

## МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ БОРТОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

© 2009 г. Ю. М. Беляков, канд. техн. наук; А. И. Карпов, канд. техн. наук; В. А. Крнев, канд. техн. наук;  
Д. А. Молин

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань

E-mail: moth17@mail.ru

Рассматривается методика построения математических моделей, учитывающих изменение качества изображения бортовых оптико-электронных систем (ОЭС) вследствие воздействия внешних возмущений (температуры, давления, параметров окружающей среды (оптической погоды), уско-рений, моментов) и влияния динамики носителя и систем регулирования, обеспечивающих качество изображения ОЭС. Представлены структура и методика разработки математических моделей на основе итерационной процедуры доопределения параметров этих моделей и динамические модели систем регулирования, обеспечивающих качество изображения ОЭС. Критерием оценки качества изображения служит произведение функций передачи модуляции движения изображения подсистем оптико-электронного тракта ОЭС.

Коды OCIS: 110.3000, 110.4100.

Поступила в редакцию 18.12.2008.

При разработке и создании современных оптико-электронных систем [1–3] возникает проблема разработки адекватных математических моделей (ММ). Чем проще модель, тем она ценнее. Адекватность и простота модели – два противоречивых требования. Поэтому простые адекватные модели – один из путей разработки оптимальных ОЭС по габаритно-массовым и другим техническим характеристикам. Этой проблеме посвящены исследования известных ученых. В работах [4–8] можно найти математические уравнения и моделирование характеристик объектов (целей) и фонов. Экспериментальные данные для построения ММ и моделирования оптической погоды (модель ГИПО) приведены в работах [9, 10]. В работах [1, 3–14] подробно описаны ММ тепловизионных приборов (ТВП), аэрофотоаппаратов (АФА), а также принципы и инженерные методы их описания. Динамические модели летательных аппаратов – носителей ОЭС – приведены в работах [15, 16]. Работы [13–19] посвящены исследованию динамики ММ и идентификации систем управления в пространстве, а также систем регулирования, обеспечивающих качество изображения стратосферных обсерваторий и АФА. ММ и вопросы построения моделей, учитывающие сценарий работы обобщенной модели ОЭС и уровни проектирования, освещены в работах [3, 14, 17, 18].

В настоящей статье в отличие от этих работ рассматривается методика построения математических моделей, учитывающих изменение качества изображения ОЭС, ухудшающегося вследствие воздействия изменения внешних условий во времени ( $t$ ): температуры  $T(t)$ , давления  $P(t)$ , ускорения  $g(t)$ , внешних

моментов  $M_b$ ; а также учитывающих влияние динамики носителя и систем регулирования, отвечающих качеству изображения ОЭС.

### Структура математических моделей

С учетом разработок динамических моделей ОЭС [2, 3, 13, 19–23] и исходя из того, что качество формирования изображения зависит от преобразования оптической информации по всему тракту от предмета (цели) до плоскости изображения (фотопленки, фотоприемников, глаза), предлагается обобщенная ММ ОЭС, схематично показанная на рис. 1. Здесь для пояснения методики разработки ММ ОЭС общего вида представлены три вида систем: приборы ночного видения (ПНВ), ТВП, АФА.

Рассматриваемые ОЭП (рис. 1) представлены в виде совокупности взаимосвязанных ММ. Среди них можно выделить следующие:

- Модели излучателей (Из), модели целей и фонов (ФЦ), модели среды (Ср) в соответствии со временем года и погодными условиями;
- ММ движения в пространстве носителя на низких частотах (НН) и с учетом нежесткости его конструкции на высоких частотах (НВ);
- ММ конструкции ОЭС, включающие в себя низкочастотную модель управления в пространстве (Н) и вибрационную модель (В), теплофизическую модель (ТФ), модель оптики (О) для каждого вида ОЭС;
- ММ систем, обеспечивающих качество изображения ОЭС (СКИ): системы сканирования (Ск), слежения (Сл), системы стабилизации (Сс), системы автоматической фокусировки (СФ), системы тер-

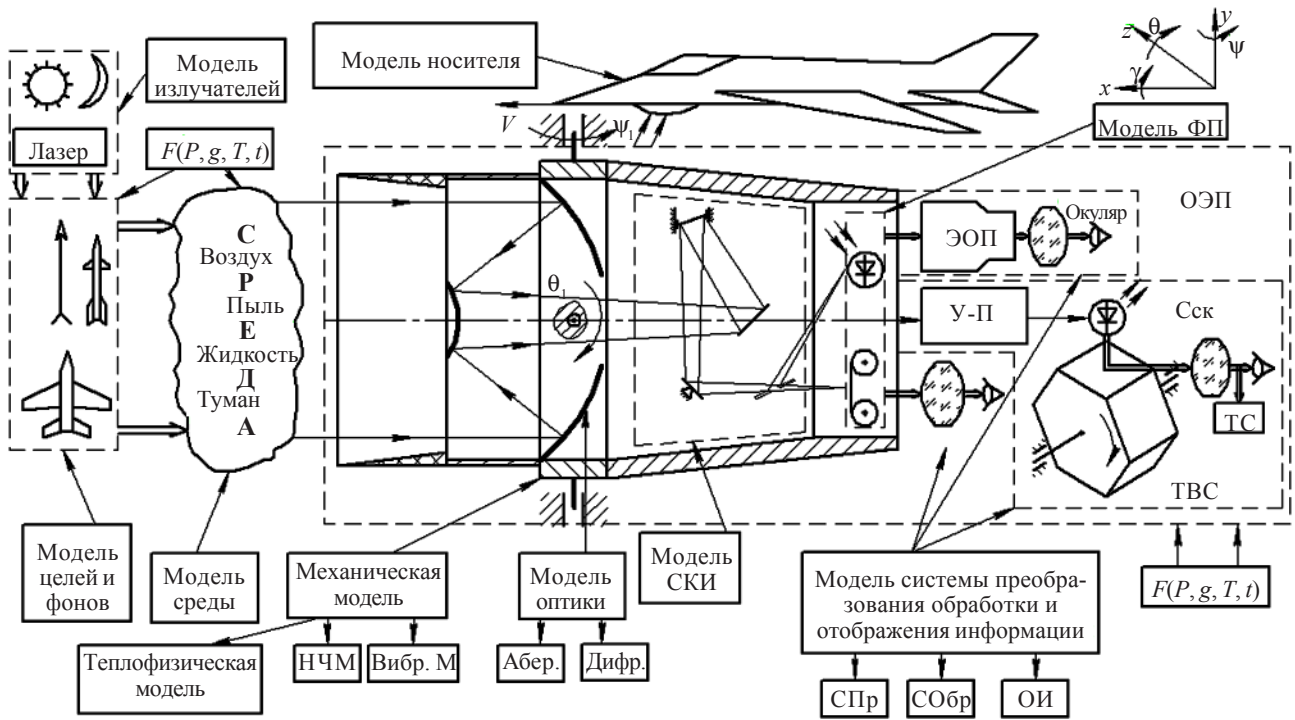


Рис. 1. Структура обобщённой математической модели ОЭС.

морегулирования (ТР), системы панорамирования (СП) и лентопротяжного механизма (ЛМ) перемотки пленки, системы автоматической регулировки экспозиции (РЭ);

– Модели систем преобразования (СПр) и обработки информации (СОбр). К СПр можно отнести электронные усилители, мультиплексоры, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, видеопроцессор, электронно-оптический преобразователь. СОбр включают алгоритмы обработки, системы считывания информации;

– Модели фотоприемников (Ф) в зависимости от вида ОЭС (матричные, фотопленка и проч.), модели систем отображения информации (ОИ) (глаз, дисплеи, проекционные системы).

Вышеперечисленные модели представляются в виде систем дифференциальных, алгебраических и интегральных уравнений, вид и размерность которых зависит от класса решаемых задач, разрешающей способности и тактико-технических требований к ОЭС.

В основе построения ММ ОЭС и оценки их адекватности лежит оценка формирования качества изображения и управления им, определяемая в виде произведения функций передачи модуляции (ФПМ) оптической передаточной функции подмоделей ( $T_i$ ) оптико-электронного тракта в рамках принятых динамических ММ при действующих возмущениях.

Предполагается, что на каждую модель ОЭС действуют возмущения  $F(P, g, T, M_b, t)$ , зависящие от давления ( $P$ ), линейного ускорения ( $g$ ), температуры ( $T$ ), возмущающих моментов ( $M_b$ ) (ветра, дисбаланса, моментов трения) и времени ( $t$ ).

### Методика разработки математических моделей

Методика построения ММ ОЭС основана на использовании итерационной процедуры процесса доопределения параметров моделей по результатам расчетов, экспериментов и идентификации (рис. 2). Методика включает следующие блоки:

– Анализ априорной информации, постановка задачи (1), техническое задание (ТЗ) на разработку ММ (2), проведение расчетов и разработки динамических моделей (расчетных схем) (3); экспериментальные исследования (4, 17). Блоки построения моделей: разработка моделей первого приближения (5, 12) выделенных подсистем в соответствии с рис. 1  $M_{n1}$  ( $n = \text{Из, ФЦ, О, Ф, СПр, СОбр, ОИ}$ ),  $M_{m1}$  ( $m = \text{НН, НВ, В, Н, Ск, Сл, СФ, ТР}$ ), построение и анализ частотных характеристик (ЧХ) полученных моделей (13); вычисление ФПМ: выделенных подсистем  $T_n$  (7) и ОЭС  $T_{\text{ОЭС}}$  (22).

– Блок синтеза: структурный и параметрический синтез регуляторов в частотной области (19).

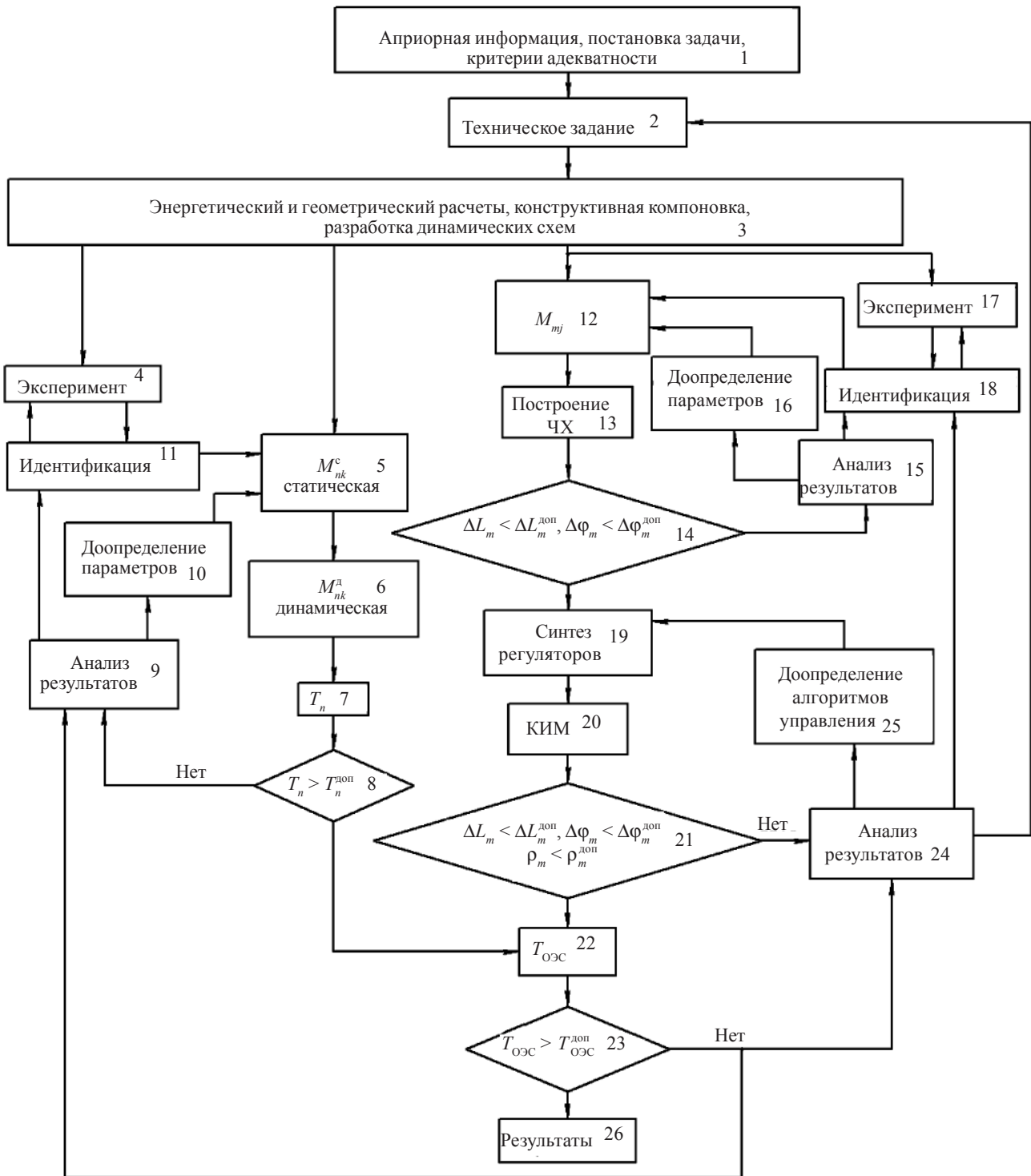


Рис. 2. Схема алгоритма построения математической модели ОЭС.

– Блоки моделирования: разработка компьютерных имитационных моделей (КИМ) (20), реализованных с помощью прикладных программ и исследование динамики во временной области; блоки сравнения (8, 14, 21, 23).

– Блоки анализа результатов (9, 15, 24), включающие в себя обработку полученной информа-

ции, изучения новых явлений и сравнения их с имеющейся информацией, выбор путей дальнейших исследований.

Кроме перечисленного методика включает процедуры исследования с целью уточнения параметров моделей  $M_{nk}$ , ( $k = 2, 3 \dots$ ): 5÷10–5,  $M_{mj}$ , ( $j = 2, 3 \dots$ ): 12÷16–12; процедуры идентификации моделей  $M_{nk}$ ,

( $k = 4, 5 \dots$ ): 9–11–4–11–5÷9,  $M_{mj}$ , ( $j = 4, 5 \dots$ ): 15–18–17–18–12÷15.

Определение параметров и структуры регуляторов производится в процедурах синтеза регуляторов по критерию динамических свойств СКИ  $M_{mj}$ : 19–20–21–24–25–19 (доопределение параметров регулятора частотным методом); 24–18–17–18–12÷14–19÷21–24 (доопределение параметров моделей и алгоритмов управления по результатам идентификации и синтеза). А также в процедурах синтеза регуляторов  $M_{mj}$  и доопределения параметров  $M_{nk}$  по критерию ФПМ (23)  $M_{mj}$ : 23÷25–19÷23–24–18–12÷14–19÷23,  $M_{nk}$ : 23–9–10–5÷9–11–4–11–5÷8–21÷23. Причем для моделей  $M_{nk}$  сначала строим статические модели (5), затем для  $M_{nk}$ ,  $M_{mj}$  – динамические (6, 12). Указанные процедуры уточнения структур и их параметров  $M_{nk}$ ,  $M_{mj}$  проводят до выполнения критериев адекватности (8, 14, 21, 23), которые определяются в зависимости от допустимых значений характеристик и требований ТЗ.

Допустимые значения критериев адекватности ( $T_n^{\text{доп}}$ ,  $T_m^{\text{доп}}$ ,  $\Delta L_i^{\text{доп}}$ ,  $\Delta \varphi_i^{\text{доп}}$ ,  $\rho_i^{\text{доп}}$ ) определяются из опыта разработок или результатов расчетов и экспериментов и могут быть уточнены в процессе исследований моделей. Следует отметить, что в виду сложности динамических моделей  $M_{mj}$ , процедуру уточнения структуры и параметров модели можно упростить. Для этого следует проводить сначала ряд итераций динамических характеристик в частотной области ( $\Delta L_m$  и  $\Delta \varphi_m$  – амплитудные и фазовые невязки частотных характеристик моделей и реальных систем), затем окончательно во временной области ( $\rho_i$  – невязки переходных характеристик замкнутых

систем регулирования или их аналогов и реальных систем) с использованием КИМ. Процедура доопределения параметров моделей также может быть прекращена, если условие (23) не выполняется и новая информация при этом не выявляется (т. е. не находится решение, обеспечивающее выполнение условия (23)). Тогда следует идти на изменение ТЗ (23–24–2). Если (23) выполняется, то процедура разработки модели ОЭС заканчивается выдачей полученных параметров и структуры субмоделей, выбранных в соответствии с рис. 1.

Приведенная методика имеет хорошую сходимость итераций для ОЭС, имеющих слабые перекрестные связи между выделенными подсистемами.

Следуя работам [1, 12, 14] представим ФПМ рассматриваемого типа ОЭС ( $T_{\text{ОЭС}}(\rho_0)$ ) в виде

$$K_{\text{из}} = T_{\text{ОЭС}}(\rho_0) K_{\text{фц}}, \quad T_{\text{ОЭС}}(\rho_0) = \prod_{i=1}^N T_i(\rho_0) \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – относительная пространственная частота,  $K_{\text{из}}$  – контраст изображения, формируемого ОЭС,  $K_{\text{фц}}$  – контраст цели с учетом фонов, полученных из соответствующих моделей,  $i$  – составляющие ФПМ моделей, полученные в результате доопределения параметров  $M_{nk}$ ,  $M_{mj}$ .

Исходя из предельного значения  $K_{\text{из}}$  и заданного контраста фоноцелевой обстановки  $K_{\text{фц}}$  можно в силу выражения (1) определить требования к ФПМ ОЭС  $T_{\text{ОЭС}}^{\text{доп}}$ . Выбор математического описания ФПМ подсистем рассматриваемых ОЭС и расчет их функций  $T_i(\rho_0)$  проводим в соответствии с алгоритмом на рис. 3, используя результаты работ [1, 12, 14], где подробно приводятся условия их применения.

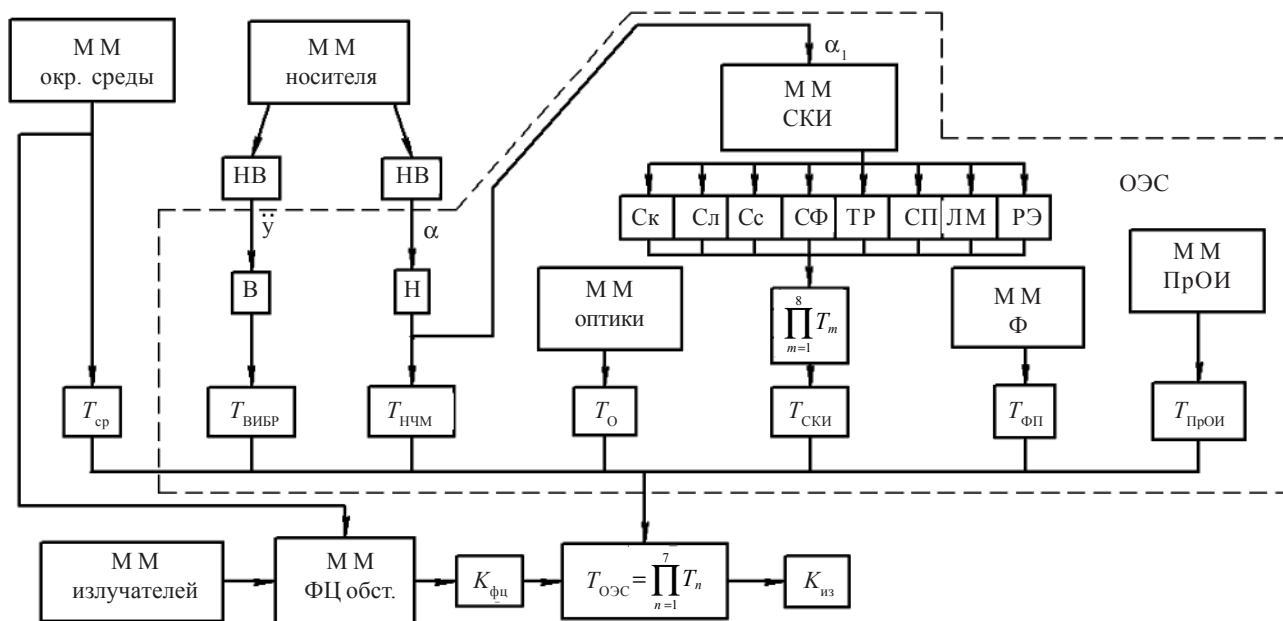


Рис. 3. Структурная схема алгоритма оценки качества изображения ОЭС.

## Динамические модели систем, обеспечивающих качество изображения ОЭС и их ФПМ движения изображения

При построении математических моделей систем  $M_{mj}$ , обеспечивающих качество изображения, необходимо учитывать динамические взаимосвязи между носителем и объектами управления (зеркало, призма, объектив и др.). Для этого динамические уравнения записываются в форме Лагранжа 2-го рода для механических систем и Лагранжа–Максвелла для электромеханических систем [24]. Уравнения движения сложных оптико-механических систем, уточненные по результатам эксперимента и идентификации можно найти в работах [2, 19–23, 25]. Приведем математические модели разработанных ОЭС.

Математическая модель автоматической стратосферной обсерватории (СО), предназначенной для исследования тонкой структуры фотосферы Солнца в режиме прецизионной стабилизации в пространстве [19, 21]

$$\left. \begin{aligned} (Ap^2 + Bp + C)\mathbf{x} &= K\mathbf{U} + \mathbf{M}(t), \\ \mathbf{U} &= R_1(p)\Delta + R_2(p)\mathbf{x}, \quad \Delta = D(\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{x}), \quad \mathbf{V} = Qp\mathbf{x} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $A, B, C$  – постоянные квадратичные матрицы порядка  $n = 17$ ,  $R_1(p), R_2(p)$  – полиномиальные матрицы размером  $5 \times 5$ ,  $K$  – матрица-столбец,  $D, Q$  – матрицы-строки,  $\mathbf{x}$  – вектор обобщенных координат движения системы,  $\mathbf{M}(t)$  – вектор возмущений,  $\mathbf{U}$  – вектор управления,  $\Delta$  – вектор рассогласования,  $\mathbf{V}$  – вектор скорости движения изображения,  $\boldsymbol{\alpha}$  – вектор входных воздействий,  $p = d/dt$ . Полученная по результатам идентификации адекватная реальной системе ММ СО и проведенный синтез регуляторов, также моделирование системы автоматического управления СО в пространстве, систем автоматической фокусировки и терморегулирования позволили обеспечить стабилизацию качества изображения Солнца с точностью: по скорости –  $10 \div 25''/с$  и по углу –  $2,5 \div 4''$ , что позволило реализовать разрешение телескопа (диаметром входного зрачка 1 м) и получить уникальные снимки фотосферы Солнца [20].

Система автоматического панорамирования и двухдвигательная система лентопротяжного механизма панорамного АФА, ММ которых совместно с регулятором представляет собой нелинейную систему 21-го порядка [23]

$$\left[ \begin{aligned} A(x, t)p^2 + B(x, t)p + C(t) \mathbf{x} &= K(t)\mathbf{U} + \mathbf{M}(t), \\ \mathbf{U} &= R_1(p)\mathbf{V} + R_2(p)\mathbf{x}, \quad \mathbf{V} = Qp(\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{x}) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где обозначения аналогичны (2).

Вибрационные математические модели оптико-механических систем с учетом упругости конструк-

ции [25, 26] представлены системами линейных дифференциальных уравнений высокого порядка, решение которых сводится к нахождению вынужденных движений:  $x_i = x_{0i} \sin(\omega_i t + \varphi_{xi})$ ,  $y_i = y_{0i} \cos(\omega_i t + \varphi_{yi})$ , ( $i = 1 \dots n$ ), где  $x_i, y_i$  – проекции вибрационного смещения изображения на ортогональные оси в фокальной плоскости,  $\omega_i, \varphi_{xi}, \varphi_{yi}$  – частоты и фазы резонансных колебаний,  $2n$  – порядок уравнений.

ФПМ движения изображения, определяемого точностью работы СКИ ОЭС, можно оценить [12, 14]

$$T(N_p) = \sin(\pi V_p \tau N_p) / (\pi V_p \tau N_p), \quad (4)$$

где  $N_p = \sqrt{N_x N_y}$ ,  $V_p = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ ,  $\tau$  – время экспозиции,  $N_x, N_y$  – пространственные частоты,  $V_x, V_y$  – проекции вектора  $\mathbf{V}$  на ортогональные оси в фокальной плоскости ОЭС в установившемся движении.

ФПМ для вибрационного смещения изображения ОЭС, содержащего спектр из  $n$  гармоник, оценивается

$$T_B(N_p) = J_0(\pi a_p N_p), \quad a_p = \sum_{i=1}^n \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \quad (5)$$

где  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка,  $a_p$  – амплитуда гармонических колебаний смещения изображения.

## Заключение

Предложена методика разработки математических моделей, позволяющая решать следующие задачи разработки ОЭС: идентификацию моделей и их параметров, параметрический синтез автоматических систем, обеспечивающих качество изображения в рабочих режимах и условиях работы, соответствующих этим режимам, а также исследование динамики бортовых автоматических ОЭС с помощью компьютерных технологий и оценку качества их изображения, используя ФПМ. Предложенная методика позволит приблизиться к проблеме построения адекватных реальным системам математических моделей, что даст возможность сократить сроки и повысить качество разработки ОЭС.

Приведены примеры математических моделей систем, обеспечивающих в динамике требуемое качество изображения АФА и СО, полученное на основе предложенной методики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: изд. ФНИЦ НПО ГИПО, 2006. 592 с.
2. Карпов А.И., Стрелнев В.А. Построение динамических моделей и идентификация в задачах исследования дина-

- мики сложных систем // Теория устойчивости и ее приложения. Новосибирск: Наука, СО, 1979. С. 264–277.
3. *Беляков Ю.М., Карпов А.И., Молин Д.А., Лейченко Ю.А.* Обобщенная математическая модель автоматических бортовых ОЭС наблюдения // Тез. докл. третьего междунар. форума “Оптика-2007”. М.: изд. ВВЦ, 2007. С. 31–32.
  4. *Непогодин И.А.* Отражательные характеристики, информативность признаков (сигнатур) объектов и фонов в лазерной локации // НПО ГИПО. Научн.-техн. сб. Казань: Дом печати, 1997. С. 428–458.
  5. *Непогодин И.А., Козенко А.А.* Статистическая модель эффективной площади рассеяния тел в оптическом диапазоне // Импульсная фотометрия. Л. 1984. В. 8. С. 21–25.
  6. *Непогодин И.А.* Критерии и метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерной локации // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 55–64.
  7. *Алексеев О.А.* Аналитическая модель спектральной плотности силы излучения осесимметричного турбулентного факела и определение ее параметров // НПО ГИПО. Научн.-техн. сб. Казань: Дом печати, 1997. С. 458–468.
  8. *Москаленко Н.И.* Моделирование переноса излучения и лучистого теплообмена в атмосферах // НПО ГИПО. Научн.-техн. сб. Казань: Дом печати, 1997. С. 475–504.
  9. *Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П.* Оптическая погода в нижней тропосфере. Казань: Дом печати, 1998. 251 с.
  10. *Филиппов В.Л., Иванов В.П., Колобов Н.В.* Динамика оптической погоды. Казань: изд. Госуниверситета, 1986. 157 с.
  11. *Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А.* Основы теории анализа и синтеза тепловизионной аппаратуры. Казань: изд. Казанского университета, 2000. 252 с.
  12. *Мельканович А.Ф.* Фотографические средства и их эксплуатация. М.: изд. Министерства обороны СССР, 1984. 576 с.
  13. *Михалицын А.В.* Оценка точности стабилизации скорости движения пленки панорамного аэрофотоаппарата // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 3. С. 42–46.
  14. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы “смотрящего” типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
  15. *Боднер В.А.* Теория автоматического управления полетом. М.: Наука, 1964. 561 с.
  16. *Красовский А.А.* Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973. 498 с.
  17. *Максимова Н.Ф., Сагитов К.И., Якушенков Ю.Г.* Компьютерная модель тепловизионной системы // Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений. В. 1. М.: ЦНИИ “Циклон”, 2001. С. 133–138.
  18. *Торшина И.П.* Особенности составления субмодели “сценарий” при компьютерном моделировании ОЭС // Тез. докл. третьего междунар. форума “Оптика-2007”. М.: ВВЦ, 2007. С. 49.
  19. *Данилов А.М., Дулькин Л.З., Земляков А.С.* Динамика стратосферной обсерватории // Управление в пространстве. Т. 1. М.: Наука, 1975. С. 208–228.
  20. *Данилов А.М., Дулькин Л.З., Земляков А.С.* Динамика и управление внеатмосферными астрономическими обсерваториями // Управление в пространстве. Т. 1. М.: Наука, 1976. С. 153–171.
  21. *Дулькин Л.З., Земляков А.С., Карпов А.И., Матросов В.М., Стрежнев В.А.* Задачи инвариантности и устойчивости в динамике стратосферных обсерваторий // Метод функций Ляпунова в динамике нелинейных систем. Новосибирск: Наука, СО, 1983. С. 157–178.
  22. *Карпов А.И., Стрежнев В.А.* К построению упрощенных математических моделей в задачах динамики оптико-электронных систем // Проблемы аналитической механики, устойчивости и управления движением. Новосибирск: Наука, СО, 1991. С. 231–236.
  23. *Карпов А.И., Кренин В.А., Михалицын А.В.* Параметрический синтез систем панорамирования, подачи и намотки пленки аэрофотоаппарата // Сб. тр. IX Четаевской конференции “Аналитическая механика, устойчивость и управление движением”. Т. 4. Иркутск. 2007. С. 96–104.
  24. *Левитский Н.И.* Колебания в механизмах. М.: Наука, 1988. 483 с.
  25. *Стрежнев В.А., Мубаракзянов Г.М., Хайруллин И.Х.* Об исследовании динамики оптико-механических систем с учетом упругости конструкции // Проблемы аналитической механики, устойчивости и управления движением. Новосибирск: Наука, СО, 1991. С. 264–271.
  26. *Гайфутдинова А.Н., Карпов А.И., Скимель В.Н., Стрежнев В.А.* Об исследовании вынужденных колебаний упругих моделей оптико-механических систем // Управляемые механические системы. Иркутск. 1986. С. 59–63.