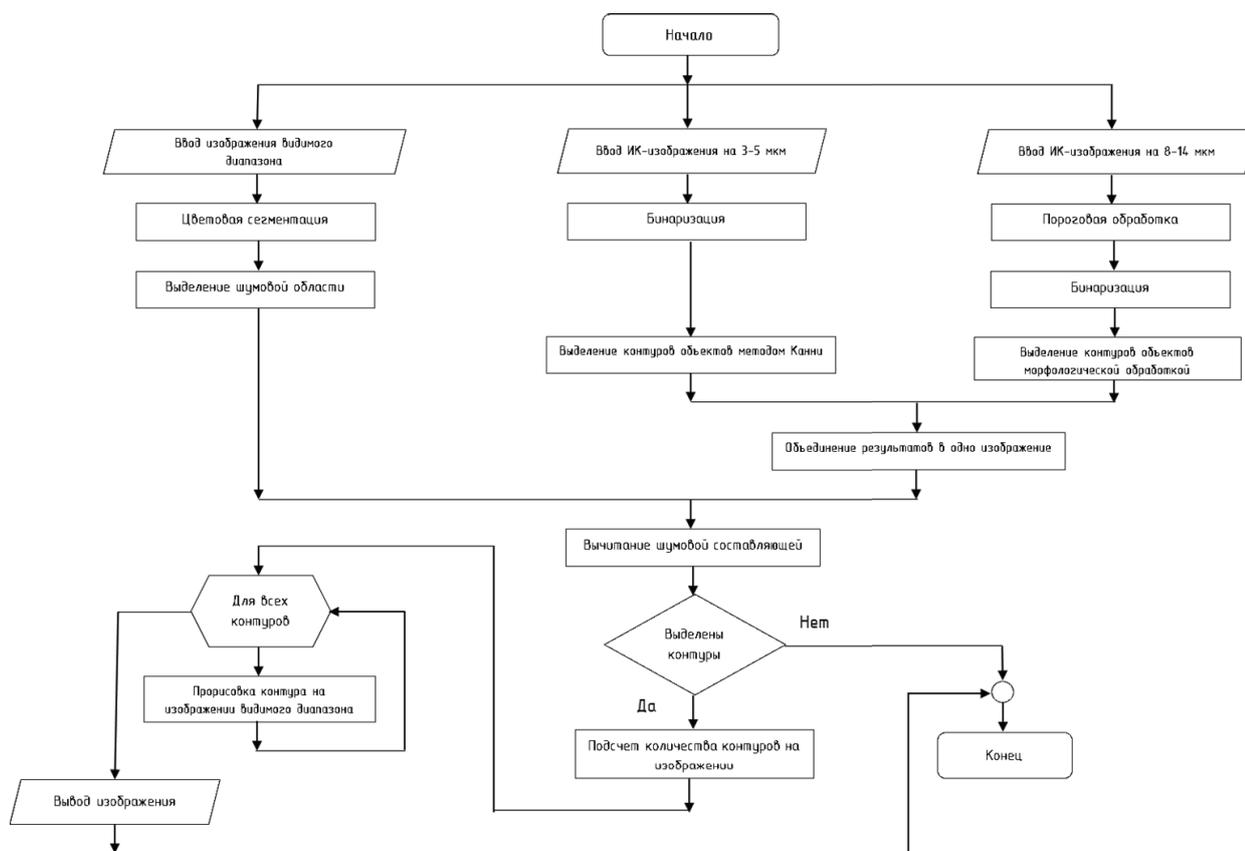


Рисунок 7.

Блок-схема алгоритма обнаружения объектов на разномасштабных изображениях

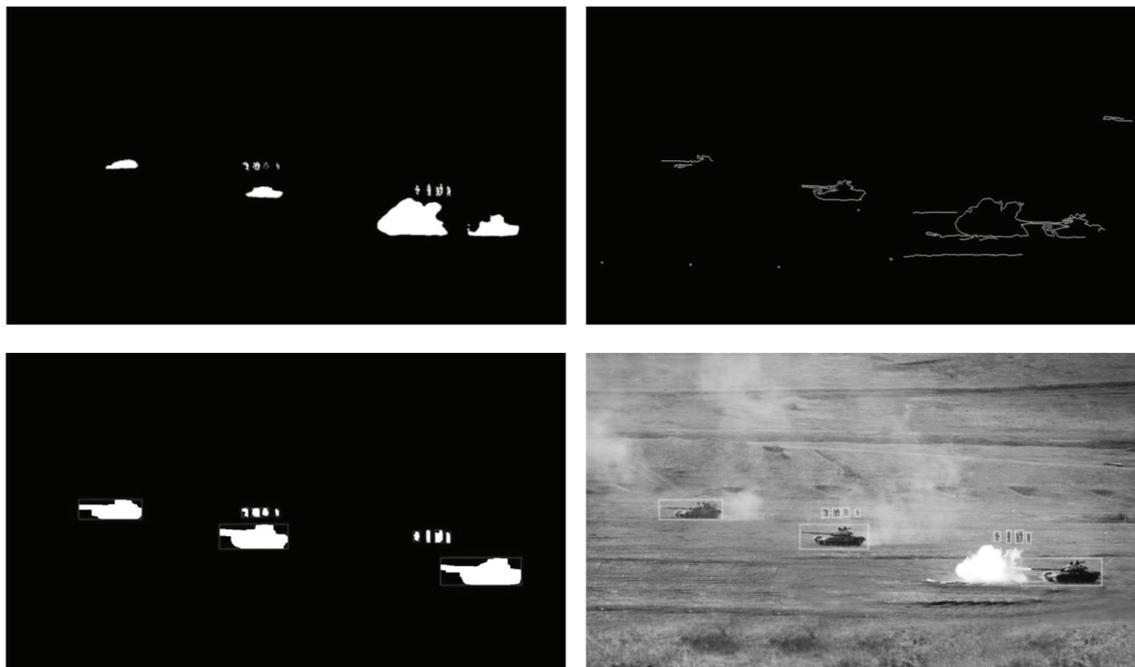


Рисунок 8.

Результаты работы основных операций алгоритма:

а) – бинаризация изображения в диапазоне 8-14 мкм, б) – бинаризация изображения в диапазоне 3-5 мкм, в) – получение контуров, г) – выделение объектов на изображении видимого диапазона

– алгоритм совершает соединение, добавляя к сильным пикселям слабые, которые связаны с сильными [5].

Математическая морфология является инструментом для извлечения определенных компонентов изображения, полезных для представления и описания форм объектов, например, их остовов, границ, выпуклых оболочек [6]. Осуществляется морфологическая обработка разнеспектральных изображений по отдельности и изображения результата суммирования с целью обнаружения контуров и удаления лишних элементов.

Результаты работы основных операций алгоритма представлены на рис. 8.

ВЫВОДЫ

Итогом данной работы видится создание воздушного робототехнического комплекса военного назначения (РТК ВН) предназначенного для решения задач воздушной многоспектральной тактической разведки. Данный комплекс РТК ВН возможно охарактеризовать как комплекс:

а) ближнего действия (радиусом действия до 25 км), б) малого класса (от 1 до 30 кг).

- Многоспектральная оптико-электронная

система позволяет производить воздушную разведку местности в плохих погодных условиях (ночь, туман, задымленность);

- Объективы камеры согласованы между собой по характеристикам, это упрощает поиск тепловых сигнатур на изображениях;

- Применение привода ориентации позволяет производить слежение за объектом съемки.

Список литературы:

1. Мордвин Н. Н., Попов Г.Н. «Концепция построения оптико-электронных приборов наблюдения универсального назначения». Изв. Вузов. Приборостроение, 2009, Т. 52, №6.

2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. «Инфракрасные системы „смотрящего“ типа». М.: Логос, 2004. 444 с.

3. «Робототехнические средства, комплексы и системы военного назначения», Москва, 2014, 37 с.

4. Дуда Р., Харп П. Распознавание образов и анализ сцен. Перевод с английского Г. Г. Вайештейна и А. М. Васильковского, под редакцией В. Л. Стефанюка, Издательство «МИР», Москва 1976. - 509 с.

5. Гонсалес Р., Вудс Р - Цифровая Обработка Изображений, Издательство «Техносфера», 2005.

6. Местецкий Л.М. - Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры, Москва, Физматлит, 2009. 288 стр.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЦЕЛОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОГНЕМ БРОНЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ НА ИХ ОСНОВЕ

СЕРОЧЕНКОВ А.А. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Сероченков А.А.

Доклад посвящен исследованию систем управления огнем бронетанковой техники для повышения тактико-технических характеристик боевых машин нового поколения, за счет применения автоматизированных оптико-электронных приборов наблюдения и прицеливания, а так же систем управления огнём на их основе.

Ключевые слова: системы управления огнем БТТ, панорамные прицелы, лазерные дальнометры, встроенная система выверки, программируемые блоки, стабилизация изображения, единая информационная сеть.

В настоящее время к современным системам управления огнем (СУО) (рисунок 1) бронетанковой техники предъявляются высокие требования. Это связано с развитием противотанковых средств, ростом огневой мощи средств поражения, значительным совершенствованием средств и методов обнаружения. Все это создает необходимость развития СУО, использования новых технических и методологических решений.

В современной СУО неотъемлемым элементом является прицел командира. Современные тенденции и опыт использования танковых сил определяют необходимость использования именно панорамных прицелов в качестве прицелов командира, поскольку только системы с широкими полями зрения обеспечивают требуемые углы обзоров и, соответственно, скорость обнаружения целей, что непосредственно влияет на живучесть танка. Возможные способы решения такой задачи по обеспечению широких полей зрения – использование многоокулярных систем, что представляет собой большие финансовые затраты, или же использование панорамных прицелов, обеспечивающих неограниченное перемещение линии визирования по горизонту.

Отличительными особенностями панорамного прицела являются: высокая обзорность ($\pm 360^\circ$ по горизонту), многоканальность – комплексирование различных оптико-электронных устройств (телевизор, тепловизор) и некоторые другие. При этом панорамы сохраняют все преимущества прицелов предыдущего поколения, такие как: наличие нескольких полей зрения (или панкратической оптической системы), двухплоскостная стабилизация линии визирования.

В 90-х годах на западе стали использовать первые панорамные прицелы командира на танковой технике: сначала M1A1 Abrams (с 1992г.), затем практически все европейские основные боевые танки (ОБТ) были оснащены ими (Challenger 2 с 1993 г., Leclerc с 2003г., PT-91 с 2007 г.). Применение таких прицелов на практике значительно повысило способности танков в области обнаружения целей, особенно при использовании прицелов с тепловизионными каналами и встроенными дальнометрами, и практика установки панорамных прицелов превратилась в необходимость – на текущий момент практически все ОБТ оснащаются панорамными прицелами командира.

В России также давно рассматривались ва-

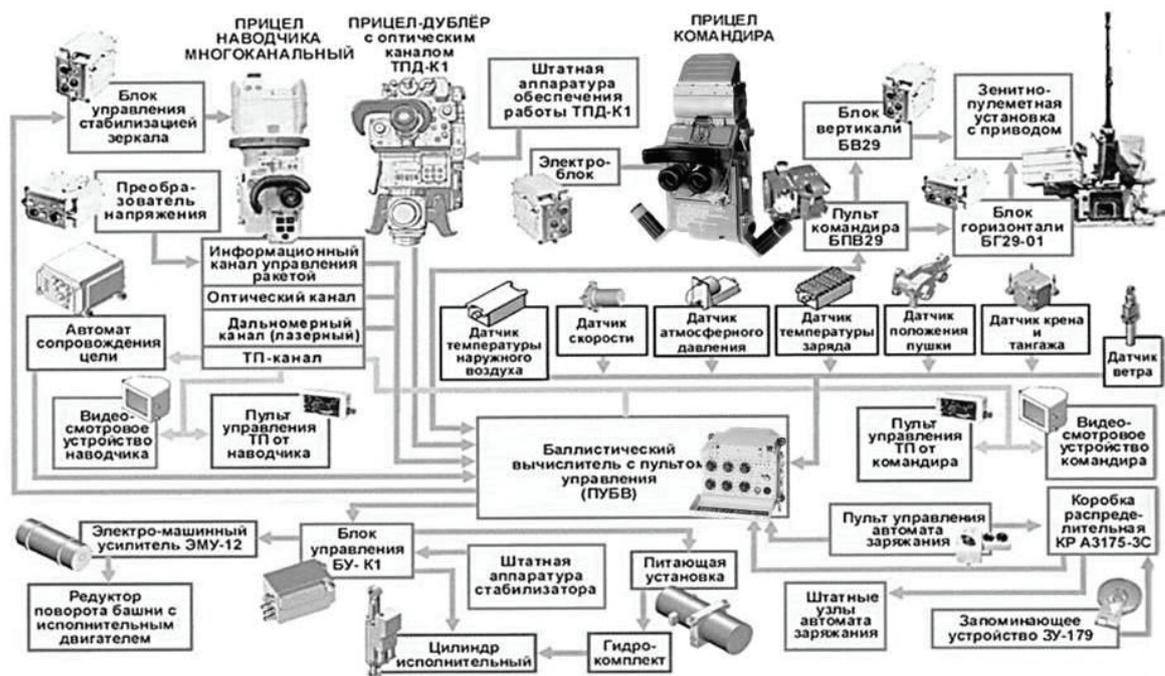


Рисунок 1.

рианты установки панорамного прицела командира в процессе модернизации танкового парка. Идея эта была реализована в 2011г. На танке Т-90СМ (АМ) – был установлен панорамный прицел командира ПК ПАН «Соколиный глаз». Схожие работы ведутся на Украине – разработаны модификации Т-84У и использованием панорамного прицела (БМ «Оплот» 2009г.) и экспортная версия Т-72МП с использованием панорам французских фирм Sagem и SFIM.

Исторически сложилось, что в России на вооружении стоит несколько видов танков: Т-90 в качестве ОБТ, а также большое количество Т-80 и Т-72. Количество наиболее современных танков – Т-90 и его модификаций – около 500 единиц. При этом имеется огромное количество устаревших танков Т-72 и Т-80. Ввиду сложившейся ситуации огромное значение приобретает программа модернизации имеющихся танков.

Танк Т-90 признан дорогим, программы по его модернизации в большей степени ориентированы на экспорт, закупка таких танков в Вооруженные силы Российской Федерации (ВС РФ) остановлена в 2011г. В качестве ОБТ будет рассматриваться танк на основе разрабатываемой в текущий момент гусе-

ничной унитарной платформе «Армата». Помимо этого существует возможность модернизации огромного парка Т-72 и Т-80 до современного уровня – такая программа более дешевая, чем модернизация Т-90, активно ведутся работы в этом направлении.

Таким образом, перспективные танковые войска будут выглядеть так: в качестве ОБТ – «Армата». Это будут самые технологичные и дорогие машины, составляющие костяк. И второстепенные по значимости, но основные по количеству – модернизированные до современного уровня Т-72 и уже имеющееся количество Т-90.

Как для разработки нового танка, так и в рамках программ модернизации имеющихся, одним из основных направлений будет работа над СУО. Касательно разработок панорамных прицелов командира в рамках сложившейся ситуации можно сформулировать две цели:

- новый прицел высочайшего класса для ОБТ;
- более дешевый прицел, но удовлетворяющий всем современным требованиям для модернизации Т-72 (возможно также Т-80, Т-90).

Работы по созданию новых прицелов ве-

дуются на всех оптико-механических заводах страны. Например, на КМЗ ведутся разработки сразу нескольких прототипов.

Один из разрабатываемых на конструкторском механическом заводе (КМЗ) прицелов – прицел командира панорамный – представляет собой комплексный прибор, сочетающий в себе телевизионный (ТВ) и тепловизионный (ТП) каналы, лазерный дальномер, встроенную систему выверки, имеет систему стабилизации линии визирования в двух плоскостях.

Касательно ТВ и ТП каналов, имеется три поля зрения с возможностью электронного увеличения изображения. Еще одной особенностью прицела является его конструкция, в которой отсутствует оптический вывод изображения – полученная камерами информация выводится на дисплей благодаря использованию матриц.

Встроенный дальномер позволяет изменять дальность до объектов, причем используются различные способы измерения – до одной цели или несколько целей серией автоматических измерений.

Встроенная система выверки обеспечивает соосность различных каналов, возможность их регулировки. Прицел работает в различных режимах – как независимое обзорное устройство или как непосредственный прицел ведения огня при управлении орудием.

Отдельно стоит упомянуть про наличие программируемого блока управления прицелом, который открывает огромные перспективы по автоматизации управления прицелом.

Параллельно с разработкой данного прицела также ведутся работы над панорамным прибором наблюдения командира (рисунок 2). Отличительной чертой данного прицела является максимальная минимизация габаритных размеров, что отражается на компоновке и общем устройстве. Разрабатываемый прицел предназначен для использования в составе объекта т-72 для панорамного обзора местности, обнаружения и распознавания целей, обеспечения целеуказания от командира наводчику в дневных и ночных



Рисунок 2.

условиях с места и с ходу. Стабилизированное наблюдение за полем боя днем, ночью, на месте и в движении является независимым и работает в двух плоскостях, обеспечивается наведение линии визирования по сигналам поступающих из СУО. Обнаружение целей обеспечивается благодаря ТП и ТВ каналу. ТП канал имеет три поля зрения с электрическим увеличением. Лазерный дальномер обеспечивает высокую точность измерения расстояния до цели. Возможность работы прицела в нескольких режимах позволяют командиру вести наблюдение, а в случае необходимости имеется возможность взять управление вооружением на себя и уничтожить противника с таким же успехом, как и наводчик-оператор.

Поскольку СУО развивается, есть идея сократить кол-во экипажа, для этого требуется максимальная автоматизация – программируемый блок управления, как сказано выше, открывает возможности к этому – система автоматического обнаружения и распознавания целей. Также огромные возможности по использованию внешнего целеуказания. Для этого требуется объединить различные используемые системы в единую информационную сеть, что позволит выводить на дисплеи прицела информацию об обнаруженных, например, беспилотными летательными аппаратами целях, а также сообщать другим участникам операции об обнаруженных нами целях.

Основываясь на изложенных выше принципах современная СУО должна включать в себя:

- танковая информационно-управляющая система частично децентрализованной структуры с современным программным обеспечением;

- основной прицел наводчика - многоканальный с двухступенной независимой стабилизацией поля зрения с оптическим и телевизионным каналами, информационным каналом управления ракетой, лазерным дальномером, построенный на новых физических принципах, таких как индикаторный принцип стабилизации, вибрационные, твердотельные или лазерные гироскопы, цифровые датчики углового положения пушки, встроенная система автоматического измерения изгиба ствола;

- дополнительный прицел наводчика - тепловизионный с автономной двухступенной независимой стабилизацией поля зрения;

- многоканальный панорамический прицел командира с двухступенной независимой стабилизацией поля зрения с оптическим, телевизионным и тепловизионным каналами, лазерным дальномером; в целях уменьшения габаритов тепловизионный канал может быть вынесен в отдельную головку;

- прицел закрытой зенитной пулеметной установки для стрельбы по воздушным целям;

- датчики автоматического учета топогеообалластических условий стрельбы;

- автомат сопровождения цели;

- цветные видео смотровые устройства наводчика и командира, позволяющие воспроизводить как изображение полей зрения прицела, так и данных, получаемых по каналам АСУ танкового батальона;

- двухплоскостной стабилизатор вооружения с электрическими приводами горизонтального и вертикального наведения, с повышенной скоростью отработки в горизонтальной и вертикальной плоскостях наведения;

- аппаратура комплекса управляемого вооружения;

- система дистанционного подрыва осколочно-фугасных и шрапнельных снарядов.

Приведенные принцип построения и состав комплекса управления огнем унифицированного боевого отделения в сочетании с усовершенствованием других систем и узлов танка позволит достичь победы в дуэльном бою с лучшими зарубежными танками [1].

Список литературы:

1. Сборник «Актуальные проблемы защиты и безопасности. Бронетанковая техника и вооружение. Труды девятой Всероссийской научно-практической конференции» Том 3. НПО «Специальных материалов» СПб. 2006 г., С.218-221

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДАТЧИКА МЕТОК ДЛЯ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ГИРОСКОПОВ СТАНКА АТМ-001Х

ХУГАЕВ Б.А. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Хугаев Б.А.

Рассмотрены возможные варианты по повышению качества балансировки роторных вибрационных гироскопов созданием оптической бледны для считывания контрастной оптической метки на балансируемом роторе.

Ключевые слова: бленда, ротор, роторный вибрационный гироскоп (РВГ), инфракрасный светодиод, фототранзистор, гиромоторы, дисбаланс, балансировка.

ВВЕДЕНИЕ

Термин «балансировка» понимают для описания процесса определения значений и углов дисбалансов вращающихся тел и уменьшения их корректировкой масс. Дисбаланс, в свою очередь, это векторная величина, равная произведению неуравновешенной массы на её эксцентриситет. Дисбаланс полностью определяется значением и углом. Все тела, которые при вращении удерживаются в опорах своими несущими плоскостями, в балансировочной технике принято называть роторами (Левит, и др., 1986). Несущими поверхностями обыкновенно служат поверхности цапф, или заменяющие их поверхности. В зависимости от конструкции и назначения роторы могут опираться на две, три и более опор. Для определения величины дисбалансов роторов используют широкий спектр технологического оборудования – балансировочные станки и стенды. Одной из областей применения такого оборудования является балансировка гироскопических приборов. Качество балансировки гироскопов, и износостойкость их опор являются определяющими в вопросах срока службы, и надёжности работы высокооборотистых машин (Тимофеев, март 2013). Систематическое повышение скорости вращения гироскопических приборов существенно поднимает требования к точности их уравнивания. Несмотря на

бурное развитие спутниковых систем навигации, гироскопы остаются незаменимыми в случае необходимости обеспечения автономности навигационной системы. В частности гироскопические устройства и приборы призваны обеспечивать надёжную работу в авиационной и космической технике в самых жёстких условиях. К ним предъявляются высокие требования в отношении обеспечения заданной точности, стабильности показаний, долговечности, температурной и радиационной устойчивости, влагостойкости.

Одним из недостатков механических гироскопов является относительно большая масса и объём прибора. По этой причине конструкторы стремятся максимально возможно миниатюризировать готовые изделия, применяя наиболее перспективные материалы. В свою очередь малые размеры гироскопов создают определённые трудности при их балансировке. При малой массе гироскопа, к балансировочному станку предъявляются особые требования по чувствительности и точности измерительных систем. К тому же малые размеры прибора требуют более точных методов коррекции неуравновешенностей. К таким методам можно отнести лазерную, электроннолучевую, электроэрозионную обработку, методы напыления металлических плёнок, точную микросварку.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили гиромоторы с закрытым

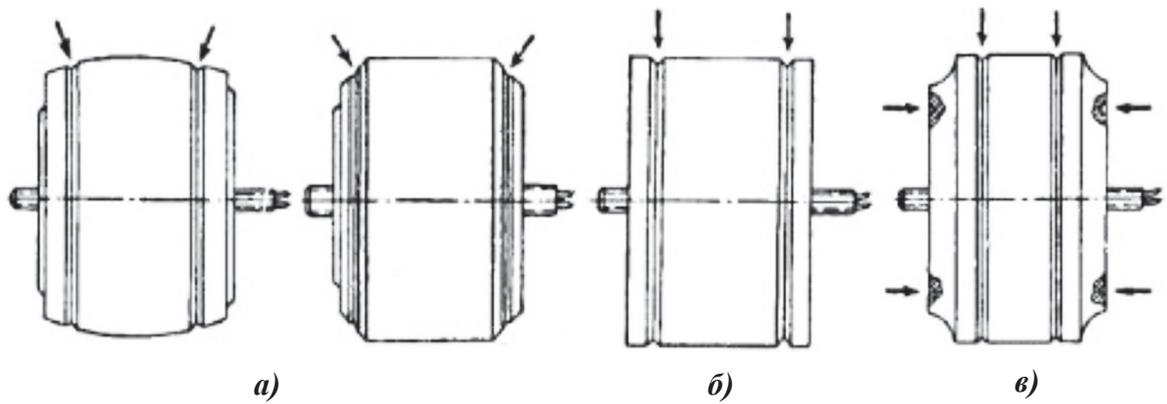


Рисунок 1.

Двуплоскостные гироскотры с закрытым ротором

ротором (рис. 1) (Запрыгаева, и др., 2000). Такие приборы имеют хорошую защиту от внешних воздействий (влаги, пыли), имеют небольшие размеры и используются в составе гироскопов.

В чертежах на гироскотры в обязательном порядке указывают допустимую величину дисбаланса в г*мм или мк смещения центра массы, допустимую глубину и диаметр отверстий при удалении массы в тяжёлом месте, положение оси вращения, расположение круговых канавок, определяющих плоскости балансировки (рис. 2) (Запрыгаева, и др., 2000). Так же прописывают способ нанесения и расположения балансировочных меток на поверхности ротора, критическую скорость вращения и допустимую минимальную скорость вращения при наличии газодинамических опор.

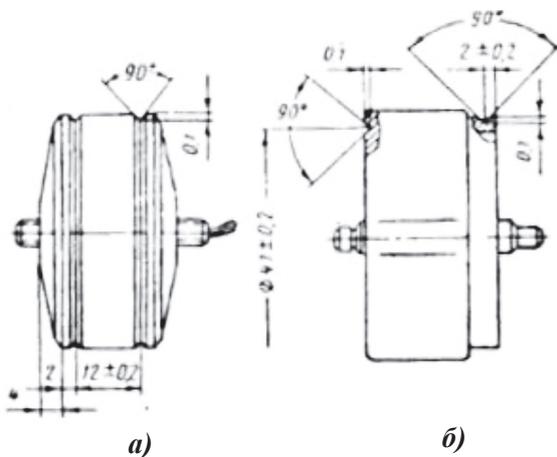


Рисунок 2.

Обозначение плоскостей коррекции на чертежах гироскотров

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модернизация датчика меток для балансировочного станка АТМ-001Х от внешних засветок искусственного или естественного света.

Было до предложения: оптический датчик меток без модернизации.

Предлагаем: модернизировать оптический датчик меток для балансировки гироскопов от внешних засветок и оптических бликов.

Для более корректной работы датчика меток, который служит для считывания контрастной оптической метки на балансируемом роторе при определении фазы дисбаланса, была создана защитная оснастка цилиндрического типа (бленда) от внешних засветок естественного и (или) искусственного света.

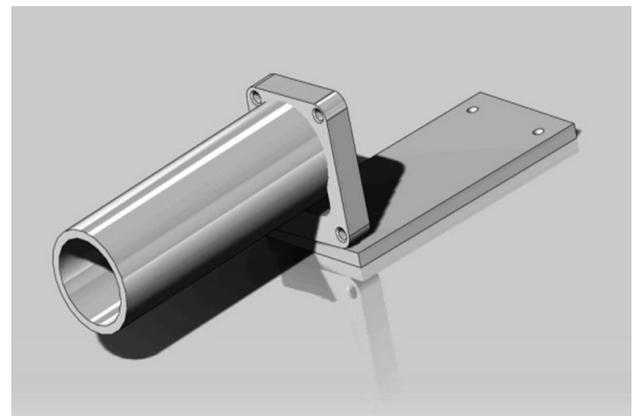


Рисунок 3.

Модель защитной бленды выполненная в конструкторской программе SolidWorks

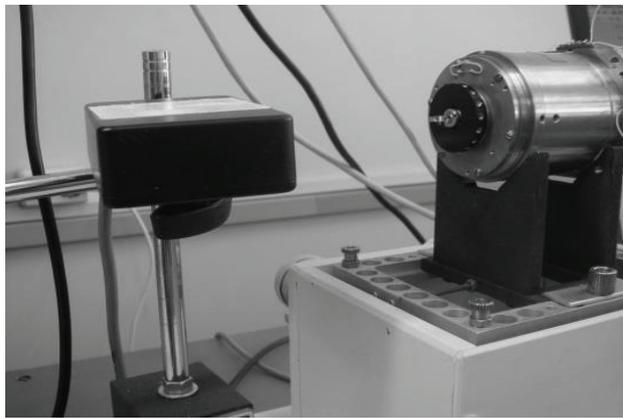


Рисунок 4.
Спектральный анализ датчика меток
без защитной бленды

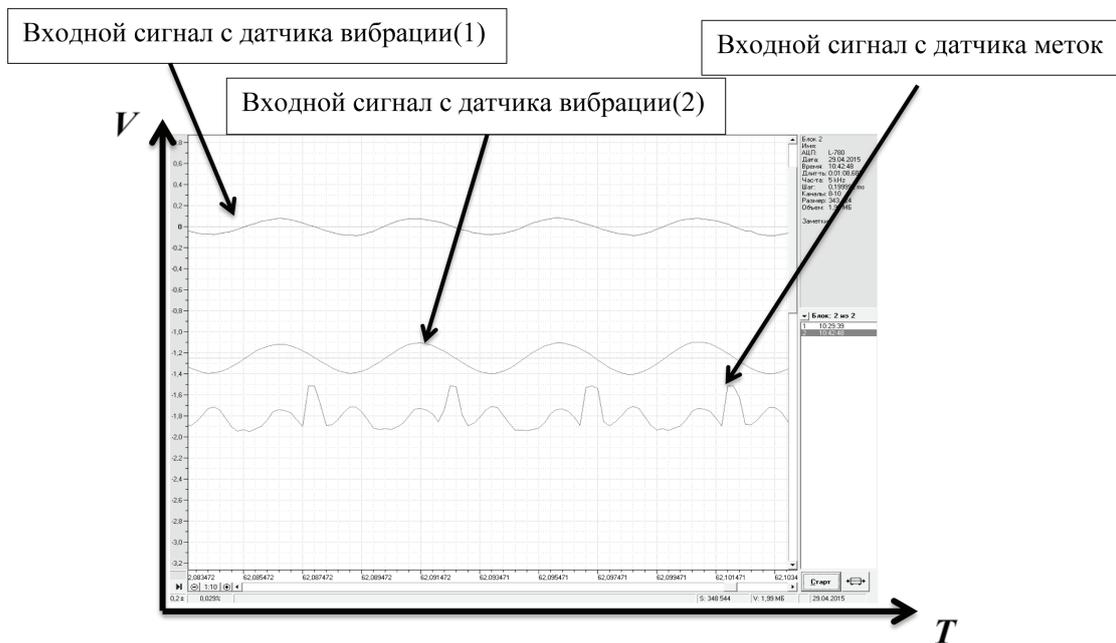


Рисунок 5.

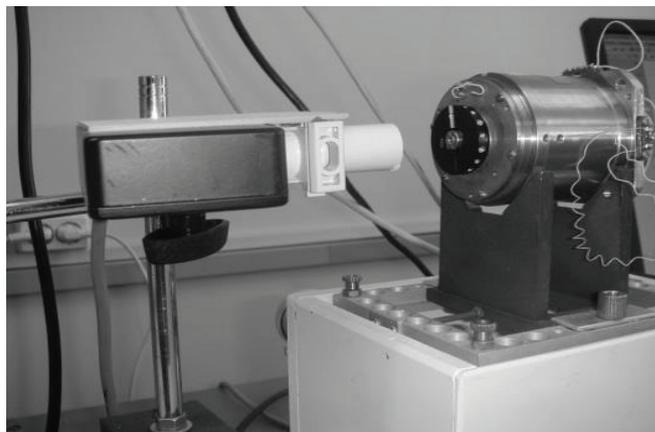


Рисунок 6.
Спектральный анализ датчика меток
с защитной блендой

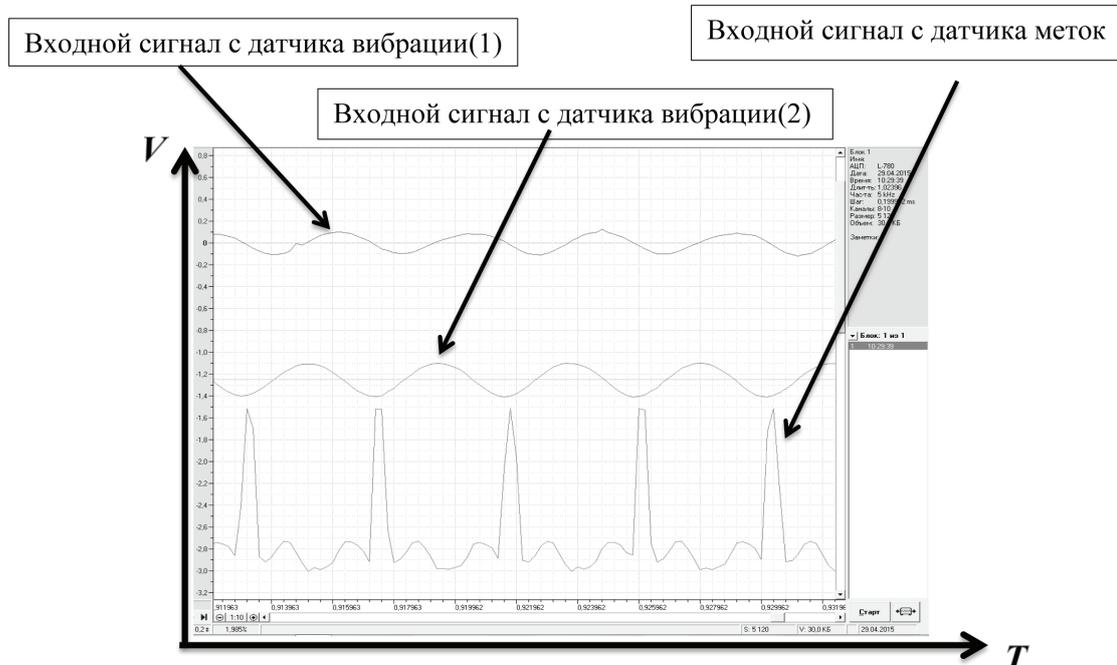


Рисунок 7.

Далее был проведен спектральный анализ сигнала, получаемый с датчика меток, и сделаны соответствующие выводы.

Состав датчика: источник света (инфракрасный светодиод, светодиод с видимым излучением, маломощный лазерный модуль или лампа накаливания) и фотоприемника (фотодиод или фототранзистор) с оптическими системами на кронштейне.

Графики демонстрируют изменение в спектральном диапазоне сигнала с датчика меток и выделение полезного сигнала.

Список литературы

1. Щепетильников В.А. Балансировка машин и приборов. М.: Машиностроение, 1979. 296 с.
2. Левит М.Е., Максименко А.И. Повышение эффективности уравнивания роторов.: Колебания и балансировка роторных систем. А.А. Гусаров, М.: Наука, 1974. 108 с.
3. Основы балансировочной техники Т.1 Уравнивание жестких роторов и механизмов. В. А. Щепетильников. М.: Машиностроение, 1975. 528 с.
4. Теория и практика балансировочной техники. В. А. Щепетильников. М.: Машиностроение, 1973 . 456с.
5. Теория и практика уравнивания машин и приборов. В. А. Щепетильников. М.: Машиностроение 1970. 440 с.

СОЗДАНИЕ КОНТРОЛЬНО-ЮСТИРОВОЧНОЙ СЛУЖЕБНОЙ СИСТЕМЫ СПУТНИКА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

ЧУРЛЯЕВ Ф.А. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Чурляев Ф.А.

Рассмотрены перспективные методы контроля рассогласования взаимного положения элементов оптической системы спутника дистанционного зондирования Земли в процессе его эксплуатации на орбите.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, контроль положения зеркал, анализ аберраций.

К качеству снимков современных оптико-электронных комплексов дистанционного зондирования Земли (ОЭК ДЗЗ) предъявляются высокие требования.

При выводе на орбиту и последующей эксплуатации ОЭК ДЗЗ подвержены воздействию таких факторов как:

- силовые и вибродинамические воздействия;
- перераспределение напряжений и деформаций конструкции в невесомости;
- температурные перепады на элементах конструкции.

всё это приводит к рассогласованию взаимного положения зеркал оптической системы ОЭК и, как следствие, к ухудшению качества получаемых снимков.

Решением данной проблемы является создание измерительной системы, которая позволит в процессе эксплуатации спутника ДЗЗ контролировать рассогласование взаимного положения элементов оптической системы и осуществлять дистанционную корректировку.

КОНТРОЛЬ РАССОГЛАСОВАНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ПО ЗВЕЗДЕ»

Одним из предлагаемых перспективных методов является контроль рассогласования взаимного положения элементов оптической системы «по звезде» Данный метод заключается в измерении аберраций оптической системы спутника ДЗЗ по точечному источнику (звезде) и расчете на основании измеренных аберраций необходимых корректирующих подвижек элементов оптической системы. Операции измерения, расчета и корректировки осуществляются итерационно до получения требуемого качества изображения.

Измерение аберраций оптической системы возможно осуществлять на основе анализа распределения интенсивности излучения в расфокусированном изображении звезды. Для этого производится регистрация изображения звезды с преднамеренно внесенной дефокусировкой. Измерение величины волновых аберраций производится путем подгонки модели абберационно искаженно-

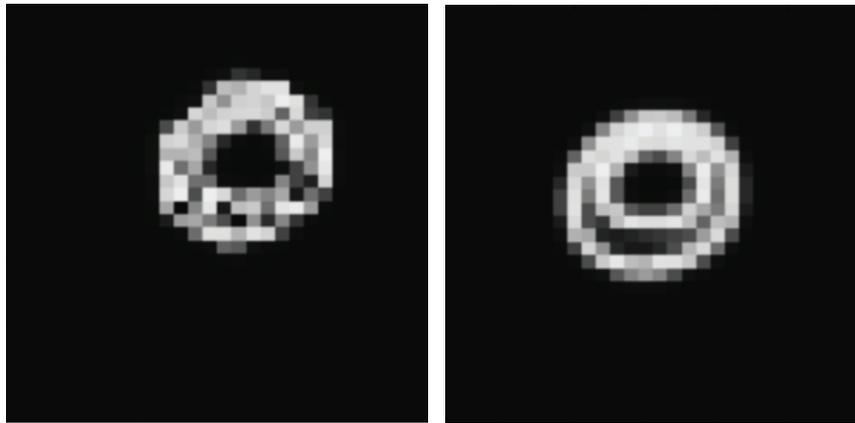


Рисунок 1.
Распределение интенсивности в расфокусированном изображении звезды (слева) и его аппроксимация математической моделью (справа)

го изображения под реально полученное расфокусированное изображение звезды путем итерационной генерации модели абберационно искаженного изображения и сравнения его с реально полученным изображением. Подбор продолжается до тех пор, пока среднеквадратическое отклонение смоделированного изображения от реально полученного изображения не станет меньше заданного порога. На рис. 1 представлен пример распределения интенсивности в расфокусированном изображении звезды и его математическая модель [1].

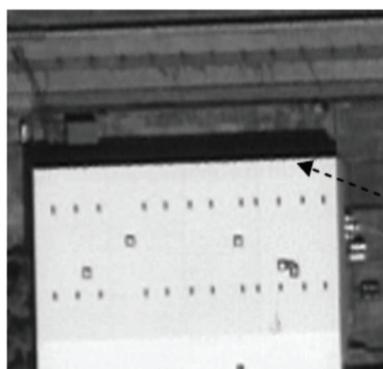
Модель абберационно искаженного изображения представляется в виде суммы полиномов Цернике. Вид и величина полиномов описывают форму волнового фронта. Вклад каждой абберации в общее искажение

изображения оценивается по порядкам полиномов Цернике. На основании данных об абберациях оптической системы определяются необходимые корректирующие подвижки элементов оптической системы.

Недостатком описанного способа является необходимость изменения пространственного положения спутника ДЗЗ на орбите для регистрации изображения звезды.

КОНТРОЛЬ РАССОГЛАСОВАНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО СНИМКАМ ОБЪЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Другим способом реализации измерительной системы является контроль рассогласования взаимного положения элементов оптической системы по снимкам объектов на по-



Граница для анализа

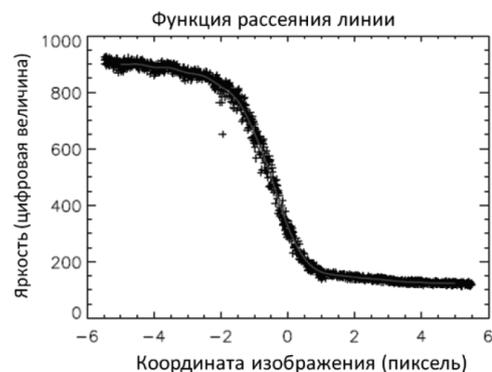


Рисунок 2.
Снимок для анализа (слева) и полученная на основе его анализа функция рассеяния линии (справа)



Рисунок 3.

Мира на территории космического центра имени Джона Стенниса в США

верхности Земли. Основное отличие данного способа от предыдущего заключается в методе измерения aberrаций оптической системы. Измерения aberrаций осуществляется путем оценки функции рассеяния линии, получаемой путем измерения степени размытия контрастных границ изображений объектов, для которых размер границы яркостного перепада многократно меньше разрешения оптико-электронной системы спутника ДЗЗ. На рис. 2 в качестве объекта для извлечения информации о функции рассеяния линии выбрана резкая яркостная граница крыши здания [3].

В качестве объектов на поверхности Земли для анализа могут выступать искусственно

созданные объекты геометрические размеры которых точно известны, (см. рис. 3), или случайные объекты с резкой границей яркостного перепада, например граница крыши здания на рис. 2 слева.

Первый подход требует пролета спутника над территорией размещения тестовых объектов и не обеспечивает оценку разрешения по всему полю зрения. Второй подход в значительной степени свободен от этих ограничений, однако имеет более низкую точность оценки пространственного разрешения.

Список литературы:

1. Woods, Deborah Freedman. «Space Surveillance Telescope: focus and alignment of a three mirror telescope». *Optical Engineering* 52, no. 5 (May 1, 2013).

2. A. Tokovinin and S. Heathcote, «Donut: measuring optical aberrations from a single extra-focal image» publication in *PASP* (June 14, 2006).

3. K. Kohm, «Modulation transfer function measurement method and results for the orbview-3 high resolution imaging satellite» Lackland Hill Parkway, St. Louis, MO 63146, USA.

4. Алгоритмы и технологии высокоточной оценки разрешающей способности космических систем наблюдения Земли в процессе их эксплуатации : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.01 / Князьков Павел Александрович; [Место защиты: Рязан. гос. радиотехн. ун-т].- Рязань, 2010.- 138 с.: ил.

5. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений, Москва: Тезнофера, 2010. – 560 с.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫМ МОМЕНТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЗОНДИРОВЩИКА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

ХУББИЕВ Р.В. - оператор 3-ей научной роты войск Воздушно-Космической Обороны



Хуббиев Р.В.

Рассмотрена возможность использования для подвеса оси маятника торсионов для обеспечения требуемого ресурса работы маятника. Произведен выбор двигателя и разработана математическая модель системы автоматического управления узлом интерферометра и проведено моделирование. Оценены возмущающие моменты и разработан метод их компенсации.

Ключевые слова: бесконтактный моментный электродвигатель, торсионный элемент, система автоматического управления, оптимизация, стабилизация, возмущающий момент.

Схема механизма изменения оптической разности хода между плечами интерферометра с использованием для подвеса оси маятника торсионов является перспективной и может обеспечить требуемый ресурс работы при небольших угловых перемещениях. Основными преимуществами торсионов являются отсутствие трения и «мертвого» хода, отсутствие смазки, нечувствительность к загрязнению, возможность функционирования в широком диапазоне температур, в условиях вакуума и радиации.

Разработка модели системы управления движением маятника интерферометра позволяет провести отработку циклограммы работы. При этом учитываются параметры механической системы (момент инерции маятника, крутильная жесткость торсионных опор), параметры циклограммы работы (время съема интерферограммы и время реверсирования), параметры двигателя и системы управления. Разработка модели позволяет отработать влияние внешних возмущающих воздействий на устойчивость системы регулирования, в первую очередь с точки зрения требований к стабилизации скорости изменения ОРХ во время съема интерферограммы.

Это особенно актуально с учетом трудности реализации внешних воздействий сложной формы экспериментальным путем. В дальнейшем с использованием модели планируется оптимизировать коэффициенты регуляторов, обрабатывать управление двигателем с помощью ШИМ-драйвера, анализировать влияние погрешностей измерительных датчиков на работу системы, выполнять необходимые расчеты энергопотребления, создаваемых прибором воздействий на КА.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРСИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ ОПОР МАЯТНИКА

Основными преимуществами торсионов являются отсутствие трения и «мертвого» хода, отсутствие смазки, нечувствительность к загрязнению, возможность функционирования в широком диапазоне температур, в условиях вакуума и радиации. К числу ограничений по применению торсион относятся ограниченный диапазон углов поворота, наличие силы упругости, пропорциональной углу отклонения от номинального положения, смещение геометрического и мгновенного центров вращения при повороте.

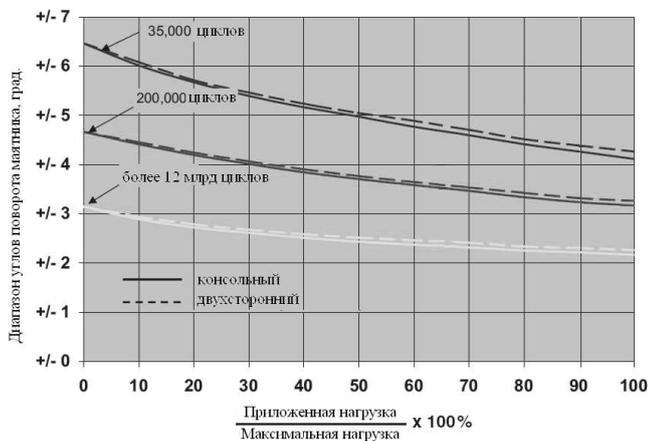


Рисунок 1.
Ресурс работы торсион

Рабочий диапазон углов поворота маятника интерферометра составляет $\pm 1.3^\circ$. В таком диапазоне углов отклонения торсионы имеют практически неограниченный ресурс работы (более 12 млрд циклов, рис. 1).

Из рис. 1 видно, что ресурс работы торсионов очень сильно зависит от рабочего диапазона углов поворота маятника. Увеличение угла поворота маятника относительно нейтрального положения приводит к резкому снижению ресурса. В связи с этим при установке торсионов важно обеспечить, чтобы качание маятника производилось относительно нейтрального (ненагруженного) положения торсионов, т.е. положение маятника интерферометра, соответствующее НРХ, должно быть согласовано с нейтральным положением торсионов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ ДПТ

Закон движения маятника интерферометра в торсионном подвесе описывается неоднородным дифференциальным уравнением (ДУ) второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} + k\theta = M(t) \quad (1)$$

где I – момент инерции маятника, C – вращательный коэффициент трения (сопротивления), k – вращательный коэффициент жесткости (крутильная жесткость), M – внешнее воздействие (управляющий момент). Здесь и далее: θ – угловая координата,

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{– угловая скорость,}$$

$$\varepsilon = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad \text{– угловое ускорение.}$$

Выражение (1.1) удобно переписать в виде:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\theta}{dt} + \omega_n^2\theta = M(t) \quad (2)$$

Здесь $\zeta = \frac{C}{2\sqrt{I \cdot k}}$ – коэффициент затухания, $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{I}}$ – резонансная частота в отсутствии затухания. С учетом введенных обозначений общее решение соответствующего однородного ДУ для случая имеет вид:

$$\theta(t) = Ae^{-2\omega_n t \zeta} \cos(\omega_1 t + \phi) \quad (3)$$

где $\omega_1 = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$.

При управлении движением маятника интерферометра в соответствии с циклограммой работы фурье – спектрометра можно выделить две задачи:

1. стабилизация скорости изменения оптической разности хода V_{onm} между ветвями интерферометра во время регистрации двухсторонней интерферограммы;
2. быстрая смена направления движения маятника с разгоном до номинальной скорости изменения ОРХ, то есть участок «торможение-разгон».

В качестве привода перемещения зеркал триэдров разработан бесконтактный моментный двигатель постоянного тока (ДПТ), приведенный на рис. 2.

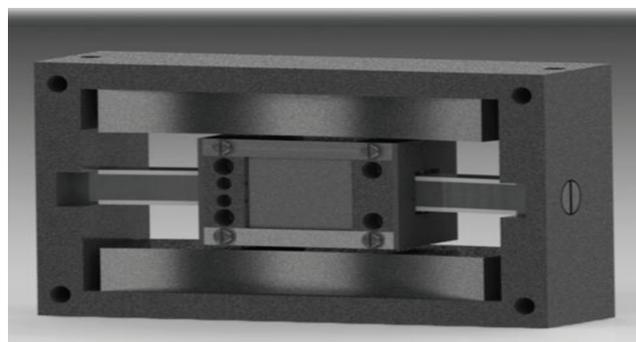


Рисунок 2.
**Модель бесконтактного
моментного двигателя**

Таблица 1. Электрические и механические параметры

максимальный крутящий момент, Н·м	1.85
постоянный крутящий момент, Н·м	0.798
диапазон углов поворота, °	± 3.75
постоянная привода, Н·м/√Вт	0.209
сопротивление, Ом	12.5
напряжение В	31.3
ток, А	2.5
ток размагничивания, А	5.0
чувствительность, Н·м/А	0.735
обратная ЭДС, В/рад/с	0.74
индуктивность @ 1000 Гц, мГн	11.5
электрическая постоянная времени, мкс	920
мощность, Вт	77.8

Электрические и механические параметры разработанного ДПТ приведены в табл. 1.

Момент инерции маятника равен

$$I_M = 0.06 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Радиус вращения уголкового отражателя равен $R = 220 \text{ мм}$;

УЧАСТОК СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ

На участке стабилизации скорости маятника (то есть во время съема интерферограммы)

$\varepsilon = 0$, $\omega_{ном} = \frac{V_{мех}}{R} = \frac{V_{онм}}{4R}$, при этом максимальный угол поворота определяется требованием к максимальной оптической разности хода (МРХ) в интерферометре $L_{max}: \theta_{мпд} = \frac{L_{max}}{4R}$.

Таким образом, на этапе регулирования двигатель маятника компенсирует момент, создаваемый торсионными опорами и пропорциональный углу поворота:

$$M(\theta) = k\theta = S_I \cdot I_{num}(\theta) \quad (4)$$

Для разрабатываемого ИКФС:

$$\omega_{ном} = \frac{20}{4 \cdot 22} = 0.227 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right] = 13 \left[\frac{\circ}{\text{с}} \right]$$

$$\theta_{мпд} = \frac{2}{4 \cdot 22} \cdot \frac{180}{\pi} = 1.3^\circ$$

$$M_{мпд} = 0.2 \cdot 1.3 = 0.26 \text{ [Н} \cdot \text{м]}$$

$$I_{num}(\theta_{мпд}) = \frac{M_{мпд}}{S_I} = \frac{0.26}{0.735} = 0.35 \text{ [А]}$$

УЧАСТОК РЕВЕРСИРОВАНИЯ

По выходу из участка стабилизации скорости $\theta_0 = \theta_{мпд}$, $\omega_0 = \omega_{мпд}$ управление маятником заключается в реверсировании движения в возможно короткий промежуток времени и стабилизации скорости изменения ОРХ до начала съема интерферограммы. Уравнение движения с учетом управляющего момента $M(t)$ имеет вид:

$$I \cdot \varepsilon(t) + k \cdot \theta(t) = M(t) \quad (5)$$

Рассмотрим частный случай, когда на этапе реверсирования $M(t)=0$, а торможение разгон маятника осуществляется за счет упругой силы торсионных опор.

С учетом начальных условий решение имеет вид:

$$\theta(t) = \theta_{мпд} \cos(\omega_n t) + \frac{\omega_{ном}}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \quad (6)$$

Для определения момента времени и угла останова приравняем производную нулю

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = 0$$

Получим:

$$k = 2k_{торс} = 0.2 \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{град}} \right] = 11.46 \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \right],$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{I}} = \sqrt{\frac{11.462}{0.06}} = 13.82 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right],$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = 2.2 \text{ [Гц]},$$

$$t_1 = \frac{1}{\omega_n} \arctg\left(\frac{\omega_{ном}}{\omega_n \cdot \theta_{мпд}}\right) = \frac{1}{13.82} \arctg\left(\frac{0.227}{13.82 \cdot 0.0227}\right) = 45.3 \text{ [мс]},$$

$$\theta(t_1) = 0.0227 \cdot \cos(13.82 \cdot 0.0453) + \frac{0.227}{13.82} \sin(13.82 \cdot 0.0453) = 0.028 \text{ [rad]}$$

Таким образом для реверсирования движения при отсутствии регулирования двигателем составит: $T_{\text{рев}} = 2t_1 = 90.6 \text{ [мс]}$. При этом максимальный угол отклонения маятника будет равен: $\theta_{\text{max}} = \theta(t_1) = 1.6^\circ$

Второй частный случай $M = k_M \cdot \theta_0$, когда на этапе реверсирования момент двигателя пропорционален углу отклонения, увеличивая жесткость системы.

Время на торможение:

$$t_1 = \sqrt{\frac{I}{k+k_M}} \arctg\left(\frac{\omega_{\text{ном}}}{\theta_{\text{мпд}}} \sqrt{\frac{I}{k+k_M}}\right) = 6.3 \text{ [мс]}$$

$$k_M = \frac{M_{\text{max}}}{\phi_{\text{max}}} = \frac{1.85}{1.3} = 1.42 \left[\frac{\text{H} \cdot \text{м}}{\text{град}} \right] =$$

$$= 81.54 \left[\frac{\text{H} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \right], \quad \omega_M = \sqrt{\frac{k+k_M}{I}} = 39.37 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right],$$

а M_{max} и ϕ_{max} – технические характеристики, приведенные в табл/ 2.

Таким образом, время на торможение – разгон составит: $T_{\text{рев}} = 2t_1 = 12.6 \text{ [мс]}$, а $\theta_{\text{max}} = \theta(t_1) = 1.34^\circ$.

Угловое ускорение при реверсировании:

$$\varepsilon = \frac{2\omega_{\text{ном}}}{2\Delta t} = \frac{2 \cdot 0.227}{0.05} = 9.08 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right]$$

Потребный крутящий момент:

$$M_{\text{max}} = I \cdot \varepsilon = 0.06 \cdot 9.08 = 0.55 \text{ [H} \cdot \text{м]}$$

Разработанный двигатель с запасом обеспечивает потребный момент.

МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ ДПТ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Исходя из технического задания, реализуем следящий электропривод, который представляет собой замкнутый электропривод, управляющий перемещением и обеспечивающий стабилизацию положения объекта регулирования [5]. Функциональная схема данного привода представлена на рис., где обозначено: Uy – управляющий сигнал, ДВ – двигатель, ДП, ДС, ДТ – датчик положения, скорости и тока соответственно, ОР – объект регулирования, ПР – преобразователь напряжения, РП, РС, РТ – регулятор положения, скорости и тока соответственно.

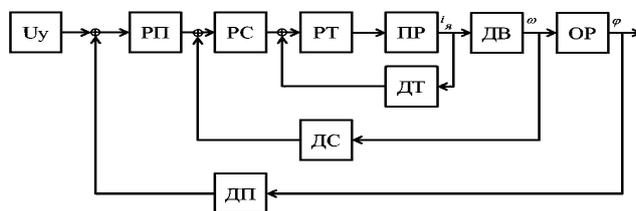


Рисунок 3.

Функциональная схема САУ ДПТ

Как видно из рисунка электропривод содержит три контура регулирования: положения, скорости и тока. Внешний контур содержит датчик положения объекта относительно базовой системы координат. Сигнал с выхода ДП сравнивается с управляющим сигналом, определяющим положения объекта. По результату сравнения, РП – вырабатывает сиг-

Таблица 2.

Технические характеристики привода перемещения уголкового отражателя

угол поворота маятника при регистрации интерферограммы	$\pm 1.3^{+0.1^\circ}$
время поворота маятника при регистрации интерферограммы, мс	200±5
время реверсирования движения, мс	50 ± 1
номинальная частота референтного канала, кГц	316
полоса пропускания референтного канала, кГц	100-350
потребный крутящий момент, Н·м	0,6
стабильность скорости движения маятника	3 %

нал регулирования скорости, который, в конечном счете, обеспечивает вращение двигателя и перемещение ОР – на заданный угол.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА ПОЛОЖЕНИЯ

Для обеспечения высокого быстродействия и малого перерегулирования настроим контур положения на модульный оптимум [6]. В качестве регулятора положения примем пропорциональное звено [7], передаточная функция которого имеет вид:

$$W_{pp}(p) = k_{pp} \quad (7)$$

Коэффициент усиления регулятора положения:

$$k_{pp} = \frac{k_c}{k_M \cdot k_p} \cdot \frac{1}{a_p \cdot a_c \cdot a_t \cdot T_p} \quad (8)$$

где a_t – коэффициент оптимизации контура тока, a_c – коэффициент оптимизации контура скорости, a_p – коэффициент оптимизации контура положения, T_p – постоянная времени преобразователя, k_c – коэффициент обратной связи контура скорости, k_p – коэффициент обратной связи контура положения.

Максимальное быстродействие любого замкнутого контура определяется его минимальной постоянной времени, которая в данном случае напрямую зависит от частотой работы ШИМ инвертора.

Коэффициент обратной связи по положению:

$$k_p = k_{on} \cdot k_{dp} \quad (9)$$

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА СКОРОСТИ

Оптимизация контура скорости производилась на симметричный оптимум (СО), так как от данного контура не требуется высокое быстродействие. Кроме того, СО обеспечивает нулевую ошибку по возмущению, что необходимо для поддержания заданного уровня скорости. Передаточная функция регулятора имеет вид:

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc} p + 1}{T_{pc} p} \quad (10)$$

где T_{pc} – постоянная времени регулятора скорости, которая равна:

$$T_{pc} = a_c \cdot a_t \cdot T_p \quad (11)$$

Коэффициент усиления регулятора скорости:

$$k_{pc} = \frac{J_{dr} \cdot k_t}{C_m \cdot k_c} \cdot \frac{1}{a_c \cdot a_t \cdot T_p} \quad (12)$$

где k_t – коэффициент обратной связи контура тока, C_m – чувствительность ДПТ, J_{dr} – момент инерции.

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$k_c = \frac{U_{zc}}{\omega_M} \quad (13)$$

где U_{zc} – максимальное значение напряжения регулятора скорости.

Ожидаемы показатели качества работы замкнутого оптимизированного контура скорости:

Установившаяся ошибка $\Delta \omega_{уст} = 0$;

Полоса пропускания по модулю и фазе:

$$\omega_n^{\phi} = \frac{0.18}{T_{pc}} = \frac{0.9}{0.4 \cdot 10^{-3}} = 2.25 \cdot 10^3 \left[\frac{рад}{с} \right],$$

$$\omega_n^m = \frac{1.42}{T_{pc}} = \frac{1.42}{0.4 \cdot 10^{-3}} = 3.55 \cdot 10^3 \left[\frac{рад}{с} \right]$$

и соответственно

Перерегулирование, время переходного процесса и время первого согласования при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$$\sigma = 16.2\%, \quad t_p = 13.6 \cdot T_{pc} = 5.44 \cdot 10^{-3} с,$$

$$t_s = 20.3 \cdot T_{pc} = 8.12 \cdot 10^{-3} с$$

Имитационная модель контура скорости с регулятором, реализованная в программной среде Matlab Simulink, представлена на рис. 4.

Для оценки показателей качества оптимизированного контура скорости были построены временные и частотные характеристики [8], приведенные ниже (рис. 5, 6).

Показатели качества оптимизированного контура скорости приведены в табл. 3.

Анализ синтезированного контура скорости показал отсутствие ошибки по управлению при ступенчатом задающем воздействии, что характерно для настройки контура на симметричный оптимум. Ожидаемые и реальные показатели качества отличаются незначительно.

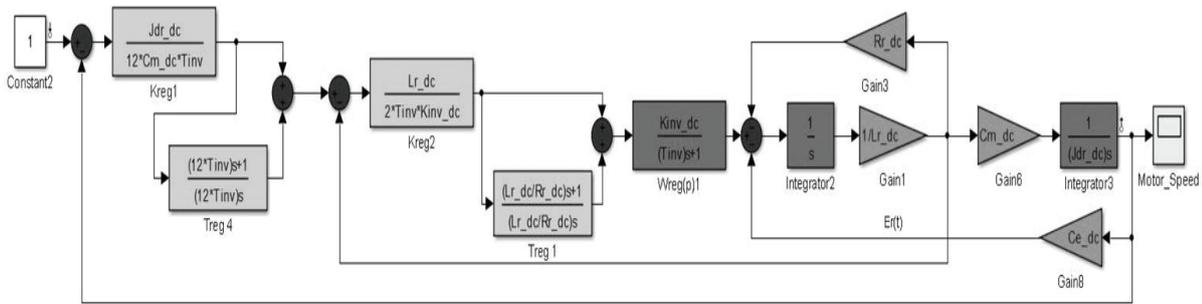


Рисунок 4.

Имитационная модель контура скорости с регулятором

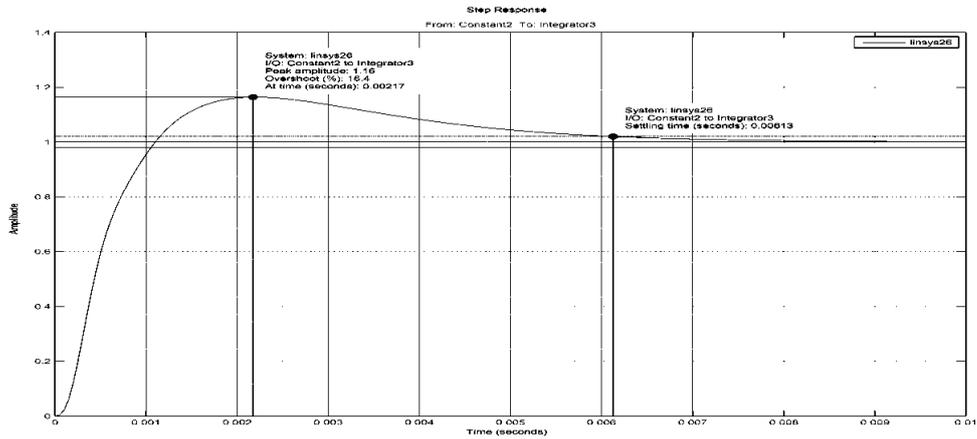


Рисунок 5.

Временная характеристика контура скорости

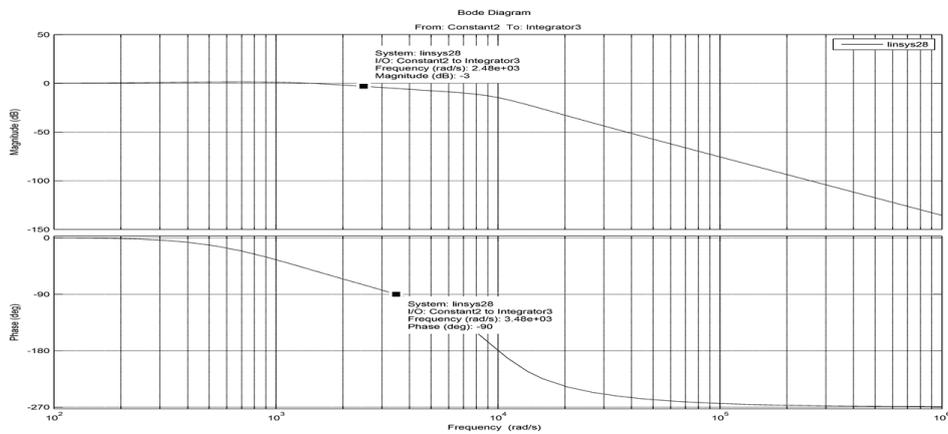


Рисунок 6.

Частотные характеристики контура скорости

Таблица 3.

Показатели качества контура скорости

Показатели качества	$\sigma, \%$	t_p, c	t_s, c	$\Delta I_{уст}$	$\omega_n^\phi, \text{рад/с}$	$\omega_n^M, \text{рад/с}$
Ожидаемые	16,2	$5.44 \cdot 10^{-3}$	$8.12 \cdot 10^{-3}$	0	$2.25 \cdot 10^3$	$3.55 \cdot 10^3$
Реальные	16,4	$6.13 \cdot 10^{-3}$	$6.13 \cdot 10^{-3}$	0	$2.948 \cdot 10^3$	$3.48 \cdot 10^3$

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА ТОКА

Контур тока настроим на модульный оптимум. В качестве регулятора тока примем пропорционально-интегральный регулятор, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_{pt}(p) = k_{pt} \cdot \frac{T_{pc} p + 1}{T_{pc} p} \quad (14)$$

где T_{pt} – постоянная времени регулятора тока, которая равна:

$$T_{pt} = T_{\text{я}}$$

Коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{pt} = \frac{R_{\text{я}} \cdot T_{\text{я}}}{k_t \cdot a_t \cdot T_p} \quad (15)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи, $T_{\text{я}}$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи.

Коэффициент обратной связи по току:

$$k_t = \frac{U_{zt}}{I_{\text{max}}} \quad (16)$$

где U_{zt} – максимальное значение напряжения регулятора тока, I_{max} – максимальный ток двигателя.

Ожидаемы показатели качества работы замкнутого оптимизированного контура тока:

- установившаяся ошибка $\Delta I_{уст} = 0$;
- полоса пропускания по модулю и фазе:

$$\omega_n^{\phi} = \omega_n^M = \frac{0.707}{T_p} = \frac{0.707}{0.1 \cdot 10^{-3}} = 7.07 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$$

Перерегулирование, время переходного процесса и время первого согласования при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$$\sigma = 4.3\%, \quad t_p = 4.1 \cdot T_{\text{я}} = 3.77 \cdot 10^{-3} \text{ с} ,$$

$$t_s = 4.1 \cdot T_{\text{я}} = 3.77 \cdot 10^{-3} \text{ с} ;$$

Имитационная модель контура тока с регулятором, реализованная в программной среде Matlab Simulink, представлена на рис. 7.

Для оценки показателей качества оптимизированного контура были построены временные и частотные характеристики, приведенные ниже (рис. 8, 9).

Показатели качества оптимизированного контура тока приведены в табл. 4.

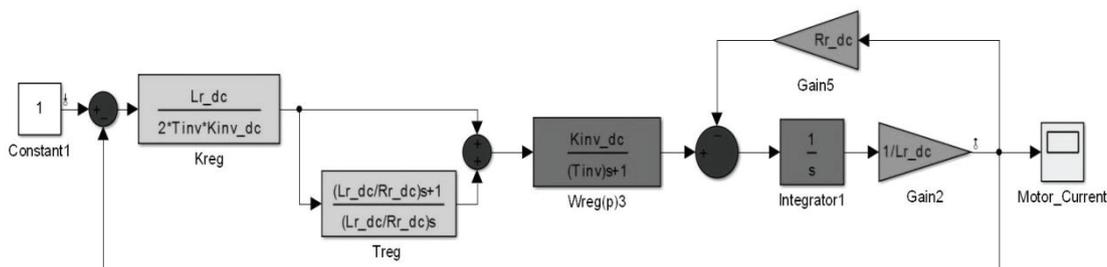


Рисунок 7.

Имитационная модель контура тока с регулятором

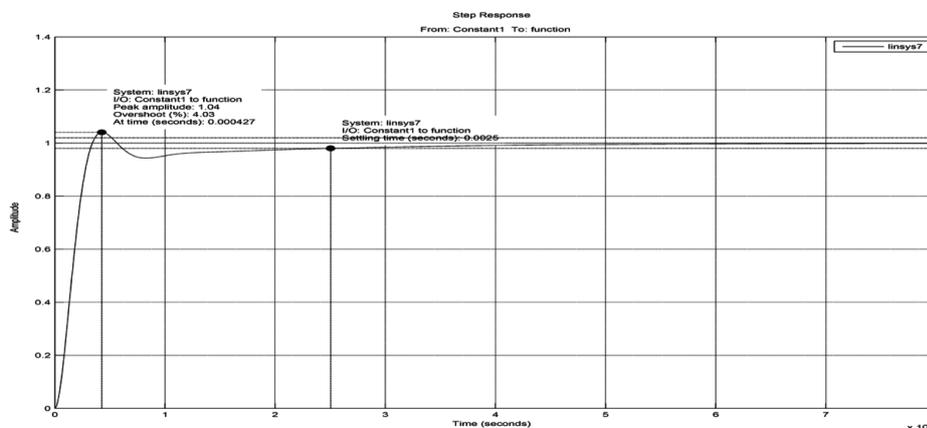


Рисунок 8.

Временная характеристика контура тока

Анализ синтезированного контура тока показал отсутствие ошибки по управлению при ступенчатом задающем воздействии, что характерно для настройки контура на модульный оптимум. Ожидаемые и реальные показатели качества отличаются, что связано с допущениями, принятыми при оптимизации.

Следящий электропривод построен по принципу подчиненного регулирования на основе двигателя постоянного тока, структурная схема которого представлена на рис. 10.

Система управления двигателем, разработанная в среде Matlab Simulink представлена на рис. 11.

В системе управления учтены граничные условия для скорости и тока. Для более точного позиционирования в контур положения был введен контур по ускорению, как производная от скорости.

Исследование системы производилось по определенному входному сигналу, заданному исходя из технического задания. Моделирование показало, что система обрабатывает с заданной точностью. На рисунке представлен график положения, на котором P_z – заданное положение, а P_r – положение, отработанное системой. Графики скорости и момента при отработке системы заданного положения представлены на рис. 12-14.

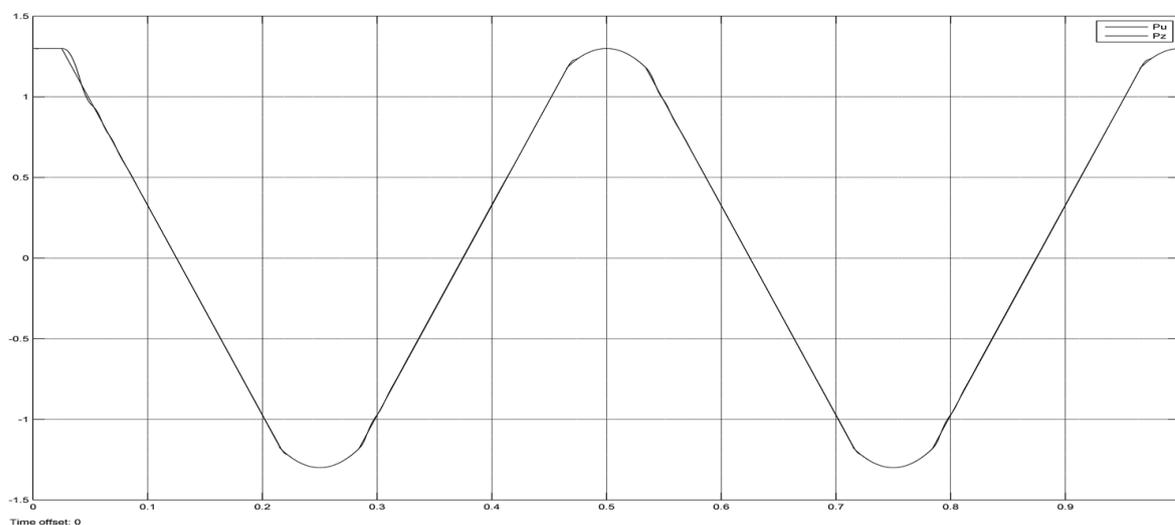


Рисунок 12.

Структурная схема силового канала

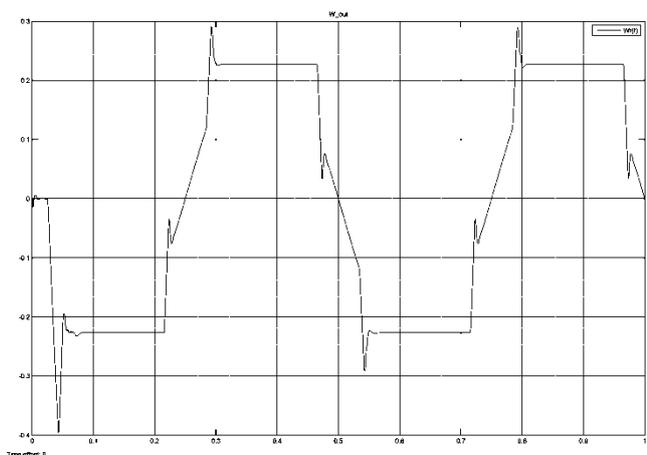


Рисунок 13.

График скорости при регистрации интерферограммы

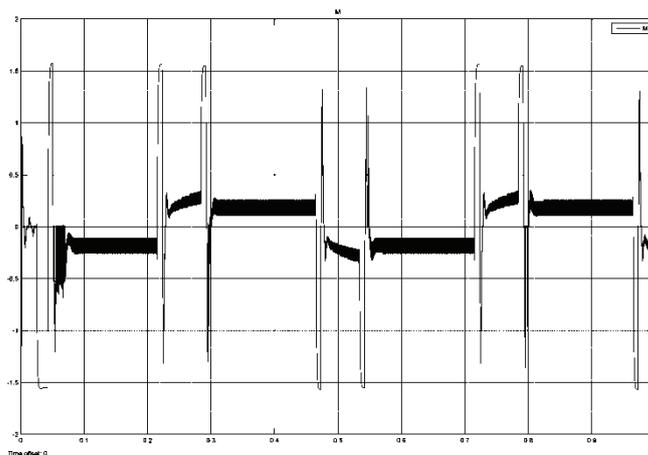


Рисунок 14.

График момента при регистрации интерферограммы

Анализ временных характеристик показал, что модель САУ БИ ИКФС является адекватной. Так, график скорости двигателя (рисунок 13) является характерным для ДПТ, скорость которого зависит от тока, подаваемого на обмотки. Установившееся значение скорости соответствует номинальной скорости двигателя. Момент не превышает максимального отклонения от расчетного значения.

График регулирования положения демонстрирует точное выполнение системой автоматического управления задания.

ВОЗМУЩАЮЩИЕ МОМЕНТЫ И МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ

При изменении вектора угловой скорости перемещения маятника его кинетическая энергия изменяется. Если при этом на несущий космический аппарат не действуют никакие другие силы и моменты, кинетическая энергия остальной части КА по закону сохранения энергии изменяется так, чтобы для всего КА кинетическая энергия осталась неизменной. Поскольку движение маятника является вращательным, космический аппарат начинает закручиваться в сторону, противоположную направлению разгона маятника. Такое воздействие называют возмущающим, и в случае вращательного движения характеризуют величиной возмущающего момента, закручивающего КА. Учитывая наличие требований к максимально допустимой угловой скорости КА, значение амплитуды импульса возмущающего момента ограничено. Как было показано выше (рисунок 14) крутящий момент при реверсировании маятника равен $(1.56...0.35) \text{ Н}\cdot\text{м}$ за время $(0,225...0,275)$. Это соответствует амплитуде импульса возмущающего момента, равной $0.021 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, что не удовлетворяет требованиям технического задания и требует компенсации.

Метод компенсации состоит в том, чтобы противопоставить импульсу возмущающего момента, действующему в прямом направлении, импульс компенсирующего момента, действующий в обратном направлении. Величина импульса должна быть такой, чтобы суммарный импульс при движении маятника и компенсатора в сумме не превышал $0.004 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$.

Для достижения высокого ресурса компенсатора необходимо использовать в нем тот же двигатель и способ крепления, что и для маятника: гибкие опоры.

Метод компенсации возмущающего момента маятника интерферометра с помощью такого инерциального элемента состоит в том, чтобы подавать на обмотки двигателя компенсатора тот же управляющий сигнал, который подается на двигатель маятника, но с обратной полярностью.

При этом, в связи с тем, что колебательные системы маятника и компенсатора будут иметь некоторые отличия, связанные с технологией изготовления и конфигурацией, отклик компенсатора на управляющее воздействие будет отличаться от реакции маятника. Это приведет к тому, что сумма возмущающих моментов маятника и компенсатора окажется ненулевой.

Список литературы:

1. Морозов А.Н. Основы фурье-спектрометриии. Ин-т энергет. Проблем хим. Физики РАН. – М.: Наука, 2006. – 275 с.
2. Soucy M.A., Chateauneuf F., Deutsch C., Etienne N. “ACE-FTS Instrument Detailed design”, Proceedings of SPIE Vol.4814, 2002;
3. Chateauneuf F., Soucy J.A., Perron G., Levesque L., Tanii Jun «Design and Qualification of the TANSO Interferometer», Fourier Transform Spectroscopy Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment, OSA Technical Digest Series (CD), Optical Society of America, 2007;
4. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов. Конспект лекций. Часть 1. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 171 с.
5. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов. Конспект лекций. Часть 2. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2008. – 115 с.
6. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления электроприводов. Учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 53 с.
7. Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления. Учебное методическое пособие. – Томск: ТУСУР, 2010. – 162 с.
8. Герман-Галкин С.Г. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ. Часть III

АРХИПОВ С.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»

E-mail: arhipof@zenit-kmz.ru

В третьей части статьи обсуждаются расчетные методы анализа термостабильности съемочной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (СА). Предложено различать методы экспресс оценок и технологии компьютерного моделирования. Подробно рассмотрены экспресс-оценки теплового режима, напряженно-деформированного состояния деталей, термоаббераций, снижения коэффициента передачи модуляции, изменения фотограмметрических параметров и радиометрических характеристик. Предложены понятия статической и динамической терморасстраиваемости и термостабильности СА.

Ключевые слова: термостабильность, съемочная аппаратура, экспресс-оценка, тепловой режим, напряжения, деформации, термоабберации, частотно-контрастная характеристика, фотограмметрические параметры, радиометрические характеристики.

Для анализа термостабильности съемочной аппаратуры (СА) используют четыре группы методов:

- А) расчетные методы,
- Б) метод аналогии,
- В) метод макетирования,
- Г) метод измерений.

Возможность применения того или иного метода зависит от этапа жизненного цикла СА. Согласно [1] различают следующие основные этапы жизненного цикла изделия:

- этап эскизного проектирования (ЭП),
- этап разработки конструкторской документации (КД),

- этап наземной отработки и испытаний (НИ),

- этапы летных испытаний (ЛИ),
- этап штатной эксплуатации (ШЭ).

В табл. 1 указана применимость групп методов в зависимости от этапа жизненного цикла.

Перечисленные методы применимы как на уровне конкретных моделей (тепловая, механическая, оптическая, шума), так и для сквозного анализа термостабильности. Они могут быть применены также к различным уровням иерархического строения СА: ко всей СА, к ее составным частям (система оптико-меха-

Таблица 1.

ЭП	КД	НИ	ЛИ	ШЭ
А, Б	А, Б	А, В	А, Г	А, Г

ническая, электронный блок), к узлам (объектив, электронная ячейка, оптический блок и т.п.), либо к отдельным деталям (зеркало, корпус, линза и т.п.).

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ

Разнообразие, многоуровневость конструкций порождают сложность их математических моделей теплообмена, напряженно-деформированного состояния, искажений волнового фронта и, соответственно, большое число методов расчета.

Общепринято различать численные и аналитические методы расчета. Аналитические методы в отличие от численных дают решение в виде формул, выражающих взаимосвязь между параметрами, тем самым описывают некоторую область состояний конструкции (элемента) СА. Аналитические методы и упрощенные модели (тепловые, механические, оптические) несут в себе опыт расчетов целых классов аналогичных задач. Это их свойство особенно ценно на начальных этапах создания изделия (ЭП, КД), когда конструкторская документация еще отсутствует, и расчетчик вместе с конструктором участвует в детализации схемных и конструкторских решений.

К недостаткам аналитических методов можно отнести:

1) высокие требования к квалификации расчетчика, который должен уметь преобразовать, упростить исходную сложную адекватную математическую модель к разрешаемой аналитической форме,

2) ограниченность применения узкими классами задач в сравнении с численными методами.

Наличие мощного специализированного программного обеспечения с дружественным интерфейсом стирает границы между аналитическими и численными методами. Для конкретного расчетного случая численный метод может быть применен многократно с варьируемыми параметрами и с последующей аппроксимацией полученных результатов простыми формулами.

Предлагается новая классификация мето-

дов расчета, в основе которой лежит критерий практического результата от применения метода расчета. Новая классификация исходит из общего положения: цель развития технической науки – создание инструментов, использование которых позволяет: а) расширять круг решаемых задач, б) решать задачи более эффективно, т.е. с меньшими затратами в том числе и менее квалифицированными силами.

Предлагается различать следующие расчетные методы:

- компьютерные технологии моделирования,
- метод экспресс-оценок.

Под компьютерными технологиями моделирования понимаем деятельность расчетчика, направленную на создание совокупности математических моделей конструкции (в т.ч. элементов различных уровней) СА и методов их решения. Назовем эту совокупность – «цифровой образец» (ЦО) СА, поведение которого в условиях эксплуатации аналогично реальному образцу СА «в железе». Очевидно, что реализация компьютерных технологий моделирования и их качество (степень близости ЦО реальному образцу) зависят от степени развития специализированного программного обеспечения. Используемые сегодня программные комплексы ANSYS, ZEMAX и их развитие [2, 3] – основа компьютерных технологий моделирования. Деятельность по созданию ЦО должна начинаться на этапе ЭП и в полном объеме выполняться к завершению этапа КД. ЦО, наряду с конструкторской документацией, должен корректироваться по результатам макетирования и испытаний.

Метод экспресс-оценок (ЭО) заключается в использовании готовых аналитических инструментов (формулы, номограммы, таблицы), для применения которых не обязательно наличие компьютера, а в случае его использования процедура расчетов максимально упрощена. Созданию эффективных ЭО посвящается большая часть научных трудов инженеров. ЭО незаменимы на этапе ЭП и служат исходными данными для ЦО СА, ко-

торый должен быть создан и «расчётно испытан» на этапе КД. На этапе КД должна проводиться 1-я «актуализация» экспресс-оценок по результатам «расчетных испытаний» ЦО, т.е. должны быть уточнены параметры аналитических инструментов, и, при необходимости, изменена структура формул. На этапах НИ, ЛИ, ШЭ должны выполняться последующие «актуализации» как ЭО, так и ЦО по результатам соответствующих испытаний и эксплуатации макетов и образцов СА.

Для технической науки ЭО выполняют роль накопленных знаний и наряду с принципами составляет ее основное содержание. В этой связи остановимся на ЭО всех моделей термостабильности более подробно.

ЭО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СА

Условия эксплуатации СА в составе космического аппарата (КА) определяют особенности ее теплового режима:

- периодическое изменение внешних тепловых потоков излучения, обусловленное периодом обращения – Π КА вокруг Земли (для типичной солнечно-синхронной орбиты можно принять $\Pi = 1,5$ часа),
- скачкообразное изменение температуры, вызванное перенацеливанием КА, включением электронных блоков СА или бортовых устройств.

Для защиты СА от солнечных засветок перед входным окном СА размещается крышка-бленда, которая открывается на время съемки. Электронные блоки СА включаются на время съемки. Примем допущение, что за время съемки тепловые воздействия не изменяются.

С учетом всех этих факторов упрощенные тепловые воздействия на СА для ЭО внешнего теплообмена СА сводятся к четырем типам:

- А) постоянный поток q во входном окне СА на время съемки,
- В) скачок температуры $t_{КА}$ посадочных мест СА,
- С) постоянные тепловыделения W в электронных блоках на время съемки,
- Д) периодическое изменение температуры $t_{КА}$ посадочных мест СА.

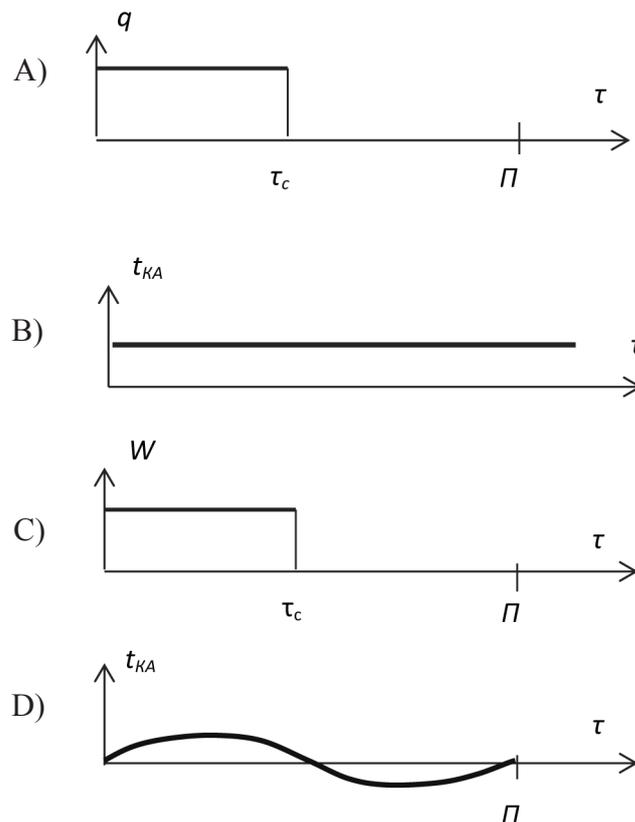


Рисунок 1.
Внешние тепловые воздействия на СА

Коэффициент облученности элементарной площадки входного окна Землей $\varphi_{К-З}$ принимаем равным 1, т.к. во время съемки СА «смотрит» на Землю. Для более достоверного расчета $\varphi_{К-З}$ можно применить упрощенные формулы [4].

Модели ЭО теплового режима СА целесообразно построить на основе известных аналитических решений задачи теплопроводности и теории регулярного режима Г.М. Кондратьева [5], т.к. именно в этой теории предельная простота расчетных формул сочетается с максимальной физической достоверностью.

Для воздействия типа А выбираем модель полупространства, на поверхности которого задан поток q , действующий за время τ .

Начальные условия однородные $t(x,0)=0$. Распределение температуры в полупространстве выражается формулой [5, 6]:

$$t(x, \tau) = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) = \frac{1,13q}{\lambda} \sqrt{a\tau} \left(1 - \frac{x}{3,38\sqrt{a\tau}}\right)^3 \quad (1)$$

$$t(0, \tau) = \frac{1,13q}{\lambda} \sqrt{a\tau}$$

где α , λ – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности.

За время τ поверхностный слой полупространства прогревается. Температура полупространства изменяется от максимальной $t(0, \tau)$ до нулевой $t(\infty, \tau) = 0$ в глубине полупространства.

Толщина слоя x^* , прогретого на 5% от $t(0, \tau)$, составит:

$$x^* = 2,36\sqrt{a\tau} \quad (2)$$

Например, для ситалла СО-115М толщина прогретого слоя за $\tau=600$ с составит $x^* = 48$ мм.

Рассмотрим пример. На СА действуют лучистые потоки:

$q_{co} = 465$ Вт/м² – плотность потока отраженного от Земли солнечного излучения,

$q_3 = 230$ Вт/м² – плотность потока излучения Земли,

$q_{cob} = 420$ Вт/м² – собственное излучение при начальной температуре 20°C.

При открытии крышки лучистые потоки создают неравномерное, нестационарное температурное поле по толщине первой линзы объектива. Коэффициент облученности первой линзы объектива входным окном составляет $\varphi_{o-l} = 0,2$. Коэффициент поглощения солнечного излучения $a_s = 0,05$. Степень черноты поверхности линзы $\varepsilon = 0,9$; линза изготовлена из стекла СТК-3: $\alpha = 0,38 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda = 0,72$ Вт/м²К (по ГОСТ 13659-78). Суммарная плотность теплового потока на поверхности линзы:

$$q = \varphi_{o-l} [\varepsilon(q_3 - q_{cob}) + a_s q_{co}] =$$

$$= 0,2[0,9(230 - 420) + 0,05 \cdot 465] = -30 \text{ Вт/м}^2$$

Минус означает, что линза будет выхолаживаться.

Подставляем исходные данные в формулы (1,2) и получаем через $\tau = 200$ с после открытия крышки:

$$t(x, \tau) = -0,4 \left(1 - \frac{x}{1,8}\right)^3$$

$$t(0, 200) = -0,4 \text{ К}$$

$x^* = 1,2$ мм,

где координата x измеряется в мм.

Для воздействия типа В можно применить формулы регулярного режима I-го рода [7].

Тело с равномерным начальным распределением температуры $t_0=0$ помещается в среду с температурой t_c . Известны коэффициенты λ – теплопроводности и α – температуропроводности. Площадь теплообмена тела со средой – S , объем тела – V . Коэффициент теплообмена со средой – α .

Изменение температуры тела выражается формулой

$$t(\tau) = t_c [1 - \exp(-m_0 \tau)]$$

$$m_0 = \psi \frac{\alpha S a}{\lambda V}, \quad \psi = \frac{t_c - t_s}{t_c - t_v} \quad (3)$$

Параметр m_0 называется темпом нагрева тела. Критерий неравномерности температурного поля в теле ψ равен отношению разностей перегревов среднеповерхностной t_s и среднеобъемной t_v температур тела относительно температуры среды t_c .

В стадии регулярного режима перегревы любой точки тела изменяются по одной и той же формуле (3), критерий неравномерности температурного поля ψ зависит от условий и формы самого тела, которая выражается коэффициентом формы K [7].

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{H^2 + 1,437H + 1}}, \quad H = \frac{\alpha Ka}{\lambda V} \quad (4)$$

Коэффициенты формы:

$$\begin{aligned} \text{для шара радиуса } R \quad K &= \frac{R^2}{\pi^2} \\ \text{для цилиндра} \\ \text{длиной } l \text{ и радиуса } R \quad K &= \frac{1}{\left(\frac{2,405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \\ \text{для цилиндра} \\ \text{для параллелепипеда} \\ \text{со сторонами } l_1, l_2, l_3 \quad K &= \frac{1}{\left(\frac{\pi}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_3}\right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим пример. Определим среднюю неравномерность температурного поля в СА после того, как температура посадочных мест КА изменилась на 2 градуса. Положим, что СА представляет собой цилиндр: диаметр $D_0=300$ мм, длина $L=1000$ мм. Масса СА $M=100$ кг. Тепловая проводимость между СА и посадочными местами КА определяется из анализа конструкции крепления СА с учетом лучистого теплообмена. Пусть СА заглублена в КА и крепится на посадочные места по фланцу, по результатам анализа, например, получим $\alpha \cdot S = 10$ Вт/К. Для применения формул (3-5) необходимо иметь коэффициенты теплопроводности λ и температуропроводности a , которые связаны известной зависимостью

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (6)$$

где c – коэффициент теплоемкости, ρ – плотность.

Затруднение вызывает вопрос: о каком материале идет речь. Ведь СА существенно неоднородна. Поступим следующим образом. Плотность находим как

$$M/V = M/(\pi D_0^2/4)L = 100 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент теплоемкости определяем, как средневзвешенное от коэффициентов теплоемкостей всех материалов СА, пусть $c=600$ Дж/кг·К. Теплопроводность определяем, как сумму кондуктивной и лучистой проводимостей для характерной ячейки, включающей линзу и воздушный промежуток. По результатам оценки усредненный коэффициент теплопроводности $\lambda = 5,0 \cdot D_0 = 1,5$ Вт/м·К.

Тогда коэффициент температуропроводности по формуле (6)

$$a = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Теперь используем формулы (3-5) и получим:

$K=0,0038$; $H=0,355$; $\psi=0,78$; $m_0=1,8 \cdot 10^{-3} 1/\text{К}$; изменение среднеобъемной температуры СА:

$$t_v(\tau) = t_c [1 - \exp(-m_0\tau)] = 2[1 - \exp(-1,8 \cdot 10^{-3} \tau)]$$

разность между t_s и t_v :

$$\begin{aligned} t_s(\tau) - t_v(\tau) &= t_c(1 - \psi) \exp(-m_0\tau) = \\ &= 0,44 \exp(-1,8 \cdot 10^{-3} \tau) \end{aligned}$$

Полученный результат характеризует среднюю неравномерность температурного поля СА.

Из формулы (3) также можно определить время τ^* , за которое тело практически нагреется до температуры среды, т.е. разность между температурой тела и температурой среды составит не более 5%:

$$\tau^* = \frac{1}{m_0} \ln \left(\frac{t_c}{t_c - t} \right) = \frac{1}{m_0} \ln 20 = \frac{3}{m_0} \quad (7)$$

Формула (7) позволяет решить типичную практическую задачу по определению времени выдержки СА или объектива после транспортирования из одного помещения в другое, с отличной температурой. Исходя из цели задачи, положим $\psi=1$. Для объектива массой $M=\rho V=30$ кг примем, например, средний коэффициент теплоемкости $c=900$ Дж/кг·К, коэффициент теплообмена $\alpha=10$ Вт/м², площадь теплообмена $S=0,5$ м². Тогда время выдержки составит $\tau^*=4,5$ часа.

Заметим, что если объектив находится в укладочном ящике, то коэффициент теплообмена существенно уменьшится и может составить (для деревянного ящика) ~ 2 Вт/м², т.о. τ^* увеличивается до 22 часов.

Для ЭО воздействия типа С также можно применять теорию регулярного режима. Г.М. Кондратьевым и Г.Н. Дульневим [7] доказано, что регулярный режим для тела или системы тел с источниками тепла формулируется для разности температур в

стационарном и нестационарном состояниях, при этом темп нагревания $m^* = m_0$, т.е. определяется по тем же формулам (3-5).

Разность стационарной температура тела и температуры среды определяется из уравнения теплового баланса:

$$t_{стат} - t_c = \frac{W}{\alpha S} \quad (8)$$

Например, определим динамику нагрева электронного блока мощностью $W=100$ Вт после его включения. Положим: $\psi = 1$; $\alpha \cdot S = 10$ Вт/К; масса электронного блока $M = \rho V = 5$ кг; средний коэффициент теплоемкости $c = 800$ Дж/кг · К. Тогда $m^* = m_0 = \alpha S / Mc = 2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К и текущий перегрев электронного блока относительно температуры среды составит:

$$t - t_c = \frac{W}{\alpha S} [1 - \exp(-m^* \tau)] = 10 [1 - \exp(-2,5 \cdot 10^{-3} \tau)] \quad (9)$$

То есть за 600 с работы электронный блок нагреется почти на 8 градусов.

Для ЭО воздействия типа D выберем известное аналитическое решение двухузловой схемы (рис. 2) при периодическом изменении температуры внешней среды $t_c = t_{KA}$.

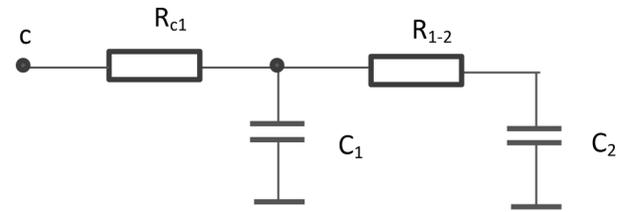


Рисунок 2.
Двухузловая тепловая схема

Система уравнений теплового баланса имеет вид:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dt_1}{d\tau} &= \frac{1}{R_{1c}} (t_1 - t_c) + \frac{1}{R_{12}} (t_1 - t_2) \\ C_2 \frac{dt_2}{d\tau} &= \frac{1}{R_{12}} (t_2 - t_1) \\ t_c &= A_c \cos(\omega \tau) \quad , \quad \omega = \frac{2\pi}{P} \end{aligned} \quad (10)$$

здесь P, A_c – период и амплитуда колебания температуры среды,

t_1, t_2, C_1, C_2 – температуры и теплоемкости тел (узлов) 1 и 2,

R_{12}, R_{c1} – тепловые сопротивления.

В установившемся гармоническом режиме решение системы уравнений (10) для разности температур $t_1 - t_2$

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= \frac{C_2 R_{12} \omega}{\sqrt{\omega^2 [C_1 R_{12} + C_2 (R_{c1} + R_{12})]^2 + (C_1 C_2 R_{c1} R_{12} \omega^2 - 1)^2}} A_c \cos(\omega \tau + \beta) \\ \cos \beta &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{C_1 R_{12} + C_2 (R_{c1} + R_{12})}{C_1 C_2 R_{c1} R_{12} \omega^2 - 1} \right]^2 \omega}} \end{aligned} \quad (11)$$

Формулы (11) позволяют получить экспертную оценку динамики перепадов температур СА или ее составных частей.

Рассмотрим, например, линзовый объектив. Положим, что объектив представляет собой цилиндр: диаметр $D_0 = 400$ мм, длина $L = 1000$ мм. Суммарная масса линз $M_2 = 200$ кг. Масса титанового корпуса объектива $M_1 = 100$ кг. Если температура корпуса объектива – t_1 и среднеобъемная температу-

ра линз – t_2 , тогда разность $t_1 - t_2$ характеризует динамику среднего радиального градиента температуры по линзам объектива, при изменении температуры среды по гармоническому закону. Положим $C_1 = 55000$ Дж/К; $C_2 = 120000$ Дж/К; $R_{c1} = 0,06$ К/Вт; $R_{12} = 0,02$ К/Вт; $A_c = 1$ К.

С помощью формулы (11) построим зависимость модуля $|t_1 - t_2|$ от периода P . Результат расчетов представлен на рис. 3.

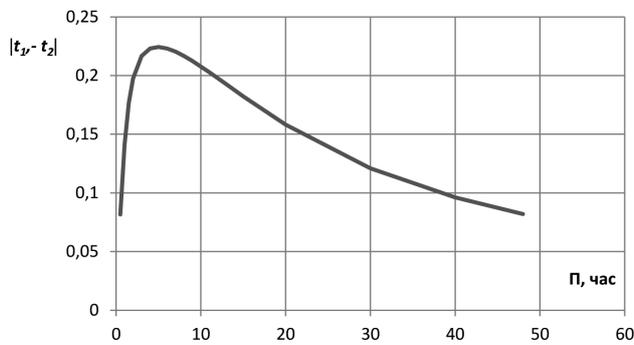


Рисунок 3.

Зависимость $|t_p - t_2|$ от периода колебаний температуры среды

Из рис. 3 видно, что для гармоник с малым периодом (менее 0,5 час) и гармоник с большим периодом (более 36 час) радиальный градиент по линзам минимальный не более 0,1 К. Максимум достигается для гармоники с периодом $P=5$ час и составляет 0,224 К.

Тепловое сопротивление R_{c1} и R_{l2} , с учетом требований теории регулярного режима 3-го рода [7], должны рассчитываться по цепочке:

$$t_c - t_{l\text{ поверх}} - t_{l\text{ объем}} - t_{l2\text{ поверх}} - t_{l2\text{ объем}}$$

В рассмотренном примере для титанового корпуса объектива $t_{l1\text{ поверх}} = t_{l1\text{ объем}}$. Сопротивление $R_{l2} = 0,02$ К/Вт складывается из

$$R_{l2} = R_{\text{крепления}} + R_{\text{линз}}$$

Сопротивление $R_{\text{крепления}}$ учитывает оправы линз и конструктивные элементы крепления линз в оправе. Сопротивление $R_{\text{линз}}$ определяется как сопротивление стенки круглой трубы [8]:

$$R_{\text{линз}} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{поверх}}}{r_{\text{объем}}}\right)}{2\pi L_{\text{линз}} \lambda} \quad (12)$$

$$R_{\text{линз}} = \frac{0,046}{L \cdot \lambda} \quad (14)$$

здесь $L_{\text{линз}}$ – толщина линз объектива,
 λ – средневзвешенный коэффициент теплопроводности линз объектива,
 $r_{\text{поверх}}$ – средний радиус линз,
 $r_{\text{объем}}$ – среднее положение среднеобъемной температуры линз.

Определим $r_{\text{объем}}$. В центре линз, на оптической оси разместим начало цилиндрической системы координат и обозначим относительную радиальную координату буквой $\rho = r/r_{\text{поверх}}$. Зададимся формой радиального параболического распределения температуры по линзам $t(\rho) = b + g\rho^n$

Здесь b, g, n – коэффициенты. Обозначим $\rho^* = r_{\text{объем}} / r_{\text{поверх}}$. Тогда среднеобъемная температура линз:

$$t_{2\text{ объем}}(\rho^*) = b + \frac{2g}{n+2}$$

достигается при

$$\rho^* = \sqrt[n]{\frac{2}{n+2}} \quad (13)$$

В табл. 2 формула (13) рассчитана для различных значений n .

Из таблицы видно, что координата ρ^* среднеобъемной температуры находится в диапазоне $0,7 \div 0,8$ для достаточно сильно отличающихся радиальных распределений температур по линзам. Поэтому, если не имеется априорной информации по рассчитываемой конструкции, рекомендуется принять $\rho^* = 0,75$. Для гармоник с малыми периодами показатель n следует брать большим, чем для гармоник с большими периодами.

В продолжение рассматриваемого примера формула (12) запишется, при $\rho^* = 0,75$, в следующем виде

При $L \cdot \lambda = 3,2$ Вт/К, сопротивление по линзам составит $R_{\text{линз}} = 0,014$ К/Вт.

Таблица 2.

n	2	3	4	5	6	7	8
ρ^*	0,707	0,737	0,760	0,778	0,794	0,807	0,818

Дополнительно отметим, что в рассматриваемом примере, зная разность температур $t_1 - t_2$, можно оценивать перепад между среднеповерхностной температурой линз и температурой в их центре, то есть максимальный радиальный градиент температуры по линзам по формуле:

$$t_{2\text{поверх}} - t_{2\text{центр}} = \frac{t_1 - t_2}{R_{12}} R_{\text{линз}} \frac{1}{1 - (\rho^*)^n} \quad (15)$$

ЭО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ СА

ЭО должны связывать распределение температуры в детали с ее напряженно-деформированным состоянием (НДС) и могут быть описаны линейными уравнениями статической задачи термоупругости [9].

В цилиндрических координатах соотношения между компонентами тензора деформации $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta r}, \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zr}, \varepsilon_{z\theta} = \varepsilon_{\theta z}$ и компонентами перемещения u_r, u_θ, u_z имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}; & \varepsilon_\theta &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right); & \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ \varepsilon_{r\theta} &= \varepsilon_{\theta r} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial \theta} - u_\theta \right) + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right); \\ \varepsilon_{rz} &= \varepsilon_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right); & \varepsilon_{z\theta} &= \varepsilon_{\theta z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \sigma_r - \sigma_\theta \right) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + 2\sigma_{\theta r} \right) + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} &= 0; & \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \sigma_{rz} \right) + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Закон Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu (\sigma_\theta + \sigma_z)) + \alpha T; & \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu (\sigma_z + \sigma_r)) + \alpha T; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_r + \sigma_\theta)) + \alpha T; & \varepsilon_{r\theta} &= \frac{\sigma_{r\theta}}{2G}; & \varepsilon_{rz} &= \frac{\sigma_{rz}}{2G}; \\ \varepsilon_{z\theta} &= \frac{\sigma_{z\theta}}{2G}; & E &= 2G(1 + \nu) \end{aligned} \quad (18)$$

здесь: E – модуль Юнга; G – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент температурного расширения; $T = T(r, \theta, z)$ – температурное поле в фиксированный момент времени; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r}, \sigma_{rz} = \sigma_{zr}, \sigma_{z\theta} = \sigma_{\theta z}$ – компоненты тензора напряжений.

Оптические детали (линзы, призмы, зеркала, дифракционные решетки, светофильтры, защитные стекла), предназначенные для преобразования светового волнового фронта, имеют следующие конструктивные особен-

ности, обусловленные технологией их изготовления и функциональным назначением:

- наличие элементов регулярности и симметрии в строении,
- наличие стандартных форм оптической детали, например, линза – тело, ограниченное цилиндрической поверхностью и двумя сферическими поверхностями, центры которых расположены на оси цилиндрической поверхности,
- двумерный характер рабочих поверхностей.

В большинстве случаев, для расчетов напряженно-деформированного состояния оптической детали, используется модель пластинки, так как отношение толщины оптической детали к ее диаметру, обычно находится в диапазоне $1/6 - 1/12$. Исключение составляют линзы и зеркала с большой толщиной (модель цилиндра), призмы и зеркальные уголкового отражатели, имеющие ярко выраженное пространственное строение, для определения НДС таких тел необходимо решать

пространственные задачи теории упругости.

Для цилиндра, при осесимметричном температурном поле $T = T(r, z)$, мысленно вырезанные из него тонкие «секторочки» вследствие осевой симметрии деформируются идентично, поэтому между ними касательные напряжения $\sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta z} = 0$ и, соответственно, деформации $\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta z} = 0$.

С учетом этих допущений система из 15 уравнений (16-18) сводится к системе из десяти уравнений:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rz}}{r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) + \alpha T; & \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r)) + \alpha T; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)) + \alpha T; & \varepsilon_{rz} &= \frac{\sigma_{rz}}{2G}; & E &= 2G(1 + \nu) \end{aligned} \quad (21)$$

Решение системы уравнений (19-21), описывающей напряженно-деформированное состояние цилиндра, может быть получено в аналитической форме [9], однако формулы слишком громоздки и сложны для восприятия.

Для плоского напряженного состояния тонкой пластинки известны два простых решения, при условии одномерного температурного поля, которые могут служить в качестве ЭО напряженно-деформированного состояния деталей СА.

1. *Неравномерная температура по радиусу пластинки $T = T(r)$*

Пусть в тонкой круглой пластинке с центральным отверстием (рис. 4) температурное поле неравномерно по радиусу $T = T(r)$.

Так как пластинка тонкая, то напряжения $\sigma_{rz} = \sigma_z = 0$ и, соответственно, деформация $\varepsilon_{rz} = 0$. Система уравнений (19-21) упрощается:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta) + \alpha T; & \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) + \alpha T; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (-\nu(\sigma_r + \sigma_\theta)) + \alpha T \end{aligned} \quad (24)$$

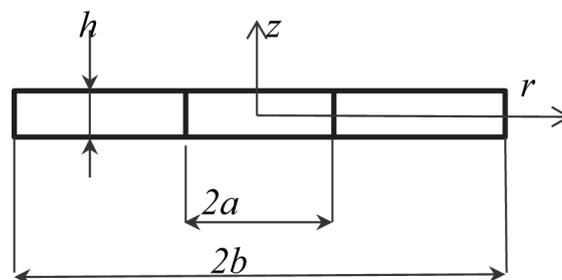


Рисунок 4.
Тонкая пластинка

Из уравнений (24) можно получить выражение напряжений через деформации:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\theta - (1+\nu) \alpha T); \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_r - (1+\nu) \alpha T)\end{aligned}\quad (25)$$

Подставив (22) в (25), а затем (25) в уравнение равновесия (23), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение относительно перемещения u_r [10]:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} &= (1+\nu) \alpha \frac{dT}{dr} \quad \text{или} \\ \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d(r u_r)}{dr} \right] &= (1+\nu) \alpha \frac{dT}{dr}\end{aligned}\quad (26)$$

интегрируя которое, получим:

$$u_r = \frac{\alpha(1+\nu)}{r} \int_a^r r T dr + C_1 r + \frac{C_2}{r}\quad (27)$$

Подставим (27) в (22) и далее в (25) получим:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\alpha E \frac{1}{r^2} \int_a^r T r dr + \frac{E}{1-\nu^2} \left[C_1(1+\nu) - C_2(1-\nu) \frac{1}{r^2} \right] \\ \sigma_\theta &= \alpha E \frac{1}{r^2} \int_a^r T r dr - \alpha E T + \frac{E}{1-\nu^2} \left[C_1(1+\nu) + C_2(1-\nu) \frac{1}{r^2} \right]\end{aligned}\quad (28)$$

Из условий $\sigma_r = 0$, при $r=a$ и $r=b$, находим постоянные C_1 и C_2 и получаем простые формулы для напряжений в круглой пластинке с отверстием:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{r^2} \left(\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr - \int_a^r T r dr \right); \quad \sigma_\theta = \frac{\alpha E}{r^2} \left(-T r^2 + \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr + \int_a^r T r dr \right)\quad (29)$$

Для сплошной пластинки $a = 0$:

$$\sigma_r = \alpha E \left(\frac{1}{b^2} \int_0^b T r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr \right); \quad \sigma_\theta = \alpha E \left(-T + \frac{1}{b^2} \int_0^b T r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr \right)\quad (30)$$

Зная напряжения σ_r, σ_θ из (24) определяем деформацию ε_z , а из (22) определяем перемещение u_z :

$$u_z = \alpha z(1+\nu)T - 2\alpha\nu \frac{z}{b^2 - a^2} \int_a^b r T dr\quad (31)$$

Тоже для сплошной пластины:

$$u_z = \alpha z(1+\nu)T - 2\alpha\nu \frac{z}{b^2} \int_0^b r T dr\quad (32)$$

Перемещения (31) и (32) состоят из постоянной и переменной части. Постоянная часть не зависит от r и не искажает проходящий или отраженный от пластины волновой фронт. Переменная часть зависит от r и искажает проходящий или отраженный волновой фронт. Т.о. для пластины толщиной h изменение толщины по радиусу выражается

формулой:

$$\Delta h = \alpha h (1+\nu) T(r)\quad (33)$$

из которой видно, что форма пластины изменяется подобно распределению температуры $T = T(r)$.

2. *Неравномерная температура по толщине пластинки $T = T(z)$.*

В этом случае для тонкой пластинки применяются следующие допущения:

- $\sigma_z = 0$, $\sigma_r = \sigma_\theta$ зависят только от z ,
- при деформации пластинки нормаль к срединной поверхности сохраняется.

Вследствие этих допущений уравнения равновесия (20) удовлетворяются автоматически. Физические уравнения (21) записываются следующим образом

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu \sigma_\theta) + \alpha T; \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu \sigma_r) + \alpha T \quad (34)$$

Температурное поле $T=T(z)$, приложенное к пластинке вызывает ее расширение и изгиб. Мысленно представим, что температурное поле действует, но деформации любого элементарного объема пластинки отсутствуют $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = 0$. Тогда из (34) следует, что в каждом элементарном объеме пластинки действуют напряжения сжатия:

$$\sigma_r = -\frac{\alpha T E}{1 - \nu} \quad (35)$$

Проинтегрируем напряжения на краю пластинки, т.е. найдем распределённые сжимающую силу и изгибающий момент на краю пластинки

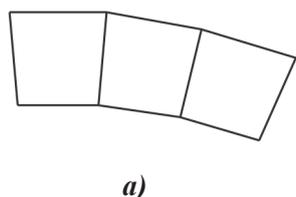
$$N'_r = -\frac{E\alpha}{1-\nu} \int_{-h/2}^{h/2} T dz; \quad M'_r = -\frac{E\alpha}{1-\nu} \int_{-h/2}^{h/2} T z dz \quad (36)$$

Теперь к сжатой, описанным образом (35), пластинке приложим найденные силу и момент (36), но в противоположном направлении

$$N_r = -N'_r; \quad M_r = -M'_r$$

Тогда на краю пластинки сила и момент будут равны нулю, а пластика расширится и изогнется, приближаясь к своему деформированному состоянию под действием температурного поля. При этом в элементарных объемах пластинки, удаленных от края, будут действовать температурные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{N_r}{h} + \frac{M_r z}{h^3/12} - \frac{\alpha T E}{1 - \nu} \quad (37)$$



а)

Подставим (37) в (34) и согласно (22) получим

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \frac{du_r}{dr} = \frac{\alpha}{h(1-\nu)} \int_{-h/2}^{h/2} T dz + \frac{12\alpha z}{h^3(1-\nu)} \int_{-h/2}^{h/2} T z dz \quad (38)$$

Первый член в (38) равен расширению пластинки вдоль срединной линии, второй – изгибу. Рис. 5 иллюстрирует физический смысл формулы (38). Исходный элементарный объем в форме параллелепипеда расширяется под действием температуры в трапециевидную призму. Справа построена эпюра деформаций.

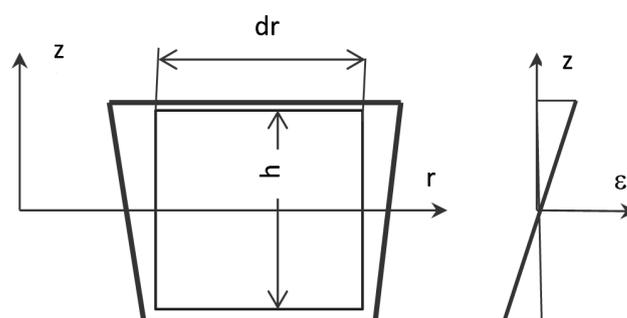
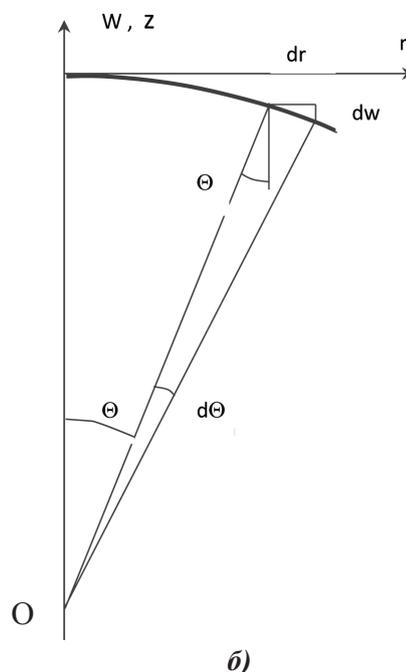


Рисунок 5.

Деформация элементарного объема



б)

Рисунок 6.

а) фрагмент пластины, составленный из деформированных элементарных объемов;
б) изгиб срединной поверхности пластинки

Мысленно собираем из деформированных элементарных объемов исходную пластину и видим, что пластина изгибается (рис. 6 а). Введем функцию прогиба $w(r)$ срединной поверхности пластины, производная от которой, умноженная на координату z , равна углу поворота Θ нормали к срединной поверхности, а вторая производная равна $1/\rho$, где $\rho = OA$ – радиус кривизны прогиба срединной поверхности (рис. 6 б).

$$\frac{dw}{dr} = \Theta \quad ; \quad \frac{d^2w}{dr^2} = \frac{d\Theta}{dr} = \frac{1}{\rho} \quad (39)$$

Точки нормали, отстоящие на z от срединной поверхности, переместятся на величину

$$u_r = -z \cdot \Theta = z \cdot \frac{dw}{dr} \quad (40)$$

Возьмем производную по r от (40) и с учетом (22) и (39) получим

$$\frac{du_r}{dr} = \varepsilon_r = -z \cdot \frac{d\Theta}{dr} = -z \frac{1}{\rho} \quad (41)$$

Сравниваем (41) с (38) и получим формулу для нахождения радиуса кривизны прогиба срединной поверхности

$$\frac{1}{\rho} = \frac{12\alpha}{h^3(1-\nu)} \int_{-h/2}^{h/2} T z dz \quad (42)$$

Заметим, что если температурное поле линейно $T(z) = z$, то по формулам (36, 37) $\sigma_r = 0$, то есть пластина изгибается без напряжений.

Полученные формулы (33) и (42) используются также и для ЭО температурных деформаций корпусных деталей и оправ, которые представляют собой рамы или тонкостенные оболочки.

ЭО ТЕРМОАБЕРРАЦИЙ

Упрощенные формулы для оценки термоаббераций оптической системы получаются из общих формул для термоаббераций [11] за счет трех типов допущений:

- задание возможных температурных полей в СА с помощью примитивных температурных параметров,
- упрощение форм температурных деформаций,

– огрубление описания оптической системы. Рассмотрим практические примеры.

Пример 1. Изменение номинала температуры СА.

Температурный параметр $\Delta t = t - 20$ – отклонение равномерного температурного поля t от номинала 20°C . Температурные деформации сводятся к изменению фокусного расстояния. Описание линзового объектива сводится к сумме тонких компонент. ЭО термодифокусировки СА

$$\Delta s' = \Delta t \left[\sum_{i=1}^N \varphi_i V_i + \alpha_\kappa Z_\kappa \right] \quad (43)$$

где N – число линз в объективе,
 $\varphi_i = 1/f_i$ – оптическая сила i -ой линзы,
 f_i – фокусное расстояние i -ой линзы,
 $V_i = [\beta/(n-1) - \alpha]$ – термооптическая постоянная стекла i -ой линзы,
 α_κ – коэффициент температурного расширения материала корпуса СА,
 Z_κ – длина корпуса СА от объектива до приемника изображения.

Пример 2. Радиальный градиент температуры в линзовом объективе.

Температурный параметр Δt_r – радиальный перепад температуры по линзам. Температурные деформации сводятся к изменению сферичности линз. Описание линзового объектива сводится к сумме тонких компонент. ЭО термодифокусировки объектива

$$\Delta s' = \frac{1}{8} \left(\frac{d_o}{f'} \right)^2 \Delta t_r \sum_{i=1}^N h_i W_i \quad (44)$$

где N – число линз в объективе,
 d_o/f' – относительное отверстие объектива,
 h_i – толщина i -ой линзы,
 $W_i = [\beta + (n-1)\alpha]$ – термооптическая постоянная стекла i -ой линзы.

Пример 3. Градиент температуры по толщине головного (первого) зеркала.

Температурный параметр Δt_h – перепад температуры по толщине головного зеркала объектива. Температурная деформация сводится к изменению сферичности зеркала. ЭО термодифокусировки объектива

$$\Delta s' = f'^2 \frac{\alpha_{T3}}{1-\nu} \frac{\Delta t_h}{h} \quad (45)$$

где f' – фокусное расстояние объектива,
 $\Delta t_h/h$ – температурный градиент по толщине зеркала h ,

$\alpha_{ГЗ}$ – коэффициент температурного расширения материала зеркала,

ν – коэффициент Пуассона.

Пример 4. Градиент температуры по толщине сканирующего зеркала.

Предполагается, что плоское сканирующее зеркало установлено перед входным окном СА так, что нормаль к зеркалу образует угол ϕ с оптической осью СА. Температурный параметр Δt_h – перепад температуры по толщине сканирующего зеркала. Температурная деформация сводится к изменению сферичности сканирующего зеркала. ЭО температурных волновых aberrаций дефокусировки D и астигматизма A в оптической системе

$$D = \frac{d_o^2}{8} \frac{\alpha_z}{1-\nu} \frac{\Delta t_h}{h} \frac{(1+\cos\phi)}{\cos^2\phi};$$

$$A = \frac{d_o^2}{8} \frac{\alpha_z}{1-\nu} \frac{\Delta t_h}{h} \frac{(1-\cos\phi)}{\cos^2\phi} \quad (46)$$

где d_o – диаметр зеркала,

$\Delta t_h/h$ – температурный градиент по толщине зеркала h ,

α_z – коэффициент температурного расширения материала зеркала,

ν – коэффициент Пуассона.

Пример 5 [12]. Градиент температур по радиусу иллюминатора.

Предполагается, что иллюминатор установлен перед объективом СА. Температурный параметр Δt_r – перепад температуры по радиусу иллюминатора. Температурная деформация сводится к отклонению формы поверхности иллюминатора от плоскости и изменению распределения показателя преломления стекла иллюминатора. ЭО термоволновой aberrации в оптической системе

$$D = h \Delta t_r (W + R) \quad (47)$$

где h – толщина иллюминатора,

$\Delta t_r = \Delta t_r r^n$ – радиальное распределение температуры ($n=2$),

$W = [\beta + (n-1)\alpha]$ – термооптическая постоянная стекла,

$R = \alpha(n-1)\nu - \alpha E(C_1 + C_2)/2$ – постоянная вкладка термоупругих напряжений стекла.

Пример 6 [13]. Термодефокусировка зеркального телескопа Грегори.

Телескоп Грегори (рис. 7) состоит из головного параболического зеркала и вторичного эллиптического зеркала, фокальные точки O которых совпадают.

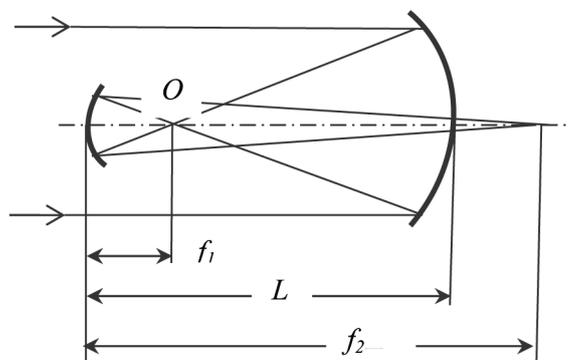


Рисунок 7.

Схема телескопа Грегори

Температурные параметры: $\Delta t_{ГЗ}$, Δt_2 – перегревы зеркал, Δt_k – перегрев корпуса. Температурная деформация зеркал сводится к изменению их сферичности, корпус расширяется, изменяя взаимное положение зеркал. Для эллиптического зеркала соотношение между параксиальными фокусными расстояниями f_1 и f_2 и параксиальным радиусом кривизны R_0 имеет вид

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{2}{R_0} \quad (48)$$

Д.Д. Максудов [14] показал, что для случая, когда светящаяся точка не совпадает с анаберрационной точкой поверхности для центральной (параксиальной) зоны формула (48) сохраняется

$$\frac{1}{f_1^*} + \frac{1}{f_2^*} = \frac{2}{R_0} \quad (49)$$

где f_1^* – положение светящейся точки, f_2^* – ее изображение через зеркало.

Если подставить в формулу (49) температурные приращения параметров ($f_{ГЗ}$, L , R_0 , f_1 , f_2) и вычесть из результата формулу (48), то получаем ЭО термодефокусировки телескопа Грегори

$$\Delta s' = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 [f_{Г3} \Delta t_{Г3} \alpha_{Г3} - L \Delta t_{\kappa} \alpha_{\kappa}] + \left(\frac{f_2}{f_1} \right) (f_1 + f_2) \Delta t_2 \alpha_2 \quad (50)$$

где L – расстояние между головным и вторичным зеркалами,

$\alpha_{Г3}, \alpha_{\kappa}, \alpha_2$ – коэффициенты температурного расширения материалов.

Заметим, что дефокусировка связана с соответствующей волновой aberrацией D простой формулой

$$D = \frac{1}{8} \left(\frac{d_0}{f'} \right)^2 \Delta s' \quad (51)$$

Аналогичные примеры получения ЭО термоаббераций можно продолжить для конкретных оптических схем и оптических деталей, применяя указанные типы допущений. Результатом ЭО могут быть различные aberrации или их сочетания.

ЭО СНИЖЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ (КПМ)

Напомним аналитическую формулу ЧКХ идеального безабберационного объектива [15]

$$T(\omega) = \frac{2}{\pi} \arccos(\omega) - \omega \sqrt{1 - \omega^2} \quad ; \quad \omega = \lambda \frac{f'_0}{d_0} N \quad (52)$$

где λ – длина волны света,
 $d_0/2f'$ – числовая апертура в пространстве изображений,

N – пространственная частота.

Общий случай расчета ЧКХ для объектива с малыми aberrациями выполнил W.H. Steel. «Формулы Стила» весьма громоздки и приведены в работах [16, 17]. Для удобства практического применения формул Стила в табл. 3 приведены рассчитанные по ним значения снижения КПМ в зависимости от относительной пространственной частоты ω , для волнового фронта в полярных координатах

$$W(\rho, \varphi) = D\rho^2 + S_3\rho^4 + S_5\rho^6 + (K\rho + C_3\rho^3) \cos(\varphi - \Phi_C) + A\rho^2 \cos 2(\varphi - \Phi_A) \quad (53)$$

Коэффициенты волнового фронта на краю зрачка $\rho=1$ имеют следующие значения:

D – коэффициент дефокусировки,

S_3 – коэффициент сферической aberrации 3-го порядка,

S_5 – коэффициент сферической aberrации 5-го порядка,

K – наклон сферы сравнения,

C_3 – коэффициент комы 3-го порядка,

C_5 – коэффициент комы 5-го порядка,

A – коэффициент астигматизма,

Φ_C, Φ_A – углы, указывающие направление комы, астигматизма относительно оси координат ($\varphi=0$).

Первая строчка в табл. 3 соответствует

Таблица 3.

Коэффициенты aberrаций для вычисления снижения КПМ

Аберрация	Относительная пространственная частота, ω								
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Отсутствует	0,8729	0,8097	0,7471	0,6850	0,6238	0,5636	0,5046	0,4470	0,3910
$(D + A \cos 2\Phi_A)^2$	0,5517	1,0215	1,4761	1,8492	2,1018	2,2179	2,1995	2,0626	1,8327
$2(D + A \cos 2\Phi_A) \cdot S_3$	0,6272	1,0834	1,4752	1,7620	1,9358	2,0045	1,9823	1,8837	1,7224
S_3^2	0,8000	1,2849	1,6395	1,8532	1,9499	1,9604	1,9108	1,8184	1,6918
$2(D + A \cos 2\Phi_A) \cdot S_5$	0,6089	0,9967	1,3047	1,5188	1,6459	1,6971	1,6831	1,6127	1,4941
$2S_3 \cdot S_5$	0,8279	1,2587	1,5411	1,6935	1,7512	1,7454	1,6971	1,6188	1,5165
S_5^2	0,8922	1,2831	1,5062	1,6088	1,6439	1,6625	1,7257	1,9176	2,3418
$K^2 \cdot \cos^2 \Phi_C$	0,6892	1,4385	2,3594	3,3805	4,4331	5,4516	6,3751	7,1472	7,7181
$2K \cdot C_3 \cos^2 \Phi_C$	0,5847	1,1308	1,7283	2,3245	2,8873	3,3989	3,8506	4,2374	4,5534
$C_3^2 \cos^2 \Phi_C$	0,7195	1,2590	1,7433	2,1308	2,4186	2,6241	2,7725	2,8878	2,9884
$C_3^2 \sin^2 \Phi_C$	0,0854	0,1517	0,2096	0,2499	0,2691	0,2677	0,2487	0,2169	0,1778
$(A \sin 2\Phi_A)^2$	0,6562	1,3292	2,1073	2,9052	3,6476	4,2706	4,7239	4,9724	4,9974

ЧКХ безабберационного объектива (см. формулу 52).

Рассмотрим конкретный пример использования формул Стила для оценки влияния градиента температуры по толщине сканирующего зеркала на снижение КПМ оптической системы (см. формулы 46). Положим, исходные данные имеют следующие значения:

$$d_o = 0,8 \text{ м}, \Delta t_h/h = 0,1 \text{ К/м}, \alpha_3 = 3 \cdot 10^{-6}, \nu = 0,2, \cos\phi = 0,5, \Phi_A = 0.$$

Тогда для длины волны света $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$ по формуле (46) вычисляем

$$D = 0,3\lambda \text{ и } A = 0,1\lambda. \text{ Для оптической системы с относительным отверстием } f'/d_o = 10 \text{ на пространственной частоте } N = 50 \text{ мм}^{-1}, \text{ соответствующей относительной пространственной частоте } \omega = 0,3, \text{ снижение КПМ составит } \Delta T(0,3) = (0,3+0,1)^2 \cdot 2,1018 = 0,336$$

Д.С. Волосовым [11] предложена приближенная формула, связывающая T (КПМ объектива на заданной пространственной частоте N) с диаметром o круглого диска, который есть изображение объективом светящейся точки:

$$o = \frac{2}{\pi N} \sqrt{2,5(1-T)} \quad (54)$$

Из (54) следует формула

$$T = 1 - 0,4 \left(\frac{4\pi}{\lambda} D\omega \right)^2 = 1 - 64 \left(\frac{D}{\lambda} \omega \right)^2 \quad (55)$$

где D – коэффициент дефокусировки, соответствующий диаметру o .

Сравнение результатов оценок по формуле (55) и формулам Стила показывает, что формула (54) слишком груба.

ЭО ИЗМЕНЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

ЭО термоаббераций I-го и II-го рода непосредственно характеризуют изменение фокусного расстояния и дисторсии.

Смещение $\Delta_{\nu T}$ проекции узловой точки на ФПУ появляется из-за разворота ФПУ относительно объектива, при наличии перепада температуры по диаметру корпуса $\Delta t/d_k$, соединяющего ФПУ и объектив.

$$\Delta_{\nu T} = \frac{L^2}{2} \alpha \frac{\Delta t}{d_k} \quad (56)$$

где L – длина корпуса СА от узловой точки до ФПУ,

α – коэффициент температурного расширения материала корпуса.

Заметим, что вместе со смещением узловой точки появляется разворот φ светочувствительной площадки ФПУ относительно плоскости наилучшего изображения

$$\varphi = \frac{L}{2} \alpha \frac{\Delta t}{d_k} \quad (57)$$

ЭО изменения фотограмметрических параметров в форме фотораграмметрических полиномов следует из дифференцирования формулы ортоскопической проекции

$$\delta\psi = \delta \left(\frac{l_i}{f'} \right) = \frac{\delta l_i}{f'} + \frac{l_i \delta f'}{(f')^2} \quad (58)$$

где f' – фокусное расстояние,

l_i – расстояние от проекции узловой точки до центра i -го пикселя,

$\delta(\cdot)$ – соответствующие малые изменения параметра, обусловленные тепловым режимом,

$\delta\psi$ – изменение углового положения визирного луча, исходящего из центра i -го пикселя.

ЭО ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Исходными данными для ЭО изменения относительной спектральной чувствительности, светосигнальной характеристики и отношения сигнал-шум (радиометрические характеристики СА) являются следующие факторы:

а) изменения спектрального пропускания покрытий и границ спектральных диапазонов интерференционных фильтров, изменения спектрального распределения дисперсионных устройств (для ГСА),

б) изменения чувствительности и шумов ФПУ,

в) термоабберации II-го рода, изменения взаимного положения ФПУ и системы оптико-механической, формирующей изображение.

Изменения радиометрических характеристик СА носят локальный характер и проявляются в форме так называемых «артефактов» – существенных локальных искажений видеоинформации, регистрируемой СА.

Факторы *a)* и *б)* непосредственно характеризуют артефакты, возникающие вследствие изменения теплового режима СА.

Приведем примеры. Смещение границы спектрального пропускания канала мультиспектральной аппаратуры проявляется в нарушении «баланса белого» в синтезированном изображении, т.е. искажению передачи спектральной яркости сигнала. Изменение шумов или изменение светосигнальной характеристики какой-либо матрицы ФПУ приводит к «полосатости» в изображении. «Полосы» формируются конкретными пикселями ФПУ, у которых изменились светосигнальная характеристика.

Напомним, что радиометрическая модель СА описывается простой линейной зависимостью (см. формулу (48), часть II)

$$DN_i = \bar{A} \cdot L + \bar{B} \quad (59)$$

где L – яркость на входе в СА,

DN_i – цифровой сигнал на каждом i -ом пикселе СА,

\bar{A} – чувствительность СА, $\bar{A} \sim \tau_{оптики} \cdot S_{ФПУ}$

\bar{B} – темновой сигнал СА.

Параметры \bar{A} и \bar{B} суть куммулянты по всем пикселям матрицы ФПУ. Значения чувствительности и темнового сигнала для каждого пикселя индивидуальны и содержатся в коэффициентах коррекции.

Рис. 8 иллюстрирует преобразование СА поля равномерной яркости.

На входе в СА поле яркости равномерное. После прохождения оптики за счет неравномерного коэффициента пропускания $\tau_{оптики}$ изображение на светочувствительной площадке ФПУ неравномерное по полю. Результирующий «сырой» сигнал равен произведению $\tau_{оптики}$ на $S_{ФПУ}$ (чувствительность ФПУ) плюс подставка темнового сигнала. На рис. 8 показана его существенная неоднородность, которая устраняется с помощью коэффициентов коррекции.

Экспертная оценка (ЭО) артефактов ΔDN_j по факторам *a)* и *б)* описывается простой формулой

$$\Delta DN_j = \left(\bar{A} + \Delta A_j \right) \cdot L + \left(\bar{B} + \Delta B_j \right) \quad (60)$$

где ΔA_j и ΔB_j – факторы *a)* и *б)*, действующие на j -ых пикселях.

ЭО влияния факторов *в)* на изменение радиометрических характеристик описывается формулами

$$\Delta DN_i = \left(\bar{A} + \Delta A_i \right) \cdot L + \left(\bar{B} + \Delta B_i \right) \quad (61)$$

$$\Delta A_i = A(x) - A(x + \delta)$$

$$\Delta B_i = B(x) - B(x + \delta)$$

где x – координата по полю, измеряемая номерами пикселей,

δ – величина смещения изображения относительно ФПУ, измеряемая в долях пикселя.

Артефакты ΔDN_i наиболее сильно проявляются в местах резкого изменения $\tau_{оптики}$ или $S_{ФПУ}$.

Поле яркости на входе в СА	Изображение на ФПУ	Чувствительность ФПУ	«Сырой» сигнал	Сигнал после коррекции
	>	E	E	

Рисунок 8

СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ СА

Описанные ранее тепловые, механические и оптические ЭО могут объединяться в сквозные цепочки, что позволяет проводить упрощенные расчеты (также назовем их «экспресс-оценки») термостабильности СА.

Предлагается установить общие правила ЭО термостабильности СА, которые заключаются в следующем.

Правило 1. Принимаются два тестовых тепловых воздействия (см. В,Д рисунок 1):

единичный скачок температуры,

гармоническое изменение температуры окружающей среды,

для которых составляется сквозная модель ЭО снижения выходных параметров СА.

Правило 2. Снижение выходных параметров выражается в относительных величинах.

Предлагаемый подход оценки термостабильности позволяет:

- в рамках единой модели учитывать все физические механизмы (тепловые, механические, оптические) влияния условий теплообмена на выходные характеристики СА,

- количественно сравнивать термостабильность СА в пределах одного класса,

- применять готовые схемотехнические и конструкторские решения по обеспечению термостабильности при разработке новой СА.

Для оценки влияния скачка температуры окружающей среды t_c на тепловой режим СА используем двух узловую тепловую схему (рис. 2).

Решение системы уравнений (10) получим [7] при начальных условиях $t_1(0) = t_2(0) = 0$.

$$t_1 = t_2 + \frac{m_o}{m_2 - m_1} [e^{-m_1\tau} - e^{-m_2\tau}]$$

$$t_2 = 1 - \frac{m_2}{m_2 - m_1} e^{-m_1\tau} + \frac{m_1}{m_2 - m_1} e^{-m_2\tau} \quad (62)$$

$$m_o = \frac{1}{C_1 R_{1o}} \quad ; \quad m_{1,2} = 0,5(a \pm \sqrt{a^2 - 4b})$$

$$a = \frac{1}{C_2 R_{12}} + \frac{1}{C_1 R_{1o}} + \frac{1}{C_1 R_{12}} \quad ; \quad b = \frac{1}{C_1 R_{1o} C_2 R_{12}}$$

На рис. 9 приведена зависимость разности температур $t_1 - t_2$, рассчитанная по формулам (61). Предполагается, что СА выполнена в форме цилиндра диаметром 300 мм, длиной 1000 мм, корпус из титанового сплава имеет массу 25 кг, внутри которого расположен стеклянный объектив массой 75 кг, тепловые сопротивления между средой и корпусом $R_{1o} = 0,1$ К/Вт, между корпусом и среднеобъемной температурой линз $R_{12} = 0,1$ К/Вт.



Рисунок 9.

Изменение температуры t_2 и изменение разности температур $t_1 - t_2$ во времени от единичного скачка температуры окружающей среды

В рассматриваемом примере температура t_2 – среднеобъемная температура объектива, а разность температур $t_1 - t_2$ характеризует радиальный перепад температуры по линзам. Изменения номиналов температур корпуса СА t_1 и объектива t_2 вызывают термодетектирование – $\Delta s'_n(\tau)$, которая может быть рассчитана по формуле (43). Радиальный градиент температуры по линзам вызовет термодетектирование – $\Delta s'_z(\tau)$, которая может быть оценена по формуле (44). Сумма $\Delta s'_z(\tau) + \Delta s'_n(\tau) = \Delta s'_{дин}(\tau)$ характеризует **динамическую терморасстраиваемость СА**.

На рис. 10 для рассматриваемого примера изображена кривая динамической терморасстраиваемости $\Delta s'_{дин}(\tau)$.

Из рис. 9 и 10 видно, что в рассматриваемом примере через шесть часов после скачка температуры среды температурное поле СА практически выровняется, градиентная термодетектирование $\Delta s'_z$ исчезнет, останется лишь $\Delta s'_n = \Delta s'_{ст}$, которая характеризует **статическую терморасстраиваемость СА**.

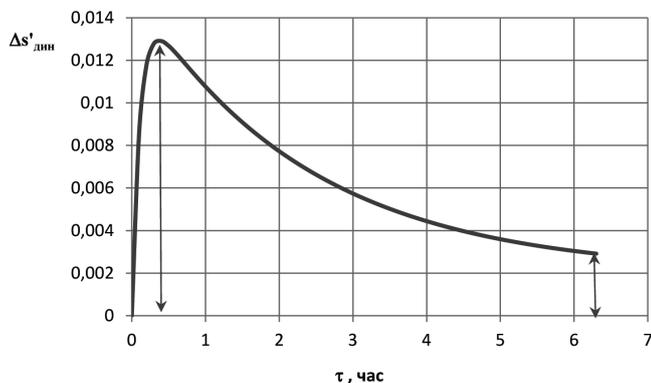


Рисунок 10.
Кривая динамической терморасстраиваемости

Кривая динамической терморасстраиваемости имеет характерные параметры:

- величина максимальной термодефокусировки $\Delta s'_{дин max}(\tau_m)$,
- время τ_m достижения $\Delta s'_{дин max}(\tau_m)$,
- время выравнивания температурного поля τ_n , т.е. время, начиная с которого в СА остается только статическая термодефокусировка,
- величина статической термодефокусировки $\Delta s'_{ст}$.

Отметим, что форма кривой динамической терморасстраиваемости характерна не только для термодефокусировки, но также и для других выходных параметров (снижения КПМ, фотограмметрических и радиометрических) СА и ее составных частей.

Аналогично для оценки терморасстраиваемости СА (или составных частей СА) под действием гармонического изменения температуры окружающей среды может использоваться двух узловая тепловая схема (рис. 2), формулы (10, 11) и соответствующие конкретной задаче механические и оптические ЭО, т.е. составляется сквозная модель ЭО снижения выходного параметра СА. В результате получаем зависимость изменения выходного параметра от периода колебаний температуры среды, график которой аналогичен рис. 3.

Обобщенные модели и ЭО терморасстраиваемости СА удобно и наглядно строить и анализировать, используя метод структурных схем [18]. На рис. 11 изображена струк-

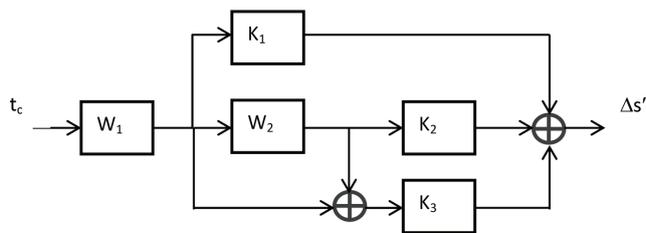


Рисунок 11.
Структурная схема ЭО термодефокусировки СА

турная схема, построенная на основе двухузловой тепловой схемы (рис. 2) и ЭО термодефокусировки.

На рис. 11 приняты следующие обозначения:

W_1 – передаточная функция аperiodического звена 1-го порядка, связывающая температуру среды t_c с температурой t_1 тела 1

$$W_1 = \frac{1}{1 + T_1 p} \quad T_1 = C_1 R_{c1}$$

W_2 – передаточная функция аperiodического звена 1-го порядка, связывающая температуру t_1 тела 1 с температурой t_2 тела 2

$$W_2 = \frac{1}{1 + T_2 p} \quad T_2 = C_2 R_{12}$$

K_1 – передаточная функция безынерционного звена, связывающая температуру t_1 тела 1 (например корпуса СА) с соответствующей дефокусировкой;

K_2 – передаточная функция безынерционного звена, связывающая температуру t_2 тела 2 (например объектива) с соответствующей дефокусировкой;

K_3 – передаточная функция безынерционного звена, связывающая разность температур $t_1 - t_2$ (радиальный перепад температуры по линзам объектива) с соответствующей дефокусировкой;

$p = d/d\tau$ – алгебраизированный оператор дифференцирования.

На рис. 12 приведена эквивалентная схема, построенная по правилам преобразования структурных схем.

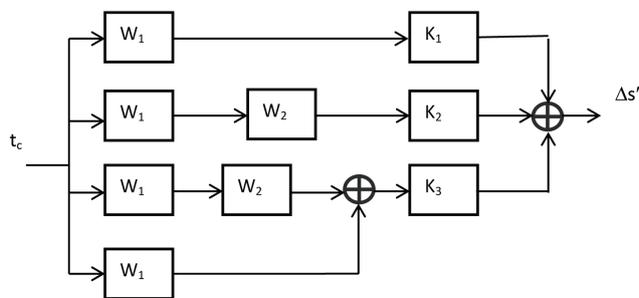


Рисунок 12.

Эквивалентная структурная схема ЭО термодифокусировки СА

Эквивалентная схема позволяет легко записать частотную передаточную функцию ЭО термодифокусировки

$$W(j\omega) = \frac{K_1}{1 + T_1 j\omega} + \frac{K_2}{(1 + T_1 j\omega)(1 + T_2 j\omega)} + \frac{K_3}{(1 + T_1 j\omega)(1 + T_2 j\omega)} - \frac{K_3}{1 + T_1 j\omega} \quad (63)$$

и далее использовать все инструменты теории систем автоматического регулирования.

Очевидно, что понятие терморасстраиваемости обратно понятию термостабильности и является ее «негативной» характеристикой. Исходя из этого соображения, будем также различать **динамическую и статическую термостабильность СА** (или составной части СА).

Предложим количественную оценку термостабильности. Будем измерять термостабильность по шкале **[0,1]**. Единица соответствует совершенно термонерасстраиваемой СА. Нуль – терморасстраиваемость СА превышает предельно допустимое значение. Как уже указывалось, в качестве параметра терморасстраиваемости СА и ее составных частей может выступать термодифокусировка, другие волновые aberrации или выходные параметры (в том числе снижение КПМ, фотометрические, радиометрические).

С учетом принятой шкалы показатель термостабильности S_i по выходному параметру p_{ij} для j -ой СА рассчитывается следующим образом:

$$S_i = \frac{\Delta p_{ij\text{дон}} - \Delta p_{ij}}{\Delta p_{ij\text{дон}} + \Delta p_{ij}} \quad \text{Если } \Delta p_{ij} \geq \Delta p_{ij\text{дон}}, \text{ то } S_i = 0 \quad (64)$$

где $\Delta p_{ij\text{дон}}$ – граница допустимого изменения параметра p_{ij} для j -ой СА,

Δp_{ij} – фактическая оценка изменения параметра p_{ij} для j -ой СА.

Предложенная шкала позволяет сравнивать для различных СА термостабильность различных выходных параметров СА и тем самым судить об их относительной термостабильности.

Список литературы:

- ГОСТ РВ 15.203-2001. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ. Основные положения.
- old.beepitron.com>Oofelie::Multiphysics
- http://sigmadyne.com/sigfit-software/
- Кобранов Г.П. и др. Внешний теплообмен космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1972.
- Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
- Гордов А.Н. и др. Точность контактных методов измерения температуры. – М.: Изд. стандартов, 1976.
- Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы радиоэлектронной аппаратуры. – Л.: Энергия, 1971.
- Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров – М.: Атомиздат, 1979.
- Коваленко А.Д. Термоупругость. Учебное пособие. – К.: Вища школа, 1975.
- Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975.
- Волосов Д.С. Фотографическая оптика. – М.: Искусство, 1971.
- Шрамко Ю.П. Влияние теплового режима иллюминатора на деформацию фронта волны. // ОМП, 1972, № 3, с.14-17.
- Абдусаматов Х.И., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Методы обеспечения термостабильности космического телескопа солнечного лимбографа. – СПб, Изд-во Политехнического университета, 2008.
- Максумов Д.Д. Анаберационные отражающие поверхности и системы и новые способы их испытания. – М.: ГТТИ, Труды ГОИ, том VIII, вып.86, 1936.
- О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику. – М.: Мир, 1965.
- Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. – М.: Мир, 1964.
- Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969.
- Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975.

ФОТОРЕЗИСТОРЫ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ И ДАТЧИКОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР CdHgTe ДЛЯ ОБЛАСТИ СПЕКТРА 8-12 мкм

ФИЛАТОВ А.В., КАРПОВ В.В., СУСОВ Е.В., КУЗНЕЦОВ Н.С., ПЕТРЕНКО В.И.

Открытое акционерное общество «Швабе – Фотосистемы»

E-mail: info@shvabe-fs.ru

В работе обобщены результаты разработки и промышленного производства фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ на спектральный диапазон 8-12 мкм для инфракрасной техники. Описана конструкция и приведены основные фотоэлектрические параметры охлаждаемых до криогенных температур фоторезисторов. Проведена оценка надежности фоторезисторов с различным количеством фоточувствительных площадок.

Ключевые слова: гетероэпитаксиальные структуры CdHgTe, фоторезисторы, код Грея, надежность.

ВВЕДЕНИЕ

Качество современной инфракрасной техники определяется в большой степени наличием тепловизионных средств ночного видения на основе фотоприемников инфракрасного излучения. Фоторезисторы (ФР) из твердого раствора теллурида кадмия-ртути $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) обладают высокой чувствительностью к инфракрасному излучению тел в окне прозрачности атмосферы 8-12 мкм. В зависимости от мольной доли теллурида кадмия максимум чувствительности в этом спектральном диапазоне КРТ обеспечивается при различных температурах. Это связано с зависимостью ширины запрещенной зоны КРТ от состава и температуры. Из многочисленных исследований зависимости ширины запрещенной зоны (E_g) от температуры и состава КРТ чаще других используется эмпирическая зависимость, полученная Хансенем [1]:

$$E_g = -0.302 + 1.93x - 0.81x^2 + 0.832x^3 + 5.35 \cdot 10^{-4} (1 - 2x) \cdot T \quad (1)$$

На рис. 1 приведены зависимости длинноволновой границы фотопроводимости для $Cd_xHg_{1-x}Te$ от мольной доли CdTe в соответствии с выражением (1) без учета влияния толщины фоторезистора для трех практически важных температур эксплуатации фотоприемников: комнатная температура (~300К); температура (~230К), достигаемая с помощью термоэлектрической системы охлаждения (ТЭО) и температура (~80К), получаемая с помощью дроссельной системы Джоуля –Томсона или газовой микрокриогенной машины Стирлинга.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы было создание многоэлементных фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур КРТ, удовлетворяющих требованиям эксплуатации тепловизионной инфракрасной техники:

- с криогенными (~80К) системами охлаждения фоточувствительных элементов (ФЧЭ) в топологии 2x16 и 2x32 с размерами площадок 0,05x0,05мм и 0,035x0,035мм с $\lambda_{max}=10-11,5$, работающих в диапазоне температур окружающей среды $-60...+60^{\circ}C$;

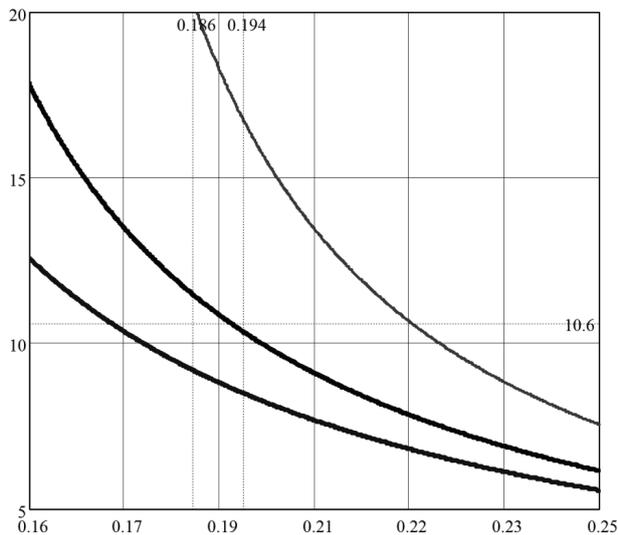


Рисунок 1.

Зависимость длинноволновой границы фотопроводимости от мольной доли CdTe для КРТ при температуре ФЧЭ 80, 230 и 300К

- с термоэлектрическим охлаждением (~230К) ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея для регистрации импульсного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм, работающих в диапазоне температур окружающей среды $-50...+55^{\circ}\text{C}$.

Наиболее сложной и дорогостоящей частью ФР является охлаждаемый до криогенных температур фоточувствительный элемент фоторезистора (ФЧЭ). ФЧЭ изготавливались из образцов ГЭС КРТ МЛЭ электронного типа проводимости производства ИФП СО РАН [2], имеющих состав $x=0,210-0,217$ для работы при температуре ФЧЭ ~80К и состав $x=0,186-0,192$ для работы при температуре ФЧЭ ~230К. Параметры образцов и технология изготовления ФЧЭ из них приведены в работах [3-7].

ФОТОРЕЗИСТОРЫ, ОХЛАЖДАЕМЫЕ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ ~80К

Основные узлы конструкции фоторезистора приведены на рис. 2. Наконечник (5) держателя (1), предназначенный для крепления фоточувствительного элемента (2), выполнен из материала с заданным коэффициентом линейного расширения согласованным с подложкой ФЧЭ и соединен с трубкой держате-

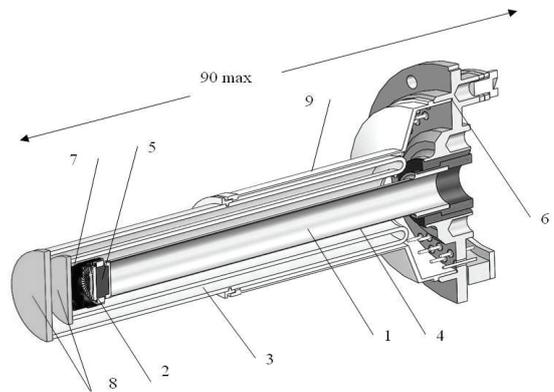


Рисунок 2.

Конструкция многоэлементных фоторезисторов, охлаждаемых до температуры ~80К: 1 – держатель; 2- ФЧЭ; 3 - сосуда Дьюара; 4 - трубка держателя; 5 - наконечник держателя; 6 - металлостеклянный цоколь; 7 - охлаждаемая диафрагма; 8 – входные окна из германия; 9 - корпус

ля (4) лазерной сваркой. На «теплом» конце держателя расположен металлостеклянный цоколь (6), соединенный с трубкой держателя (4) электроннолучевой сваркой. Конструкция цоколя позволяет стыковать фоторезистор, как с дроссельной системой охлаждения, так и с МКС. Напряжение смещения площадок ФЧЭ подается через гермовыводы цоколя с помощью полиимидного кабеля, припеченного к трубке держателя (4). Для обеспечения заданного угла поля зрения фотоприемника и ограничения фонового излучения на наконечнике (5) установлена охлаждаемая диафрагма (7) с поглощающим ИК-излучение покрытием на внутренней поверхности. Для повышения эффективности диафрагма оснащена дополнительной перегородкой по пути хода лучей. Держатель (1) из тонкостенной трубки титанового сплава с низкой теплопроводностью и двустенным теплоизолирующим сосудом Дьюара (3) установлен в корпусе (9), предохраняющем фоторезистор от механических повреждений. Отражение излучения от поверхности германиевых входных окон (9) приводит к снижению внешней квантовой эффективности ФЧЭ и потерям чувствительности фоторезистора. Ионно-термическая технология нанесения просветляющих покрытий из ZnS на входные

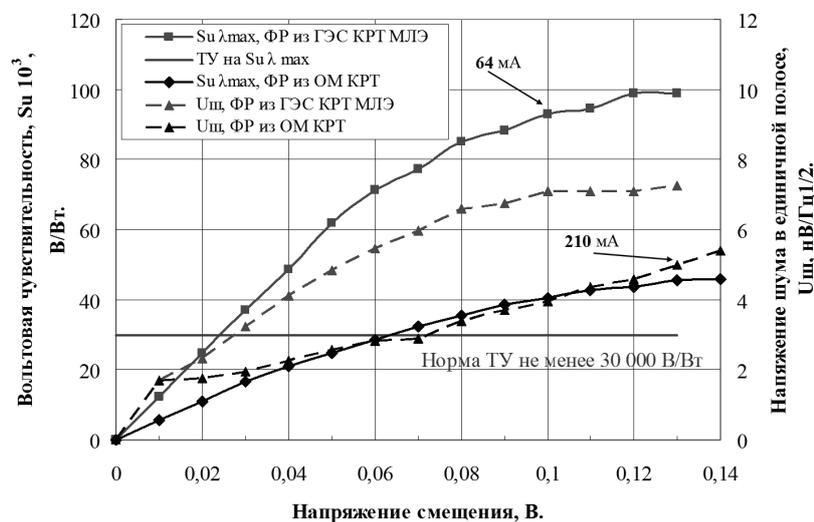


Рисунок 3.

Типичные зависимости вольтовой чувствительности и напряжения шума в единичной полосе от напряжения смещения при нагрузке 1000 Ом для фоторезисторов ($S=0,05 \times 0,05$ мм), изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ и ОМ КРТ

окна из германия позволило достигнуть 98% пропускания излучения в диапазоне 10-12 мкм. На подложке контактного растра с ФЧЭ (2) размещен датчик температуры, позволяющий управлять включением напряжения смещения на фоточувствительный элемент при охлаждении до рабочей температуры. Полость фоторезистора заполнена осушенным азотом. Разработанная конструкция фоторезистора обеспечивает теплопритоки не более 0,5 Вт (без учета температуры отходящих паров). Использование теплоизолирующего материала ТЗМК-10, расположенного между внутренней стенкой сосуда Дьюара и полиимидном кабелем на внешней стенке держателя, позволяет за счет снижения конвекционных потоков азота снизить величину теплопритоков до 0,3 Вт.

На рис. 3 приведены типичные зависимости вольтовой чувствительности и напряжения шума в единичной полосе от напряжения смещения при нагрузке 1000 Ом для серийных фоторезисторов (размер фоточувствительной площадки 50×50 мкм), изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ и из объемного материала КРТ [7]. В приведенных на рис. 3 диапазонах напряжений смещения обеспечивается требование к ним по уровню величины удельной обнаружительной способности

не менее $4 \cdot 10^{10}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹, а для серийных фоторезисторов с размером фоточувствительной площадки 35×35 мкм не менее $5 \cdot 10^{10}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹.

Как видно из сравнения данных, приведенных на рис. 3, использование разработанной технологии фоторезисторов на основе ГЭС КРТ МЛЭ позволяет повысить вольтовую чувствительность до $\approx 8 \cdot 10^4$ В/Вт и снизить требования к напряжению шума микросборок предусилителей до ≈ 6 нВ Гц^{-1/2} при рабочих напряжениях смещения более 0,1В или обеспечить выполнение требования технических условий (ТУ) по минимальной величине вольтовой чувствительности при меньших напряжениях смещения, т.е. при пониженном суммарном токе потребления.

Это достигнуто за счет реализации практически нулевой скорости рекомбинации носителей на границах раздела рабочий слой КРТ – варизонные слои КРТ в ГЭС КРТ МЛЭ, оптимальной толщины рабочего слоя КРТ и отсутствия клеевого соединения: рабочий слой КРТ – подложка необходимого в случае применения объемных монокристаллов КРТ.

В табл. 1 приведены средние значения параметров фоторезисторов с размером фоточувствительной площадки 50×50 мкм, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ и объем-

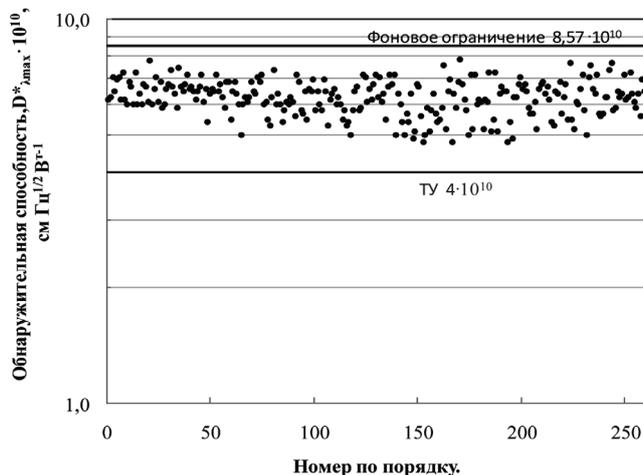


Рисунок 4.

Распределение величины удельной обнаружительной способности по 260 фоторезисторам с размером фоточувствительной площадки 50×50 мкм

ных монокристаллов КРТ (ОМ КРТ), а на рис. 4 представлено распределение величины удельной обнаружительной способности по 260 фоторезисторам из ГЭС КРТ МЛЭ.

Среднее значение удельной обнаружительной способности фоторезисторов из ГЭС КРТ МЛЭ на 26,7% ниже величины удельной обнаружительной способности, ограниченной фоновым излучением ($8,57 \cdot 10^{10}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹) для данного плоского угла зрения приемника (не менее 42 град). На рис. 5 приведена фотография двух фоторезисторов с количеством элементов 32 и 64, держатель которых состыкован с микротеплообменниками для подключения к дроссельной системе охлаждения и с входных окон которых сняты защитные колпачки. Фоторезисторы выпускаются по техническим условиям: Фотоприемники модульные многоэлементные ТУ 6349-001-07539943-97.

Таблица 1.

Средние значения параметров фоторезисторов с размером фоточувствительной площадки 50×50 мкм, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ и ОМ КРТ

Параметр	$D^*(\lambda_{max}, 1200, 1)$, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	$Su(\lambda_{max})$, В · Вт ⁻¹	R_t , Ом	I_{cm} , мА
ГЭС КРТ МЛЭ	$6,28 \cdot 10^{10}$	$4,54 \cdot 10^4$	47,3	1,65
ОМ КРТ	$6,10 \cdot 10^{10}$	$4,95 \cdot 10^4$	25,7	3,98



Рисунок 5.

Фотография двух фоторезисторов с количеством элементов 32 и 64 для тепловизионной техники, работающей в диапазоне температур окружающей среды $-60 \dots +60^\circ\text{C}$

ФОТОРЕЗИСТОРЫ, ОХЛАЖДАЕМЫЕ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ $\sim 230\text{K}$

На рис. 6 представлена принципиальная схема конструкции фоторезистора, обеспечивающая работу ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея из ГЭС КРТ МЛЭ для регистрации импульсного лазерного излучения в спектральном диапазоне 2-11 мкм. Охлаждение ФЧЭ (1) осуществлялось двухкаскадным термоэлектрическим охладителем (2) марки 2МС-081-15 отечественной фирмы ООО «РМТ», г. Москва. Выбранный термоэлектрический охладитель (ТЭО) соответствует двум основным условиям: имеет рабочую температуру ФЧЭ $\sim 230\text{K}$ (рис. 1) при температуре окружающей среды 55°C и размеры

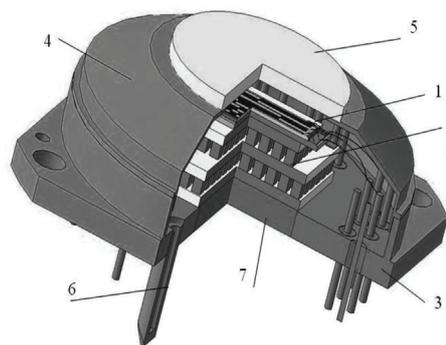


Рисунок 6.

Конструкции фоторезистора, охлаждаемого до температуры $\sim 230\text{K}$, с ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея: 1—ФЧЭ, 2—ТЭО, 3—корпус, 4—колпак, 5—входное окно, 6—штенгель, 7— вставка из сплава меди с молибденом

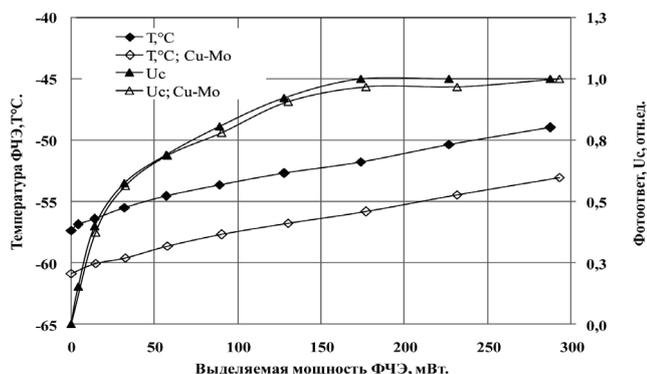


Рисунок 7.

Зависимость сигнала фототовета на длине волны 10,6 мкм и температуры ФЧЭ от выделяемой мощности ФЧЭ при постоянной мощности ТЭО ($\approx 9,8$ Вт) для фотоприемника из ковара и с вставкой из Си-Мо

охлаждающей поверхности, которые соответствуют размерам ФЧЭ ($\sim 9 \times 12$ мм).

ТЭО 2МС-081-15 обеспечивает в вакууме максимальный перепад температуры $\Delta T_{max} = 95,0 \pm 2,0$ К и максимальную холодопроизводительность $Q_{max} = 5,7 \pm 0,29$ Вт при потребляемой мощности не более 15 Вт. ТЭО смонтирован в корпус (3) из ковара с изолированными электрическими выводами. Фоторезистор герметично изолирован от внешней среды колпачком из никелированного ковара (4) с входным окном из просветлённого сульфидом цинка германия (5). Полость фоторезистора вакуумирована через медный штенгель (6) и заполнена ксеноном.

Для улучшения отвода тепла от горячей поверхности ТЭО к радиатору в днище корпуса впаяна вставка (7) из сплава меди с молибденом [8], имеющая теплопроводность почти в пять раз выше по сравнению с коваром.

Для контроля температуры ФЧЭ использовались миниатюрные калиброванные бескорпусные датчики температуры на основе кремниевого р-п перехода с температурным коэффициентом $\approx 2,13$ мВ/град.

На рис. 7 приведены типичные зависимости температуры и величины сигнала фототовета ФЧЭ в относительных единицах на длине волны 10,6 мкм от выделяемой ФЧЭ мощности при постоянной мощности ТЭО (9,8 Вт). В собственном полупроводнике распределение неосновных носителей заряда определяется амбиполярным коэффициентом

диффузии. В нашем случае диффузионная длина дырок существенно меньше длины чувствительной площадки любого разряда, а величина сигнала фототовета прямо пропорциональна напряжению смещения.

Наблюдаемое насыщение сигнала фототовета (рис. 7) при увеличении выделяемой мощности более $\approx 0,17$ Вт на всех разрядах ($\approx 4,2$ В на каждом элементе) связано только с увеличением температуры ФЧЭ.

Таким образом, ФЧЭ работает в условиях ограничения выделяемой мощностью. На рис. 7 продемонстрировано понижение рабочей температуры ФЧЭ за счет улучшения отвода тепла из горячей зоны ТЭО с помощью медно-молибденовой вставки в днище корпуса.

Исследование зависимости фототовета от облученности в диапазоне $1 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-3}$ Вт см² на длине волны 10,6 мкм для ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ состава от 0,183 до 0,193 мольных долей CdTe, показало, что зависимость чувствительности от облученности для исследованных составов ГЭС КРТ МЛЭ идентична. Линейный рост чувствительности с увеличением облученности наблюдается до $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ Вт см².

На рис. 8 приведена зависимость отношения сигнал/шум фотоприемников в разном конструктивном исполнении от состава рабочего слоя эпитаксиальной структуры толщиной 8,2-9 мкм. Результаты получены для 1-го разряда ФЧЭ при облученности 10^{-7} Дж см⁻² на длине волны 10,6 мкм в шумовой полосе $\Delta f = 1$ Гц.

Для сопоставления уровня достигнутых параметров фоторезисторов с кодом Грея с фоторезисторами классического дизайна был выполнен расчет обнаружительной способности для освещаемой лазерным излучением 10,6 мкм (полуширина импульса излучения 75 нс) площадки площадью $0,5 \times 0,3$ мм при суммарной длине линейки равной 6 мм. При расчете использовались величины отношения сигнал/шум, приведенные на рис. 8. Вклад теплового шума балластного сопротивления неосвещаемой части линейки учитывался поправочным коэффициентом равным $(6/0,3)^{1/2}$. Величина сиг-

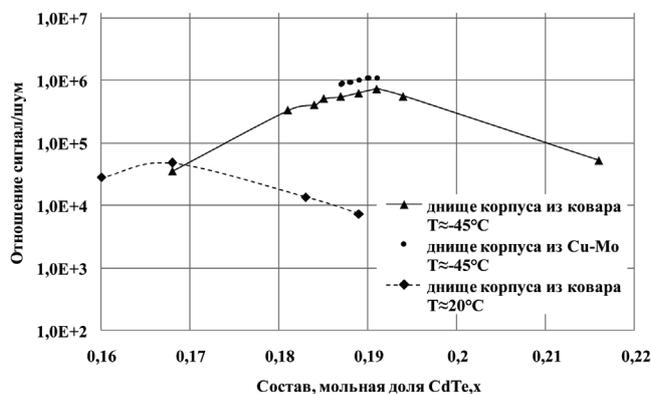


Рисунок 8.

Зависимость отношения сигнал/шум при облученности 10^7 Дж см⁻² на длине волны 10,6 мкм в шумовой полосе $\Delta f = 1$ Гц от состава ГЭС КРТ МЛЭ при температуре ФЧЭ 20°C и -45°C

нала приводилась к току смещения равному 20мА/мм. Для данной величины отношения тока смещения к линейному размеру площадки известны значения обнаружительной способности одноэлементных фоторезисторов на длине волны 10,6 мкм при рабочих температурах $\sim 300\text{K}$ и $\sim 230\text{K}$ (фоторезисторы РС-10.6 и РС-2ТЕ-10.6 фирмы VIGO System S.A. (Польша)) [9].

Приведенные в табл. 2 результаты расчета, показывают, что параметры фоторезисторов с кодом Грея из ГЭС КРТ МЛЭ соответствуют современному уровню фоторезисторов.

На рис. 9 приведена фотография фоторезистора для рабочей температуры $\sim 230\text{K}$ с ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея с двухкаскадным термоэлектрическим охлаждением для регистрации импульсного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм в диапазоне температур окружающей среды $-50\dots+55^\circ\text{C}$. Характеристики фоторезисторов приведены в технических условиях: Фотоприемник многоэлементный ТУ 6349-022-07539943-2014.

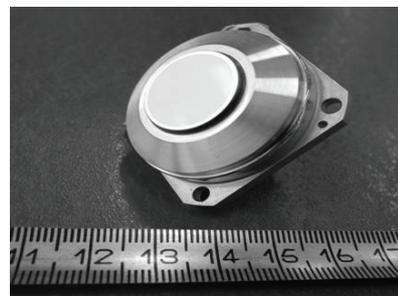


Рисунок 9.

Фотография фоторезистора с ФЧЭ охлаждаемым ТЭО до $\sim 230\text{K}$ для регистрации импульсного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм в диапазоне температур окружающей среды $-50\dots+55^\circ\text{C}$

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ФОТОРЕЗИСТОРОВ ИЗ ГЭС КРТ МЛЭ

Оценка надежности фоторезисторов выполнялась по гамма-процентной наработке до отказа (T_γ) в соответствии с выражением:

$$T_\gamma = -\ln(\gamma/100)/\lambda, \quad (2)$$

где γ – значение гамма, %; λ – значение интенсивности отказов, 1/ч. В процессе эксплуатации и хранения фоторезисторов отказов ФЧЭ не было зафиксировано. К началу написания статьи суммарная наработка (время хранения и эксплуатации у заказчика) составило $\approx 7,23 \cdot 10^8$ элементо-часов ($\lambda = 1,38 \cdot 10^{-9}$ 1/ч) для фоторезисторов из ГЭС КРТ МЛЭ в топологии 2x16 и 2x32 с размерами площадок 0,05x0,05мм и 0,035x0,035мм. В топологии пятиразрядного кода Грея $\approx 4,0 \cdot 10^7$ элементо-часов ($\lambda = 2,5 \cdot 10^{-8}$ 1/ч). На рис. 10 приведены зависимости времени наработки на отказ фотоприемников, работающих при охлаждении $\sim 80\text{K}$, в топологии ФЧЭ 2x16 и 2x32 с размерами площадок 0,05x0,05мм и 0,035x0,035 мм. Как видно из рис. 10, для фоторезисторов с ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ обеспечивается время наработки на отказ не

Таблица 2.

Обнаружительная способность фоторезисторов при $\sim 300\text{K}$ и $\sim 230\text{K}$

Тип приемника	D*(10,6 мкм, 20 кГц, 1)	Рабочая температура	Примечание
Фоторезисторы фирмы VIGO System S.A.(Poland)	$\geq 9 \cdot 10^6$	$\sim 300\text{K}$	РС-10.6
	$\geq 1,4 \cdot 10^8$	$\sim 230\text{K}$	РС-2ТЕ-10.6
Фоторезисторы с кодом Грея (данная работа)	$\geq 1 \cdot 10^7$	$\sim 300\text{K}$	расчетные значения
	$\geq 2 \cdot 10^8$	$\sim 230\text{K}$	

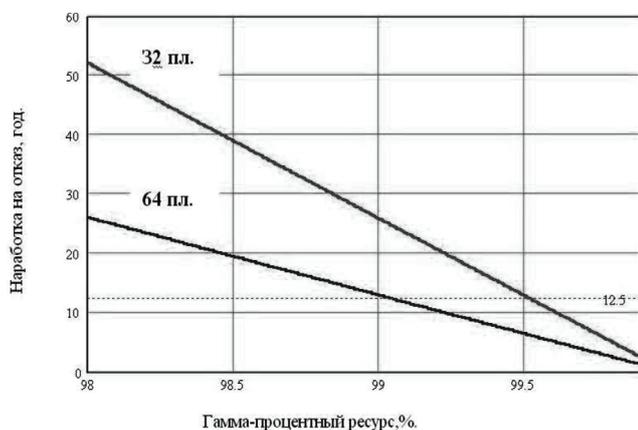


Рисунок 10.

Зависимость времени наработки на отказ фотоприемников, работающих при $\approx 80\text{K}$, от величины гамма-процентного ресурса с количеством площадок 32 и 64

менее 12,5 лет при $\gamma > 99\%$. Аналогичная зависимость получена для фотоприемников, работающих при охлаждении $\sim 230\text{K}$, с ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея с двухкаскадным термоэлектрическим охлаждением (при этом $\gamma > 91,5\%$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в РФ разработаны и освоены в производстве фоторезисторы из отечественных гетероэпитаксиальных структур CdHgTe на спектральный диапазон 8-12 мкм с количеством элементов от 2×16 до 2×32 и размером фоточувствительной площадки 35×35 мкм и 50×50 мкм работающие при $\sim 80\text{K}$ и с ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея с двухкаскадным термоэлектрическим охлаждением ФЧЭ до $\sim 230\text{K}$. Серийно выпускаемые с 2009г. фоторезисторы из гетероэпитаксиальных структур КРТ имеют высокую чувствительностью, надежность и сохраняемость параметров. Созданные фоторезисторы из гетероэпитаксиальных структур КРТ не имеют отечественных аналогов и по своим параметрам находятся на уровне лучших зарубежных образцов.

Авторы признательны сотрудникам ИФП СО РАН Ю.Г. Сидорову, С.А. Дворецкому, Н.Н. Михайлову и В.С. Варавину за разработку и исследования эпитаксиальных структур для фоторезисторов.

Список литературы:

1. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // J.Appl.Phys. 1982.V.53, P.7099-7101.
2. Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Liberman V.L., Mikhailov N.N., Sidorov Yu.G. Molecular beam epitaxy of high quality $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ films with control of the composition distribution // J.Cryst. Growth. 1996.V.159, P.1161-1166.
3. Гиндин П.Д., Карнов В.В., Филатов А.В., Сусов Е.В., Петренко В.И., Никифоров А.Ю., Кузнецов Н.С., Грибанов А.А. Фоторезистор с кодом Грея из гетероэпитаксиальных структур КРТ для регистрации импульсного излучения CO_2 лазера. // XXIII Международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 28-30 мая 2014, Москва, Россия. Труды конференции, С. 538-542.
4. Филатов А.В., Гиндин П.Д., Карнов В.В., Кузнецов Н.С., Сусов Е.В. Многоэлементный кодовый приемник // Патент на полезную модель РФ № 140458 U1 по заявке 2014107447/28 с приоритетом от 27.02.2014.
5. Филатов А.В., Сусов Е.В., Гусаров А.В., Акимова Н.М., Крапухин В.В., Карнов В.В., Шаевич В.И. Долговременная стабильность фоторезисторов спектрального диапазона 8-12 мкм, изготовленных из гетероэпитаксиальных структур CdHgTe, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Оптический журнал. 2009.Т.76, №12.С.49-54.
6. Филатов А.В., Карнов В.В., Сусов Е.В., Грибанов А.А., Кузнецов Н.С., Петренко В.И. Фоторезисторы с кодом Грея из гетероэпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на спектральный диапазон 2-11 мкм с термоэлектрическим охлаждением // Успехи прикладной физики. 2015.Т.3, № 2. С.190-195.
7. Филатов А.В., Сусов Е.В., Акимова Н.М., Карнов В.В., Шаевич В.И. Высокостабильные фоторезисторы диапазона 8-12 мкм из ГЭС КРТ МЛЭ // Успехи прикладной физики. 2015.Т.3, № 2, С.196-201.
8. Филатов А.В., Кузнецов Н.С., Гиндин П.Д., Карнов В.В., Козырев М.Е., Петренко В.И. Приемник излучения с термоэлектрическим охлаждением // Патент на полезную модель РФ № 153455 U1 по заявке на полезную модель. № 2015108166/28 с приоритетом от 11.03.2015.
9. Infrared detectors and related electronic devices. Catalogue VIGO System S.A. www.vigo.com.pl, 2015.

РАЗРАБОТКА МИКРОКРИОГЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

КАРПОВ В.В., КОЗЫРЕВ М.Е., КУЗНЕЦОВ Н.С., ИЛЬИН А.С., МАРУЩЕНКО А.В.,
НИКОЛОГОРСКИЙ С.В.

Открытое акционерное общество «Швабе – Фотосистемы»

E-mail: info@shvabe-fs.ru

В докладе анализируются основные причины отставания в области разработки отечественных МКС для охлаждаемых ФПУ, работающих в различных спектральных диапазонах (3 – 5 мкм и 8 – 12 мкм). Приводятся результаты разработки микрокриогенных систем «Сапфир-МКС» и «МКС-ШФС», которые по техническим характеристикам не уступают своим аналогам МКС К508 и К548 фирмы Ricor (Израиль).

Ключевые слова: фотоприемное устройство, микрокриогенная система, газовая криогенная машина, температура криостатирования, холодопроизводительность.

Для охлаждения и температурной стабилизации фотоприемных устройств (ФПУ) инфракрасного диапазона используют различные микрокриогенные системы (МКС), среди которых наибольшее применение нашли газовые криогенные машины на основе различных термодинамических циклов (Стирлинга, Вюлемье, Гиффорда - МакМагона). ГКМ включает в себя компрессор, микротеплообменник (МТО) и блок управления. Наибольшее распространение получили машины Стирлинга, они имеют наивысший КПД и наиболее компактны.

Конструктивно ГКМ может выполняться как по интегральной схеме (МТО находится на теле компрессора), так и по отдельной схеме, так называемой схеме Сплит-Стирлинг (МТО вынесен отдельно и соединен с компрессором трубопроводом длиной 250-300 мм), которая позволяет изменять расположение МТО в пространстве, а, следовательно, и ФПУ относительно компрессора.

За последние пятнадцать лет в ОАО «Швабе-Фотосистемы» (бывший «МЗ «Сапфир») разработаны ФПУ с линейками или матрицами чувствительных элементов различно-

го типа (на основе германия, легированного ртутью, КРТ или антимонида индия). Среди них такие, как «Орбита-Г», УМФП-И, «Омела-В», «Феникс», «Факел», «Атолл», «Малахит», «Байкал», «Байкал-М», «Айва» и др. Все эти ФПУ комплектовались микрокриогенными системами типа МСМГ (МСМГ-5А-1,3/80, МСМГ-3В-1/80 и др.) производства ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск).

Однако опыт работы с отечественными МКС показал, что эти криогенные машины обладают неудовлетворительными характеристиками (ненадежность в работе, низкий ресурс, низкая холодопроизводительность, повышенное энергопотребление и др.), вследствие чего разработанные ФПУ не были запущены в серийное производство. На наш взгляд существуют две основные причины отставания в разработке современных МКС, заключающиеся в следующем.

Первой причиной является нежелание ООО «НТК «Криогенная техника» прислушиваться к пожеланиям предприятий-разработчиков ФПУ, что является нарушением основного закона рыночной экономики –

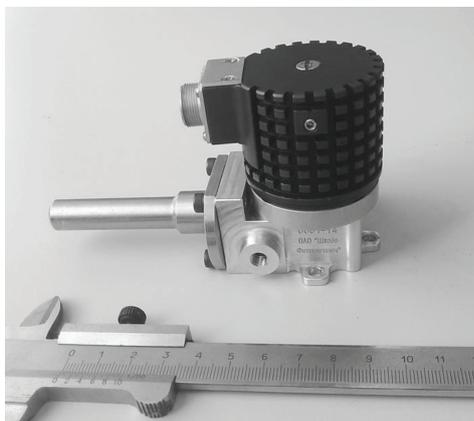


Рисунок 1.
«Сапфир-МКС»

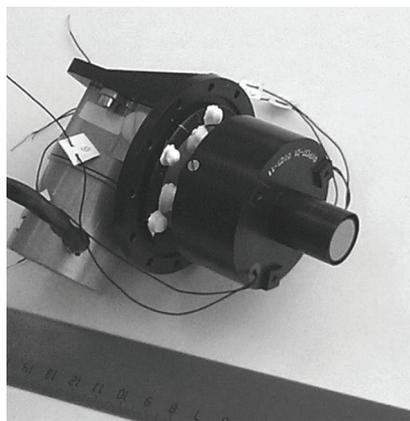


Рисунок 2.
**«Сапфир-МКС», состыкованная с ФПУ
ФУР137-01**

предлагать к продаже товар, пользующийся спросом у покупателя. На рынок методично выбрасываются новые разработки МКС без какого-либо согласования и координации с их потенциальными потребителями.

Вторая причина заключается в том, что при определении величины холодопроизводительности своих МКС ООО «НТК «Криогенная техника» до настоящего времени использует метод определения теплопритоков к имитаторам тепловой нагрузки на МКС с учетом теплоты отходящих паров азота, который приводит к возникновению большой погрешности измерения теплопритока. Этот метод изложен в нормативном документе РТМ 3-1033-77, который почти 40 лет назад разрабатывался применительно к ФПУ с заливными криостатами, т.е. с криостатами, охлаждаемыми с помощью жидкого азота [1]. Причиной большой погрешности измерения величины теплопритока является различие условий теплообмена в криостате приемника, залитого жидким азотом, и в случае работы криостата в связке с ГКМ.

С учетом вышесказанного в 2009 г. было принято решение о разработке на нашем предприятии МКС собственной конструкции, получившей обозначение «Сапфир-МКС», в качестве аналога использовалась конструкция МКС К508 фирмы Ricor (Израиль). В ходе выполнения ОКР «Сапфир-МКС» эта сложная научно-техническая задача была решена. Разработанную МКС (рис. 1)

возможно применять в охлаждаемых ФПУ и МФПУ, работающих в различных спектральных диапазонах (3 – 5 мкм и 8 – 12 мкм).

При решении данной задачи получены следующие результаты:

1. Разработан комплект КД ЖИАЮ.702411.001 литеры «О»;
2. Разработан комплект ТД ЖИАЮ.702411.001 литеры «О»;
3. Разработан проект ТУ ЖИАЮ.702411.001 ТУ на МКС «Сапфир-МКС»;
4. Изготовлены опытные образцы МКС «Сапфир-МКС», которые прошли предварительные испытания на соответствие требованиям ТЗ. По результатам предварительных испытаний опытных образцов МКС «Сапфир-МКС» составлен акт, соответствующие протоколы и справка о соответствии опытных образцов требованиям ТЗ. Конструкторской и технологической документации присвоена литера «О».

К настоящему времени выпущена опытная партия «Сапфир-МКС», которая используется для комплектации изделий ФУР137-01 и ФУК151М (рис. 2, 3).

В 2014 г. в соответствии с [2] на нашем предприятии начата разработка микрокриогенной системы «МКС-ШФС», аналогом для которой является МКС К548 фирмы Ricor. В настоящее время пять опытных образцов «МКС-ШФС» (рис. 4) проходят всесторонние испытания в ОАО «Швабе-Фотосистемы» и АО «НПО «Орион».

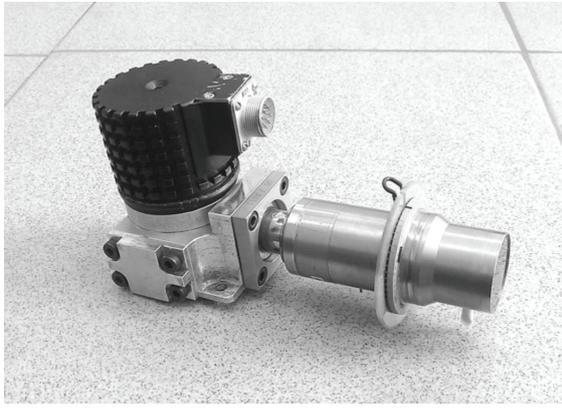


Рисунок 3.
**«Санфир-МКС», состыкованная
с ФПУ ФУР151М**

Во время разработки МКС особое внимание уделялось совершенствованию методики измерения теплопритоков ФПУ и их тепловых имитаторов, а также методики измерения холодопроизводительности МКС.

Согласно РТМ 3-1033-77 значение измеряемого теплопритока Q определяется расчетным путем из уравнения баланса между теплопритоком к приемнику и количеством тепла, затрачиваемого на испарение залитого в криостат приемника жидкого азота (после предварительного охлаждения конструкции) и на повышение температуры отходящих паров азота от 77 К до температуры T :

$$Q = \frac{273 \cdot V_{eci} \cdot P}{V_0 \cdot T_{oc} \cdot P_0 \cdot t_v} \cdot [r + c \cdot (T - 77)], \quad (1)$$

где r – скрытая теплота испарения азота, Дж/г; c – средняя теплоемкость азота в интервале температур 77-300К, Дж/(г·К); t_v – время прохождения пленкой мерного участка бюретки; P – барометрическое давление, мм рт. ст.; V_0 – удельный объем азота при 0°C и давлении 760 мм рт. ст.; P_0 – нормальное атмосферное давление ($P_0=760$ мм рт. ст.); T_{oc} – температура паров азота, проходящих через мерную бюретку, равная температуре окружающей среды, °C, T – температура паров азота на выходе из криостата.

Причиной завышения величины теплопритока является различие условий теплообмена в криостате приемника, залитого жидким азотом, и в случае работы криостата в связке

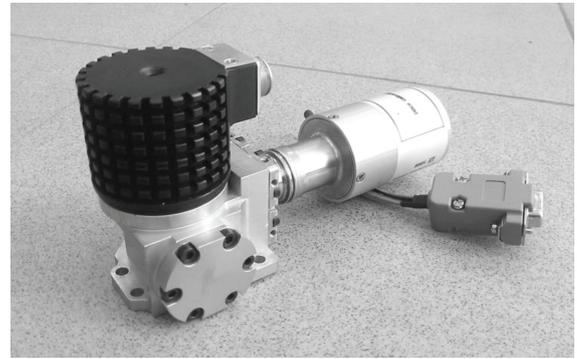


Рисунок 4.
**«МКС-ШФС», состыкованная
с тепловым имитатором**

с ГКМ. В лабораторных условиях в криостат приемника заливается жидкий азот и в соответствии с требованиями РТМ 3-1033-77 поддерживается его заданный уровень (10-15 мм от доньшка держателя), а в «штатных» ситуациях жидкая и газовая фазы азота в держателе ФПУ вообще отсутствуют, т.к. теплоотвод осуществляется за счет контакта с холодным пальцем ГКМ.

Таким образом, различие условий теплообмена является причиной возникновения методической погрешности указанного метода. Снизить эту погрешность можно, если измерения проводить в момент испарения жидкой фазы, а в формуле (1) не учитывать теплоту отходящих паров азота, т.е. составляющую $c \cdot T - 77$. При этом формула (1) принимает вид

$$Q = \frac{273 \cdot V_{eci} \cdot P}{V_0 \cdot T_{oc} \cdot P_0 \cdot t_v} \cdot r, \quad (2)$$

Следует сказать, что зарубежные фирмы применяют именно такой метод измерения теплопритока ФПУ, заключающийся в измерении в момент выкипания жидкой фазы, не учитывая теплоту отходящих паров азота. Так, например, фирма «Ricog» (Израиль) выпускает измерители теплопритоков BS-4230 (рис. 5), использующие данный метод. Подобные измерители теплопритоков имеются в ОАО «Швабе-Фотосистемы» и в АО «НПО «Орион». Основным элементом измерителя BS-4230 является расходомер газообразного азота типа DFM26S-VADL4-B5A (рис. 6).



Рисунок 5.

Измеритель теплопотоков BS-4230

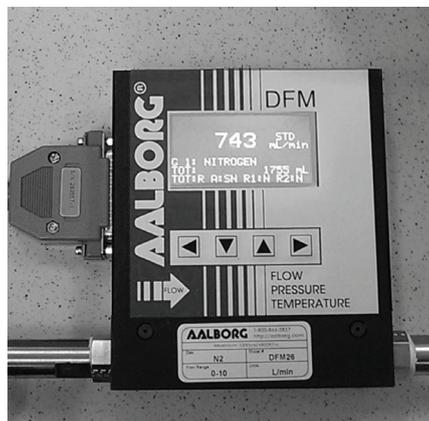


Рисунок 6.

Расходомер DFM26S-VADL4-B5A

Принцип действия расходомера DFM26S-VADL4-B5A основан на следующем. Внутри корпуса расходомера имеется калиброванная стальная трубка, по которой проходит измеряемый газ. К этой трубке параллельно подключен стальной капилляр, по которому пропускается небольшое количество газа, отбираемое от основного измеряемого потока. Капилляр оборудован системой нагрева и измерения температуры газа на входе и выходе из капилляра. При заданной мощности нагревателя по измеренным входной и выходной температурам определяется средняя температура газа в капилляре. По средней температуре с учетом поправки на давление определяются плотность газа и его удельная теплоемкость (табличные величины).

Затем решается уравнение теплового баланса для газа

$$Q = \tilde{n} \cdot \rho \cdot V \cdot (T_2 - \dot{Q}_1) \quad (3)$$

где

Q - мощность нагревателя,

\tilde{n} - удельная теплоемкость газа,

ρ - плотность газа,

V - объемный расход газа,

\dot{Q}_1 - температура газа на входе в капилляр,

\dot{Q}_2 - температура газа на выходе из капилляра.

Найденный по уравнению объемный расход газа в капилляре, далее умножается на коэффициент, равный отношению площади проходного сечения калиброванной трубки к площади проходного сечения капилляра, и

Таблица 1.

Сравнительные измерения теплопотоков ФПУ

№ п/п	Название ФПУ	Метод измерения теплопотока	
		Без учета теплоты отходящих паров	С учетом теплоты отходящих паров
1	АП 30006 Л	0,582	1,16
2	«Арча»	0,495	1,000
3	«Атолл»	0,474	0,908
4	«Импульс»	0,43	0,86
5	Модуль 32-03	0,199	0,330
6	МФПУ 2 ОМ	0,245	0,360
7	«Омела-В»	0,240	0,365
8	«Палка-ВС»	0,237	0,382
9	ТИ «МКС-Сапфир»	0,233	0,485
10	ТИ «Феникс»	0,417	0,84
11	«Феникс-Альфа»	0,556	1,16
12	«Феникс-Сапфир»	0,469	0,96
13	ФУР-137	0,254	0,521

на экране расходомера высвечивается иско-
мая величина объемного расхода газа через
расходомер с учетом поправок на температу-
ру и давление окружающей среды.

В ОАО «Швабе-Фотосистемы» были вы-
полнены сравнительные измерения тепло-
притоков различных ФПУ, результаты изме-
рений представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, учет теплоты отходя-
щих паров приводит к завышению величины
теплопритока ФПУ, по сравнению с реальной
величиной в условиях работы с МКС, от 1,5
до 2 раз (в зависимости от габаритов ФПУ).
На практике МКС с завышенной величиной
холодопроизводительности (по паспорту) ча-
сто бывает не в состоянии вывести реальный
ФПУ на заданный режим криостатирования.
В настоящее время ни одна из зарубежных
фирм, производящих МКС, не использует
этот устаревший метод определения тепло-
притоков. Для того чтобы повысить качество
разрабатываемых отечественных МКС, тре-
буется разработка новой нормативной доку-
ментации по измерению теплопритоков.

То обстоятельство, что учет теплоты отхо-
дящих паров дает существенное завышение
величины теплопритока, по сравнению с ре-
альной величиной в условиях работы с МКС,
необходимо учитывать при определении хо-
лодопроизводительности МКС. Как правило,
при автономных испытаниях МКС время вы-
хода на рабочий режим и ее другие техниче-
ские характеристики измеряются с тепловым
имитатором ФПУ (ТИ ФПУ). При этом хо-
лодопроизводительность МКС определяется
по формуле

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (4)$$

где Q – холодопроизводительность МКС, Вт;
 Q_1 – мощность на нагревателе ТИ ФПУ, эк-
вивалентная избыточной холодопроизводи-
тельности МКС, Вт;

Q_2 – теплоприток теплового имитатора.

Как следует из формулы (4), холодопро-
изводительность машины зависит от того,
каким методом измерен теплоприток тепло-
вого имитатора. Было проведено исследо-
вание влияния методов измерения тепло-
притока ТИ на величину холодопроизводи-
тельности МКС. Исследовались две МКС:
МСМГ-0,6А-0,5/80 с тепловым имитатором
КВО.4550.010 (разработка ООО «НТК «Кри-
огенная техника») и «Сапфир-МКС» с тепло-
вым имитатором №3 (разработка ОАО «МЗ
«САПФИР»).

Методика исследования заключалась в
следующем. По показаниям термодатчика,
установленного на растре, тепловой имита-
тор выводился с помощью ГКМ на заданную
температуру криостатирования $T_{кр}$ (в диапа-
зоне от $T_{кр}$ до $T_{кр} + \Delta T$), после чего на нагре-
ватель имитатора ступеньками подавалась
электрическая мощность с выдержкой на
каждой ступеньке 3-5 минут. Как только по-
казания термодатчика (при очередной пода-
че электрической мощности на нагреватель)
выходили за пределы заданного темпера-
турного диапазона, записывалась величина
электрической мощности предыдущей сту-
пеньки. При дальнейшей обработке резуль-
татов исследования эта величина Q_1 исполь-
зовалась в качестве расчетной в формуле (3),
а величина теплопритока ТИ бралась в двух
вариантах: Q_2 – с учетом теплоты отходящих
паров и $Q_{2,бу}$ – без учета теплоты отходящих
паров. Результаты измерения представлены в
табл. 2.

Из табл. 2 видно, что реальная холодопро-
изводительность МСМГ-0,6А-0,5/80 ($Q_{бу}$) не
превышает 0,34 Вт, хотя в паспортных дан-
ных на эту машину ООО «НТК «Криогенная
техника» указывает величину 0,5 Вт.

Реальная же холодопроизводительность

Таблица 2.
Влияние метода измерения теплопритока
на величину холодопроизводительности МКС

Тип МКС	$T_{кр},$ К	$Q_{2,су}$ Вт	$Q_{2,бу}$ Вт	$Q_1,$ Вт	$Q_{су}$ Вт	$Q_{бу}$ Вт
МСМГ-0,6А-0,5/80	80^{+2}	0,295	0,188	0,15	0,445	0,338
Сапфир-МКС	80^{+2}	0,485	0,233	0,400	0,885	0,633

Таблица 3.
Зависимость холодопроизводительности «Санфир-МКС»
от температуры криостатирования

$T_{кр}$, К	Дополнительная мощность, Вт	Холодопроизводительность, Вт	Энергопотребление при $T_{кр}$, Вт
57,1	0	0,266	10,0
65,0	0	0,260	9,3
65,3	0,04	0,300	11,1
79,8	0	0,250	4,8
80,1	0,100	0,350	6,0
80,2	0,200	0,450	8,1
80,3	0,250	0,500	8,8
80,4	0,300	0,550	9,7
81,8	0,400	0,650	11,8
85,2	0	0,250	3,8
86,0	0,350	0,600	8,6
86,3	0,400	0,650	9,1
86,7	0,450	0,700	10,3
87,2	0,500	0,750	10,8
93,6	0,150	0,400	6,0
93,9	0,300	0,550	8,4
94,1	0,350	0,600	9,1
94,5	0,450	0,700	11,0
100,1	0,450	0,700	8,6
100,3	0,500	0,750	10,0
100,5	0,550	0,800	11,0
110,5	0,550	0,800	8,1
110,8	0,650	0,900	9,8
111,0	0,700	0,950	10,8

Таблица 4.
Зависимость холодопроизводительности МКС SC104R №0005-03-12
от температуры криостатирования

$T_{кр}$, К	Дополнительная мощность, Вт	Холодопроизводительность, Вт	Энергопотребление при $T_{кр}$, Вт
75,0	0	0,240	7,0
75,4	0,100	0,340	8,1
75,8	0,200	0,440	10,5
85,6	0	0,240	5,0
85,6	0,100	0,340	6,4
85,6	0,200	0,440	8,1
86,5	0,300	0,540	9,3
87,2	0,350	0,590	9,3

Таблица 5.
Зависимость холодопроизводительности «МКС-ШФС» №001-15
от температуры криостатирования при нормальных климатических условиях
(теплоприток ТИ равен 0,2 Вт)

$T_{кр}$, К	Дополнительная мощность, Вт	Холодопроизводительность, Вт	Энергопотребление при $T_{кр}$, Вт
65	0,100	0,300	10,8
65	0,300	0,500	16,6
68	0,450	0,650	24,9
69,5	0,500	0,700	25,0

Таблица 6.
Зависимость холодопроизводительности «МКС-ШФС» №001-15
от температуры криостатирования при температуре окружающей среды +55°C
(телоприток ТИ равен 0,2 Вт)

$T_{кр}, K$	Дополнительная мощность, Вт	Холодопроизводительность, Вт	Энергопотребление при $T_{кр}, Вт$
77	0,350	0,550	15,6
77	0,400	0,600	17,0
77	0,450	0,650	17,3
77	0,500	0,700	18,0
77,5	0,550	0,750	19,7

«Сапфир-МКС» ($Q_{бы}$) немного превышает 0,6 Вт, хотя в паспортных данных на эту машину указывается величина 0,5 Вт.

Таким образом, результаты исследования показывают, что применение методики измерения теплопритока с учетом теплоты отходящих паров приводит к завышению величины холодопроизводительности ГКМ по сравнению с ее реальными возможностями. В настоящее время ни одна из зарубежных фирм, производящих МКС, не использует этот устаревший метод определения теплопритоков.

Было проведено исследование зависимости величины холодопроизводительности разработанных машин от температуры криостатирования.

В табл. 3 представлены результаты испытаний «Сапфир-МКС» №008-12 (максимальная мощность энергопотребления 12 Вт) в сборке с тепловым имитатором № 38-54433, теплоприток которого при $T_{кр}=77K$ и НКУ равен 0,25 Вт (определен без учета теплоты отходящих паров). Для режимов криостатирования ниже 77 К теплоприток ТИ пересчитывался, исходя из 0,25 Вт при $T_{кр}=77 K$ и НКУ.

Для сравнения в табл.4 представлены результаты испытаний МКС SC104R №0005-03-12 (типа K508) производства КНР. Теплоприток ТИ при $T_{кр}=77K$ и НКУ составлял 0,24 Вт.

Сравнение результатов табл. 3 и табл. 4 испытаний показывают, что машина «Сапфир-МКС» при одинаковых температурах криостатирования имеет более высокую холодопроизводительность, чем китайский аналог.

Результаты испытаний «МКС-ШФС» №001-15 при различных значениях температуры окружающей среды представлены в табл. 5 и табл. 6.

Таким образом, в ОАО «Швабе-Фотосистемы» была решена сложная научно-техническая задача: в рамках программы импортозамещения разработаны микрокриогенные системы «Сапфир-МКС» и «МКС-ШФС», которые по техническим характеристикам не уступают своим аналогам МКС K508 и K548 фирмы Ricor (Израиль). Разработанные МКС возможно применять в охлаждаемых ФПУ, работающих в различных спектральных диапазонах (3 – 5 мкм и 8 – 12 мкм).

Список литературы:

1. Руководящий технический материал. Приемники излучения криостатные. Метод определения теплопритоков на уровне 77 К. РТМ 3-1033-77, 1977.
2. План-график проведения совместных работ по созданию отечественных МКС для ФПУ, используемого в ТПВК-А для комплекса «Армата». Утвержден заместителем генерального директора по НИОКР и инновационному развитию ОАО «Швабе» Н.С. Раковичем.

РАЗРАБОТКА МАТРИЧНЫХ И СУБМАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

КАРПОВ В.В., КОЗЫРЕВ М.Е., КУЗНЕЦОВ Н.С., ПЕТРЕНКО В.И., СЕМЕНОВ В.И., ЧИЖ К.В.,
ЧИШКО В.Ф.

Открытое акционерное общество «Швабе – Фотосистемы»

E-mail: info@shvabe-fs.ru

Рассматриваются номенклатура, принципы построения и основные характеристики разработанных серийно-ориентированных фотоприемных модулей второго поколения.

Ключевые слова: субматричные и матричные фотоприемные модули, формат модулей, фоточувствительные элементы на основе фотодиодов из InSb или КРТ, вакуумный криостатируемый корпус, микрокриогенная система.

За последние пять лет в ОАО «Швабе – Фотосистемы» была проведена разработка серийно-ориентированных фотоприемных модулей второго поколения для перспективной тепловизионной аппаратуры [1-5]. Целью разработки являлось создание промышленно-ориентированных конструкций и технологии сборки инфракрасных фотоприемных модулей (ФПМ) второго поколения:

- субматричных фотоприемных модулей формата 4x288 элементов;
- матричных фотоприемных модулей форматов 320x240 и 320x256 элементов.

Работа проводилась в интересах модернизации и импортозамещения ФПМ в тепловизионных каналах для комплексов управления и наблюдения различного назначения.

Разработаны следующие фотоприемные модули второго поколения:

- ФУК 149М и ФУК 154М – унифицированные матричные фотоприемные модули форматом 320x240 и 320x256 элементов диапазона (3...5) мкм;
- ФУК 148М и ФУК 152М – унифицированные субматричные фотоприемные модули форматом 4x288 элементов диапазона (8...10,5) мкм, работающие в двухпроходном режиме временной задержки и накопления;
- ФУК 143М и ФУК 151М – унифициро-

ванные матричные фотоприемные модули форматом 320x256 элементов диапазона (8...10,5) мкм.

СОСТАВ ФОТОПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ

Рассматриваемые модули построены по однотипной схеме.

Типовой состав фотоприемного модуля:

- матрица или субматрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе фотодиодов из InSb или КРТ;
- кремниевая БИС считывания (мультиплексор), гибридизированная индиевыми микроконтактами с МФЧЭ и обеспечивающая считывание, предварительное усиление и мультиплексирование сигналов МФЧЭ;
- вакуумный криостатируемый корпус, в котором размещены МФЧЭ, кремниевая БИС, газопоглотители и охлаждаемая диафрагма с оптическим фильтром, обеспечивающим заданный спектральный диапазон чувствительности;
- микрокриогенная система (МКС) охлаждения.

МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ InSb

Матричные фотоприемники на основе антимонида индия (InSb) предназначены для работы в области спектра (3–5) мкм. Были

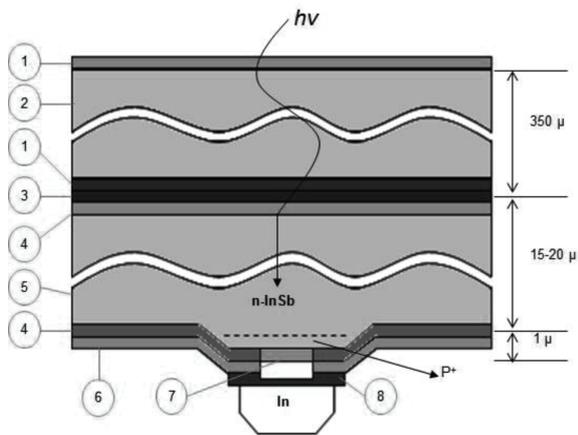


Рисунок 1.

Конструкция кристалла МФЧЭ на основе InSb:

- 1 – просветляющее покрытие (4000 нм);
- 2 – Si-подложка; 3 – криоклей; 4 – анодный окисел+просветляющее покрытие; 5 – базовая область n-InSb толщиной 15-20 мкм и $n \sim (0.1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 6 – пассивирующий слой SiO+анодный окисел; 7 – подслой Cr (40-60 нм)-80-100 Au; 8 – подслой Ni (~800 нм);
- In – индиевый микростолбик

разработаны матричные фотоприемники форматом (320x240) элементов и форматом (320x256) элементов со строчно-кадровой организацией считывания.

МФЧЭ разработана [4] на основе матрицы фотодиодов из антимолида индия с тонкой базовой областью на кремниевой несущей подложке. Такая конструкция МФЧЭ обеспечивает согласование по коэффициентам термического расширения МФЧЭ и кремниевую БИС считывания (мультиплексор), что минимизирует влияние термомеханических напряжений на гибридную сборку МФЧЭ с кремниевой БИС считывания. На рис. 1 представлена конструкция кристалла МФЧЭ.

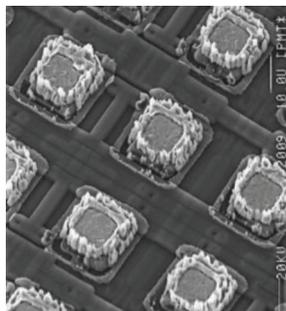


Рисунок 3.

Индиевые микростолбики

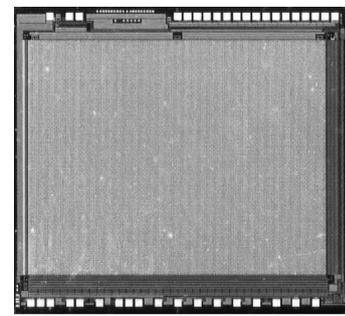


Рисунок 2.

Кремниевая БИС считывания

Кремниевая БИС считывания (рис. 2) разработана по КМОП технологии с нормой проектирования не более 0,8 мкм [4].

БИС обладает необходимыми функциональными возможностями, обеспечивающими:

- режим работы, в котором осуществляется параллельное считывание (на 4/8 выходов) всего кадра форматом 320x240 элементов с высокой чувствительностью и кадровой частотой не менее 200 Гц;
- режим считывания нескольких строк с высокой частотой опроса не менее 8000 Гц;
- режим «окна» прямоугольной формы, размеры которого задаются извне с кратностью по сторонам 8 пикселей («окно» располагается в требуемом месте поля матрицы).

Матричный фотоприемник формируется гибридизацией МФЧЭ с кремниевой БИС считывания при помощи индиевых микростолбиков (рис. 3), получаемых с использованием операций «сухого» травления. Далее матричный фотоприемник с датчиками температуры с помощью клеявого соединения размещается на растре контактном (рис. 4), который, в свою очередь, является охлаждаемым элементом криостата.

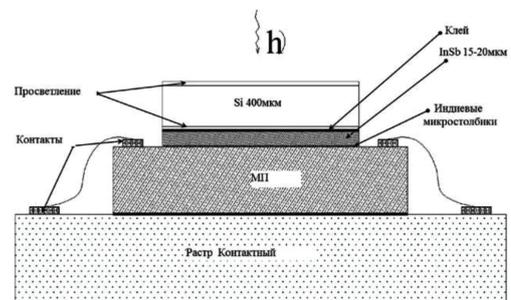


Рисунок 4.

Размещение матричного фотоприемника на растре контактном криостата

МАТРИЧНЫЕ И СУБМАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ КАДМИЙ-РУТУТЬ-ТУЛЛУР

Основным материалом для создания быстродействующих фотоприемников спектрального диапазона (8-14) мкм с предельными характеристиками чувствительности является твердый раствор теллуридов кадмия и ртути $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ).

Постоянно прогрессируя, производство КРТ развивалось от метода выращивания объемных кристаллов из расплава при высокой температуре к методам низкотемпературной эпитаксии. Эпитаксиальные методы являются наиболее пригодными для выращивания слоев КРТ большой площади и, соответственно, для создания матричных фотоприемников. Основными методами их получения являются жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ).

В ИФП СО РАН создано отечественное оборудование и разработана промышленно-ориентированная технология молекулярно-лучевой эпитаксии слоев КРТ - базового стратегического материала современной ИК техники для спектрального диапазона 8-14 мкм (ТУ 1778-003-03533808-2003).

При разработке субматричных и матричных фотоприемных модулей диапазона (8-10,5) мкм были использованы следующие фотоприемники.

Фотоприемник линейчатый (субматричный)

Гибридная сборка на индиевых микро столбах субматрицы фотодиодов из гетероэпитаксиальных структур КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (ГЭС КРТ МЛЭ), и кремниевой БИС (мультиплексора), является охлаждаемой фотоприемной линейкой форматом 288×4 элементов - аналог ФПУ «ID TL015-XX-V3» фирмы «Sofradir». Сборка разработана в ИФП СО РАН (ФП2 КНГУ.927.00.00 ТУ) [6].

Конструкция линейки фотодиодов представлена на рис. 5.

На рис. 6 приведена топология расположения фотодиодов в фотоприемной плоскости.

Разработанная кремниевая БИС (мульти-

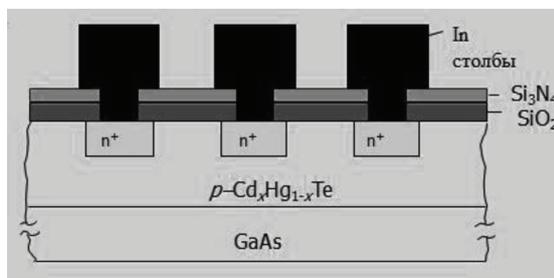


Рисунок 5.

Конструкция линейки фотодиодов ФП2

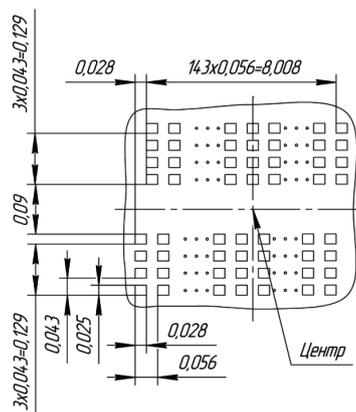


Рисунок 6.

**Топология фотодиодов
в фотоприемной плоскости**

плексор) под шифром МКМЗ для ФП2 формата 288x4 имеет схему и конструкцию, особенностями которой являются: полностью цифровое управление с помощью параллельного и последовательного портов, деселекция любой дефектной ячейки и реализация функции двунаправленного сканирования.

Гибридная сборка линейки фотодиодов с мультиплексором осуществляется при помощи индиевых микро столбиков (рис. 7).

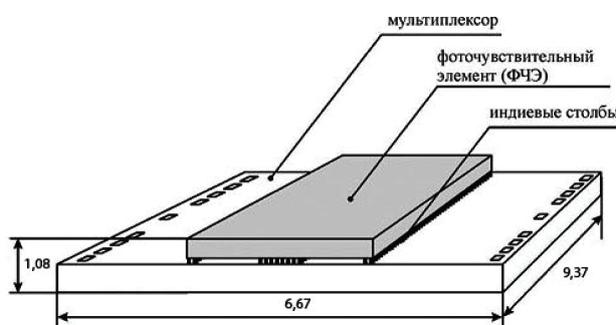


Рисунок 7.

**Конструкция гибридной сборки ФП2
КНГУ.927.00.00 ТУ**

Фотоприемник матричный

В ИФП СО РАН разработан и изготовлен охлаждаемый матричный КРТ-фотоприемник ФП2М КНГУ.928.00.00 ТУ формата 320×256 элементов с размерами пикселей 30×30 мкм, имеющий длинноволновую границу спектральной чувствительности 10,5 мкм [7].

На рис. 8 представлена конструкция гибридной сборки фотоприемника ФП2М, а на рис. 9 – формат фоточувствительного поля приемника.

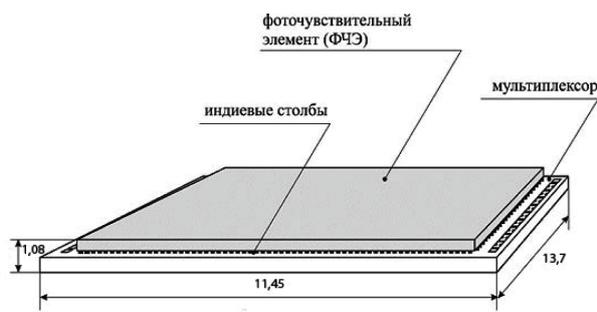


Рисунок 8.
Конструкция гибридной сборки фотоприемника ФП2М

Конструктивная схема матричного фотоприемника в вакуумном криостате

Вакуумный криостатируемый корпус (ВКК) представляет собой конструкцию, состоящую из держателя, с закрепленным на нем охлаждаемыми элементами, корпуса

с газопоглотителем (геттером) и крышки с входным окном [1].

Держатель ВКК одновременно является гильзой вытеснителя газовой криогенной машины (ГКМ), входящей в состав МКС. На торце гильзы-держателя закреплен керамический наконечник (растр контактный), который является посадочным местом для фоточувствительных элементов и других охлаждаемых элементов конструкции.

На рис. 10 представлена компоновка фотоприемника в составе ВКК.

Контактные площадки наконечника соединены с контактными площадками металлокерамического цоколя проводниками (диаметром 0,03 мм) из сплава платина (80 %) – иридий (20 %), обеспечивающим оптимальное

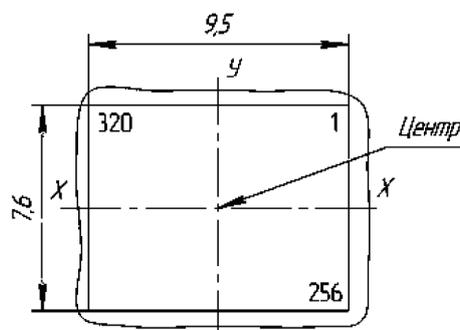


Рисунок 9.
Формат фоточувствительного поля ФП2М

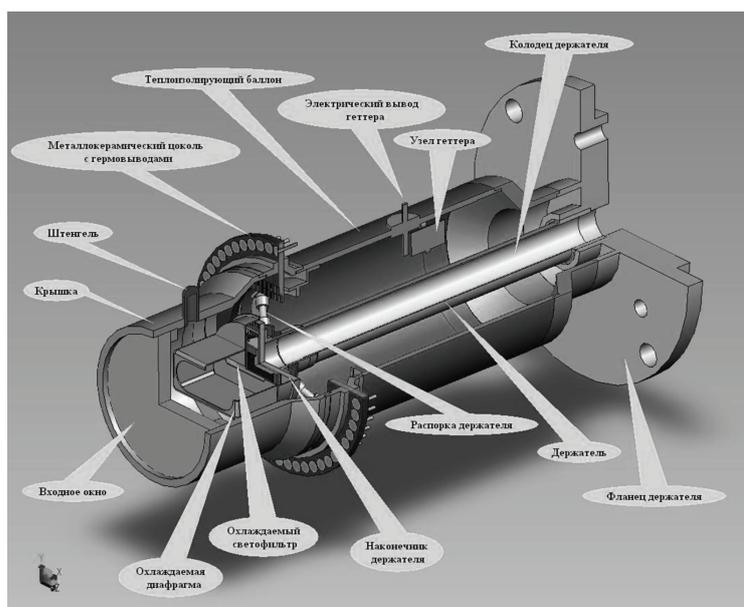


Рисунок 10.
Компоновка фотоприемника в составе ВКК



Рисунок 11.

**Матричный фотоприемник,
расположенный в вакуумном криостате**

соотношение теплопроводности и электрического сопротивления.

Вакуумная откачка криостата производится через медный штенгель, впаянный «твердой» высокотемпературной пайкой (припой ПСР-72). После откачки штенгель перекусывается специальными кусачками, обеспечивающими холодную (диффузионную) сварку стенок штенгеля, в результате которой осуществляется герметизация вакуумного объема ВКК.

Поддержание и восстановление необходимого вакуума полости ВКК обеспечивается периодической активацией газопоглотителей (геттеров), расположенных на внутренней стенке ВКК.

На рис. 11 представлена фотография матричного фотоприемника, собранного в составе ВКК.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЕЙ

ФУК 149М и ФУК 154М – унифицированные матричные фотоприемные модули форматом 320x240 и 320x256 элементов диапазона (3...5) мкм.

Фотографии модулей представлены на рис. 12 и рис. 13, основные параметры находятся в табл. 1.



Рисунок 12.

Фотоприемный модуль ФУК 149М



Рисунок 13.

Фотоприемный модуль ФУК 154М

Таблица 1. Основные параметры модулей ФУК 149М и ФУК 154М

Наименование параметра	Значения параметра	
	ФУК 149М	ФУК 154М
Материал ФЧЭ	InSb	
Число ФЧЭ (общее)	320x240	320x256
Размер ФЧЭ, мкм	30x30	
Плоский угол зрения ФЧЭ, углов. град.	32	
Область спектральной чувствительности, мкм	3,0-5,0	3,5-5,0
Длина волны максимума спектральной чувствительности, мкм	4,5	
Вольтовая чувствительность в максимуме спектральной чувствительности, В·Вт ⁻¹	1,0·10 ⁸	
Значение пороговой мощности, Вт/элемент	5,0·10 ⁻¹³	
Динамический диапазон выходного сигнала, дБ, не менее	60	
Номинальное значение частоты выходного сигнала, МГц	4	
Рабочая температура, К	78±2	
Система охлаждения: - МКС МСМГ - 0,6А-0,4/80 в модуле ФУК 149М; - «Сапфир – МКС» в модуле ФУК 154М		



Рисунок 14.
Фотоприемный модуль ФУК 148М



Рисунок 15.
Фотоприемный модуль ФУК 152М

Таблица 2. Основные параметры модулей ФУК 148М и ФУК 152М

Наименование параметра	Значения параметра
Материал ФЧЭ	ГЭС КРТ МЛЭ ТУ 1778-003-03533808-2003
Число ФЧЭ (общее)	4x288
Размер ФЧЭ, мкм	25x28
Шаг ФЧЭ вдоль линейки, мкм	56
Плоский угол зрения ФЧЭ, углов. град.	32
Область спектральной чувствительности, мкм	7,7-10,5
Длина волны максимума спектральной чувствительности, мкм	9,5
Вольтовая чувствительность в максимуме спектральной чувствительности, В Вт ⁻¹	1,0·10 ⁷
Удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	1,3·10 ¹¹
Динамический диапазон выходного сигнала, дБ, не менее	70
Номинальное значение частоты выходного сигнала, МГц	4
Рабочая температура, К	78±2
Система охлаждения: - МКС МСМГ ЗВ-1/80 КВО.0733.000.03 в модуле ФУК 148М; - «Сапфир – МКС» в модуле ФУК 152М	

ФУК 148М и ФУК 152М – унифицированные субматричные фотоприемные модули форматом 4x288 элементов диапазона (8...10,5) мкм, работающие в двухпроходном режиме временной задержки и накопления.

Фотографии модулей представлены на рис. 14 и рис. 15, основные параметры находятся в табл. 2.

ФУК 143М и ФУК 151М – унифицированные матричные фотоприемные модули форматом 320x256 элементов диапазона (8...10,5) мкм.

Фотографии модулей представлены на рис. 16 и рис. 17, основные параметры находятся в табл. 3.

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЕЙ

Измерения фотоэлектрических параметров фотоприемных модулей выполняются с использованием унифицированного измерительного стенда, состав и внешний вид которого представлены на рис. 18.

Было разработано специализированное программное обеспечение (СПО), позволяющее производить автоматизированную процедуру измерения фотоэлектрических параметров фотоприемных модулей и регистрацию результатов измерений в электронной базе данных. Интерфейсы СПО для субматричных и матричных фотоприемных модулей в среде операционной системы «Windows» представлены на рис. 19 и рис. 20.



Рисунок 16.
Фотоприемный модуль ФУК 143М



Рисунок 17.
Фотоприемный модуль ФУК 151М

Таблица 3. Основные параметры модулей ФУК 143М и ФУК 151М

Наименование параметра	Значения параметра
Материал ФЧЭ	ГЭС КРТ МЛЭ ТУ 1778-003-03533808-2003
Число ФЧЭ (общее)	320x256
Размер ФЧЭ, мкм	30x30
Плоский угол зрения ФЧЭ, углов. град.	32
Область спектральной чувствительности, мкм	7,7-10,5
Длина волны максимума спектральной чувствительности, мкм	9,5
Вольтовая чувствительность в максимуме спектральной чувствительности, В Вт ⁻¹	1,0·10 ⁷
Значение пороговой облученности, Вт·см ⁻²	2,0·10 ⁻⁷
Динамический диапазон выходного сигнала, дБ, не менее	70
Номинальное значение частоты выходного сигнала, МГц	4
Рабочая температура, К	78±2
Система охлаждения: - МКС МСМГ 3В-1/80 КВО.0733.000.03 в модуле ФУК 143М; - «Сапфир – МКС» в модуле ФУК 151М	

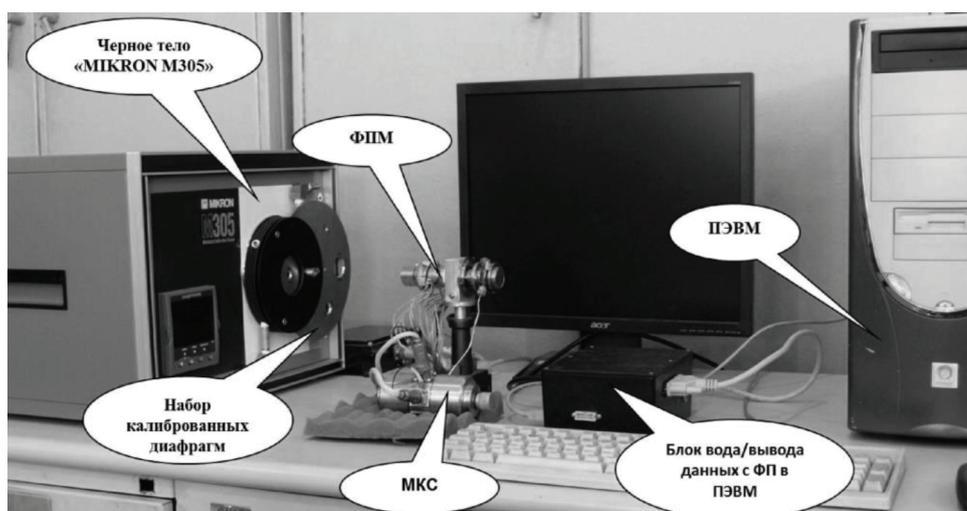


Рисунок 18.
Стенд измерения фотоэлектрических параметров модулей

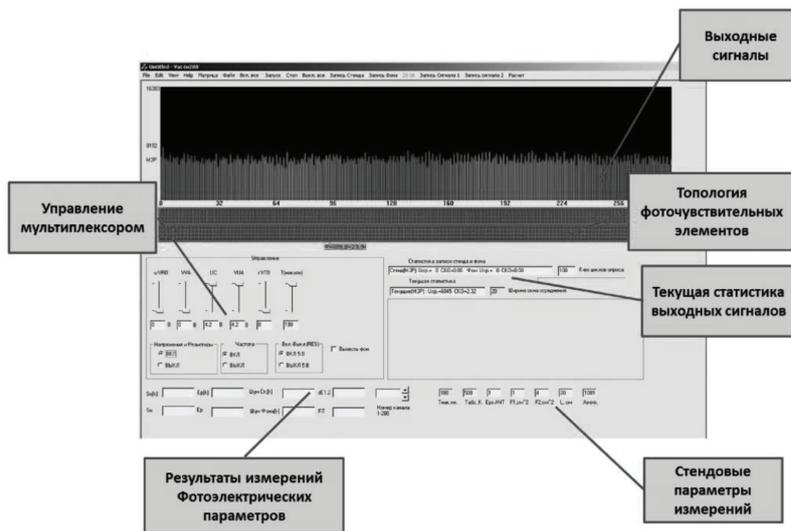


Рисунок 19.
Интерфейс специализированного программного обеспечения (субматричный фотоприемник)

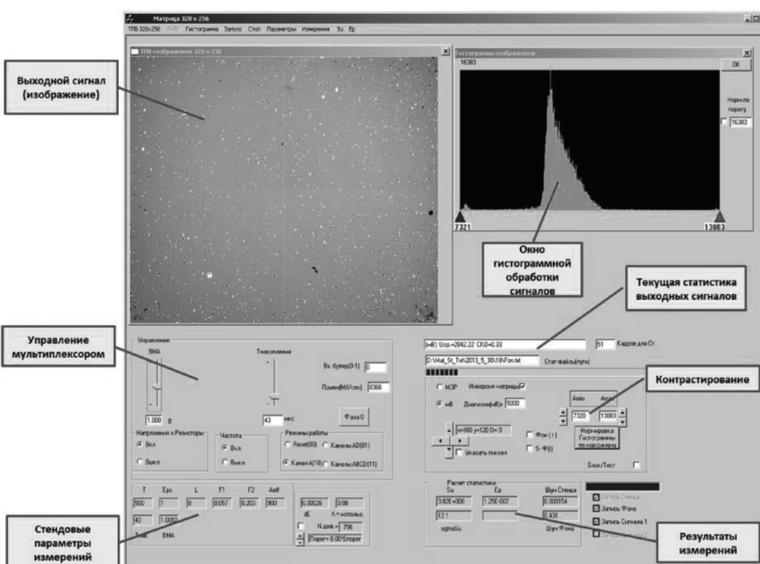


Рисунок 20.
Интерфейс специализированного программного обеспечения (матричный фотоприемник)

Список литературы:

1. Криостат «Вакуум-2» ТУ 6370-005-07539943-07, ОАО «МЗ «САПФИР», 2007.
2. Фотоприемные модули ФУК 148М и ФУК 152М ТУ 6349-012-07539943-2010, ОАО «МЗ «САПФИР», 2010.
3. Фотоприемные модули ФУК 143М и ФУК 151М ТУ 6349-013-07539943-2010, ОАО «МЗ «САПФИР», 2010.
4. Матричное фотоприемное устройство ТУ

6349-016-07539943-2010, ОАО «МЗ «САПФИР», 2010.

5. Микрокриогенная система охлаждения интегрального типа «Сапфир-МКС» ЖИАЮ.702411.001 ТУ, ОАО «МЗ «САПФИР», 2013.

6. Фотоприемник линейчатый ФП2 КНГУ.927.00.00 ТУ, ИФП СО РАН, 2010.

7. Фотоприемник матричный ФП2М КНГУ.928.00.00 ТУ, ИФП СО РАН, 2010.

СОЗДАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ

ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ФИРМЫ FLP MICROFINISHING GMBH

ТОМАС РЕФЕЛЬДТ

Фирма FLP Microfinishing GmbH, Германия

На протяжении 20 лет фирма FLP Microfinishing GmbH, Германия, специализируется на обработке прецизионных оптических деталей и входит в число важнейших в мире производителей специальных тонкошлифовальных, доводочных и полировальных станков. Более 10 лет высокоточное оборудование известно и высоко ценится заказчиками и партнерами российской оптической промышленности.

Особенностью совместной работы с партнерами из российской оптической промышленности является прежде всего предлагаемая нами технологическая поддержка. Вложив деньги в покупку нашего станка заказчики фирмы FLP Microfinishing GmbH получают выгоды за счет профессиональной поддержки силами специалистов и технологов из Германии в течение периода ввода установки в эксплуатацию и предлагаемого обучения. Совместными усилиями оптимизируется процесс обработки, а также идет подбор расходных материалов, инструмента и полировальных подложек, в соответствии с новейшими технологическими достижениями. По желанию заказчика осуществляется сопровождение процессов обработки в течение всего периода ввода установки в эксплуатацию и принятие совместных решений по их модернизации.

Наш опыт использования новейших технологий основан на специфической структуре фирмы FLP Microfinishing GmbH. Предприятие работает в трех направлениях. Среди них машиностроение без сомнения является самым инновационным направлением. Здесь постоянно ведутся разработки конструкций одно- и двухдисковых тонкошлифовальных, доводочных и полировальных станков. Другим важным направлением является изготовление деталей для заказчиков. На 40 станках нашего машинного парка осуществляется процесс обработки на одно- и двухдисковых тонкошлифовальных, доводочных и полировальных станках в трехсменном режиме работы и разрабатывается технология в соответствии со специфическими требованиями заказчика к обработке (предельно допустимые требования к геометрическим параметрам детали и степени шероховатости обработки поверхностей).

В дополнение к этим технологиям мы предлагаем обширный спектр сопровождающих процессов и оборудования. Так, например, FLP Microfinishing GmbH может предложить специальное оборудование в том случае, если к поверхности прецизионного стекла предъявляются высокие требования к точности порядка до ангстрем, а также щеточные станки для обработки и выравнивания кромок, ультразвуковые очистные ванны вплоть до высокоспециализированных автоматических ультразвуковых линий промывки, используемых в научно-исследовательских отделах.

Третья область нашей специализации – это партнерство в мировом масштабе с поставщиками высокоспециализированных расходных материалов, таких как абразивы (карбиды кремния, бора, оксид алюминия), доводочные и полирующие суспензии, а также инструмент и полировальные подложки, которые гарантируют совокупность мирового ноу-хау и настоящего качества, про которое говорят «сделано в Германии».

Ответственный и высокомотивированный состав сотрудников фирмы FLP Microfinishing GmbH, который за много лет работы на предприятии сформировался до высокоспециализированных профессионалов, всегда к услугам российских заказчиков и партнеров по телефону на языке Вашей страны. Через наших компетентных партнеров и опытных сотрудников в России, а также через собственное представительство в Москве мы предоставляем возможность консультаций и сервисных услуг в любое время.

Прекрасные отзывы о стандартных станках, начиная от небольших и средних конструкций и заканчивая специальными станками, которые являются мировым ноу-хау и уникальны в своем исполнении, дополняют хороший имидж фирмы FLP Microfinishing GmbH в российской оптической, авиационной и космической промышленности, а также в области медицинской техники и многих других специальных областях применения, где предъявляются высокие требования к плоскостности, плоскопараллельности и шероховатости поверхностей с точностью порядка до ангстрем.

Точность и инновации – преимущества фирмы FLP Microfinishing GmbH.

Этапы развития специальных полировальных станков

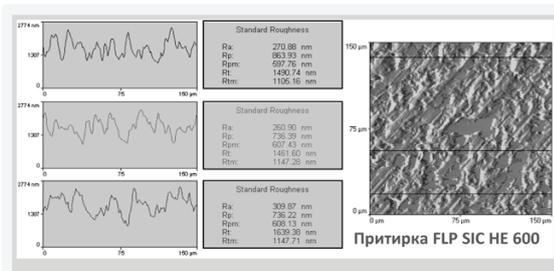




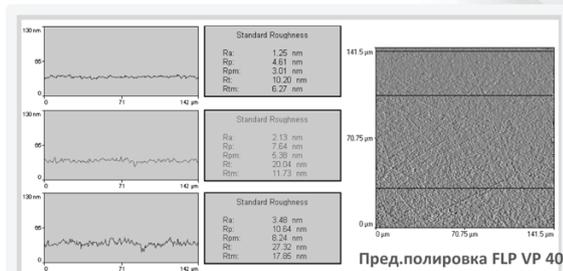
Наши инновации создают Ваше будущее

Многоступенчатая технология для обработки поверхностей высокого класса

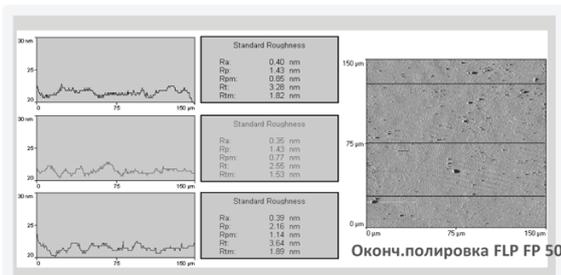
Предварительная обработка с использованием алмазов на полимерной связке
Цель: минимизация глубинных повреждений



Окончательная доводка спец. SiC-зерном FLP HE 600
Цель: Получение микроповреждений без ответвлений



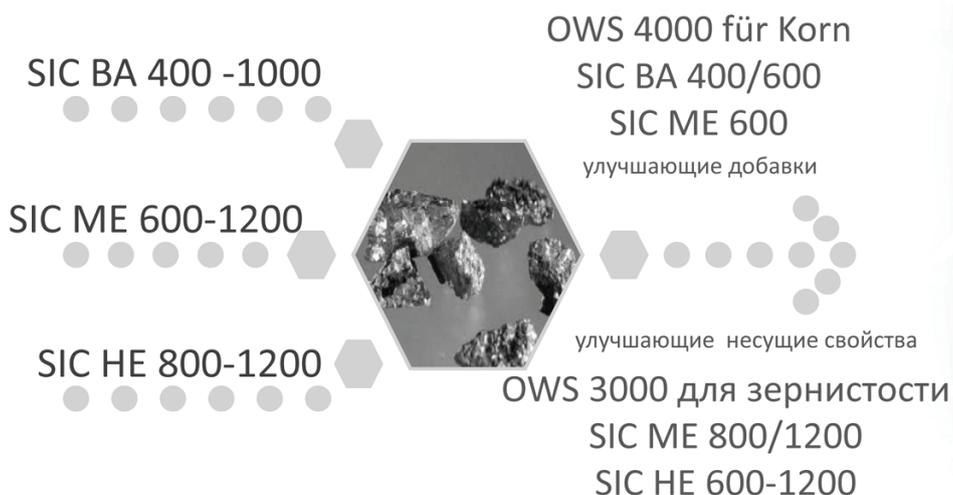
Предварительное полирование микрозерном FLP VD 40
Цель: Выравнивание с минимальными повреждениями



Окончательная полировка CMP(XMP) - суспензией FLP FP 50
Цель: Поверхность с высокими техническими характеристиками

Наши инновации создают Ваше будущее

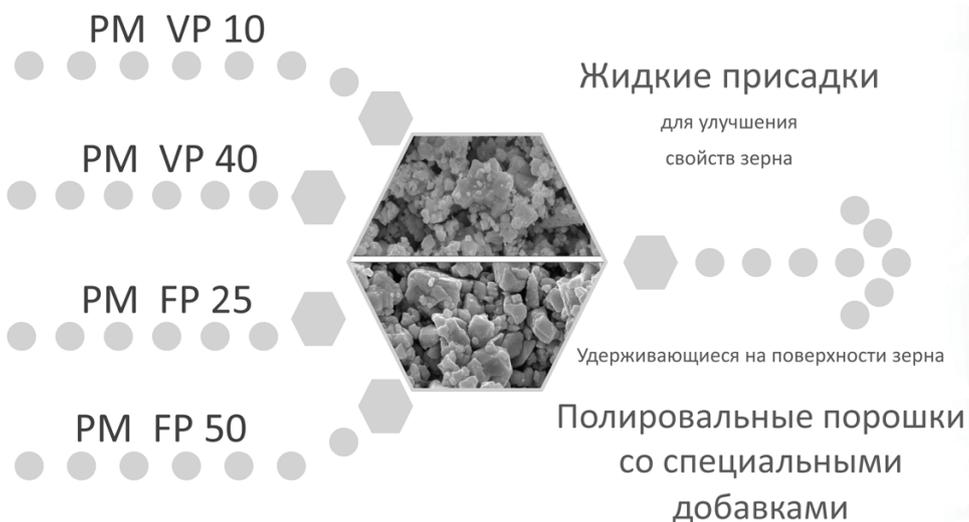
Исходная поверхность и предварительная доводка



- » притирочный круг FLP GM
- » Низкая частота вращения
- » доп.давление 0,5 – 2,3 бар
- » концентрация 75-130 г/л
- » температура 23 °C
- » деминерализованная вода
- » добавки способствующие поддержанию зерна во взвешенном состоянии

Наши инновации создают Ваше будущее

Тонкое- и высокотехнологичное полирование

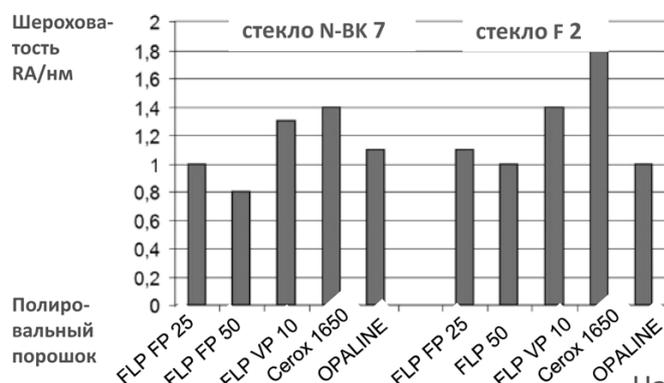
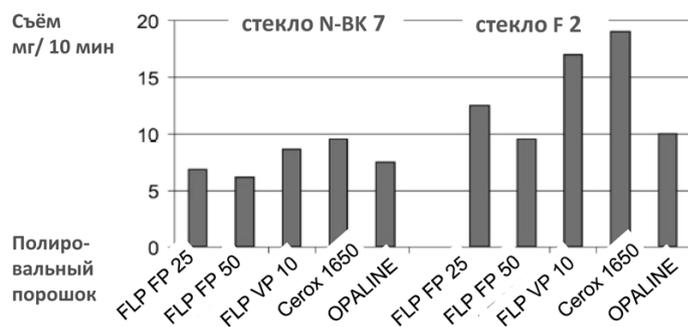


- » полиров. круг 35
- » твердость пол.смолы 38/60
- » низкая частота вращения
- » доп. давление – нет
- » избыток зерна 0,01 % *
- » температура 25-35 °C
- » деминерализованная вода
- » добавка OWS 3000 PM FP 25 ADU
- » добавка OWS 3000 PM FP 50 ADU

*) Лазерная дифракция, наподобие метода распределения осадков

Наши инновации создают Ваше будущее

Данные обработки с использованием различных полировочных составов на специальных полировальных станках



- Полировальный круг FLP GR 35
- Высокая астаота вращения диска
- Средняя частота вращения колец
- Давление < 0,5 бар
- Концентрация 80 г/л
- Температура 32 °С
- Деминерализированная вода
- Добавка – Несущая суспензия

Наши инновации создают Ваше будущее

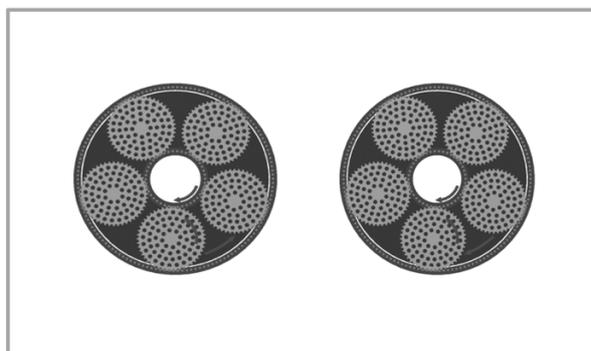
Управление направлением движения полировочного инструмента и рабочего круга



Серия станков HIGH PRECISION FLP 720



Серия станков HIGH PRECISION FLP 1100



Достижение плоскостности рабочего круга

- Диски для закрепления заготовок/ Сепараторы движутся на рабочем круге
- Заготовки располагаются в сепараторах на рабочем круге, движутся по определенной траектории и обеспечивают стачивание диска
- Программируемые сочетания направлений движения и их изменений
- Вогнутая и выпуклая геометрия рабочего круга с высокой степенью точности < 10 λ

Наши инновации создают Ваше будущее

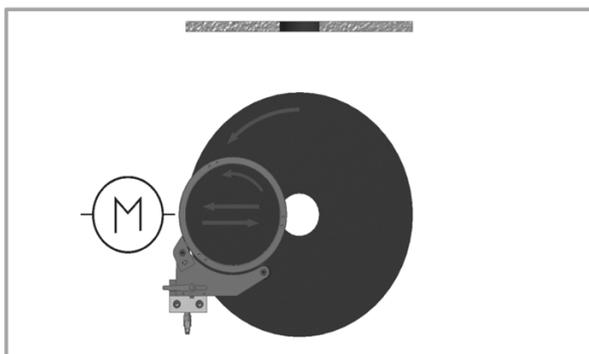
SPS-управление полировочным инструментом



Серия станков SINGLE PRECISION FLP1200



Серия станков SINGLE PRECISION FLP1200



Достижение плоскостности рабочего круга

- кольца Плавающие над полировочным инструментом не контактируют с поверхностью инструмента и смолой
- Программируемое циклическое движение за счет осцилляции удерживающих колец над рабочим кругом
- Программируемые параметры коррекции позволяют использование воспроизводимых интервалов измерения
- Вогнутая и выпуклая геометрия рабочего круга с высокой степенью точности $< 1/30 \lambda$

Наши инновации создают Ваше будущее

Структурирование полирующей поверхности



Наши инновации создают Ваше будущее

Периферийная аппаратура для управления производственными процессами



Фрезерный блок для создания структуры поверхности рабочего круга
Три этапа фрезерования: 1. Придание плоскостности 2. Нарезка канавок
3. Придание шероховатости микроструктуре и создание геометрии круга



Темперирование рабочего инструмента 18-35 °C
+/- 1°C высокая точность регулировки, охлаждение и обогрев,
температурно-изолированный бак с системой циркуляции



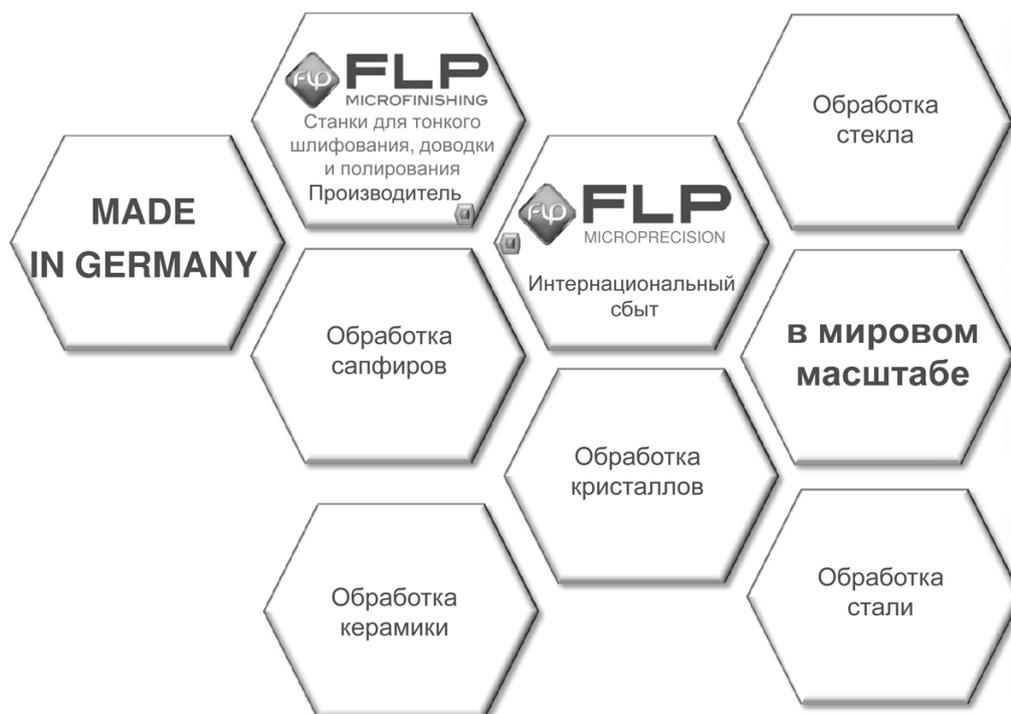
Измерение показателя pH суспензии
мягкое стекло/pH 6-6,5// N-BK7/pH 7-8//кварцевое стекло/pH 8-8,5



Специальные печи для расплавления полировальной смолы
Расплавление полировальной смолы для получения эфирных масел

Наши инновации создают Ваше будущее

Наш многолетний опыт для Вашего успеха



Наши инновации создают Ваше будущее