

УДК 621.375. (075.8)

Методика разработки и испытаний систем управления и виброзащиты бортовых оптико-электронных приборов

© 2021 г. **В. А. Балоев***, канд. техн. наук; **К. А. Бурдинов****;
А. И. Карпов***, канд. техн. наук; **В. А. Кренин*****, канд. техн. наук;
А. Е. Смирнов*; **В. С. Яцык***, канд. техн. наук

*Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»,
Казань, Республика Татарстан

**Университет Иннополис, г. Иннополис, Республика Татарстан

***Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
Казань, Республика Татарстан

E-mail: gipo@telebit.ru

Поступила в редакцию 18.09.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-03-24-36

Рассматриваются алгоритмы и методики разработки, синтеза регуляторов системы автоматического управления, исследования динамики и испытаний систем виброзащиты и управления бортовыми оптико-электронными приборами в виде пяти основных интерактивных замкнутых процедур от анализа технического задания до испытаний на борту.

Ключевые слова: методика, динамика, идентификация, декомпозиция, система виброзащиты, система автоматического управления, математическая модель, компьютерные технологии, стабилизация изображения.

Коды OCIS: 230.0230, 120.0120, 350.0350, 130.6750, 220.4830

ВВЕДЕНИЕ

Оптико-электронные приборы (ОЭП) в составе комплексов наземного, авиационного, морского и космического базирования широко применяются при решении народнохозяйственных задач и задач обороны и безопасности.

С целью повышения информативности используются комплексированные бортовые оптико-электронные системы (БОЭС), включающие в себя каналы наблюдения и зондирования в видимом и инфракрасном диапазонах спектра [1–4]. Несмотря на интенсивное развитие теории и практики проектирования автоматических БОЭС, влияние целого ряда технических характеристик на качество по-

лучаемой оптической информации формализовать в виде строгих соотношений (условий) не удастся. В частности, существенный интерес представляют вопросы связи динамики и качества управления с характеристиками каналов наблюдения в режимах сканирования, наведения и слежения [2–10, 11, 12]. В развитие работ [2, 5, 6, 10] в данной статье рассматривается методика разработки и испытаний систем автоматического управления (САУ) и виброзащиты (ВЗ) БОЭС с использованием замкнутых итерационных процедур исследования от разработки расчетных схем, математических моделей до испытаний на борту носителя включительно.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ

Разработка системы ВЗ и САУ бортового оптико-электронного прибора (БОЭП) начинается в соответствии с отраслевыми стандартами и техническим заданием (ТЗ) с выбора приемлемых вариантов. Для этого сначала решается многокритериальная задача оптимизации выбора принципа построения и схемы реализации БОЭП [7, 12, 13] с учетом ряда противоречивых технико-экономических требований [5, 7]. Критерий выбора приемлемого (i) варианта можно определить по формуле

$$k_i = \min \sum_{j=1}^n \gamma_{ji} a_{ji}, (i = m), \quad (1)$$

где m — число вариантов, n — число технико-экономических параметров, γ_{ji} — весовые коэффициенты, a_{ji} — технико-экономические параметры: точность САУ — a_1 , полосы пропускания САУ и ВЗ — a_{21} , a_{22} , качество изображения — a_3 , время экспозиции — a_4 , потребляемая энергия — a_5 , надежность — a_6 , массовые и геометрические характеристики объекта управления [5, 12, 14] — a_7 , стоимость — a_8 , конкурентоспособность — a_9 , характеристики объектива — a_{10} и приемника излучения — a_{11} и проч. Весовые коэффициенты и параметры определяются методом экспертных оценок специалистов с учетом опыта и необходимых предварительных расчетов и исследований. Для выбранных приемлемых вариантов системы ВЗ и САУ (одного или двух) проводится исследование их динамики. За критерии качества САУ и систем ВЗ принимают совокупность динамических характеристик каналов управления и системы ВЗ, удовлетворяющих условиям

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_k &\leq \Delta\alpha_k^{\text{adm}}, \Delta\dot{\alpha}_k \leq \Delta\dot{\alpha}_k^{\text{adm}}, \\ M_V &\leq 1,05-1,25, |\Delta\varphi_k| \geq (45-60)^\circ, \\ |\Delta L_k| &\geq 6 \text{ дБ}, \Delta\omega_k \leq \Delta\omega_k^{\text{adm}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta\alpha_k^{\text{adm}}$, $\Delta\dot{\alpha}_k^{\text{adm}}$, $\Delta\alpha_k$, $\Delta\dot{\alpha}_k$ — допустимые и установившиеся значения динамических погрешностей САУ и систем ВЗ по углу и угловой скорости при действии возмущений, полученных в условиях, близких к реальной эксплуатации БОЭП, $k = 1, 2, \dots$ — номера каналов управления и ВЗ, M_V — показатели ко-

лебательности, $\Delta\varphi_k$, ΔL_k — запасы устойчивости по фазе и амплитуде, $\Delta\omega_k$, $\Delta\omega_k^{\text{adm}}$ — измеренная и допустимая полосы пропускания частот системы ВЗ и САУ [6, 15].

Согласно предлагаемой методике алгоритм разработки системы ВЗ и системе САУ, исследования их динамики и испытаний представлен в виде пяти основных последовательных интерактивных замкнутых процедур с использованием 28-ми блоков разработки и испытаний (рис. 1).

1) Оценка функции передачи модуляции (ФПМ) и допусков к САУ и ВЗ, разработка расчетных и математических моделей, идентификация и декомпозиция с применением компьютерных технологий: блоки 1-2-3-4-5-6-7 (рис. 1). Проводится интерактивный синтез конструктивных параметров ОЭП или отдельной его части (например, зеркало в кардановом подвесе [5]) как объектов управления, системы ВЗ и алгоритмов управления изолированных каналов САУ частотным методом [6, 14] до выполнения критериев качества (2), что соответствует блокам 8-9-10-23-8 на рис. 1.

2) Разработка, изготовление масштабного динамического макета [16] с использованием 3D-принтера (или обычными технологическими средствами). Исследуется динамика движения этого макета (блоки 11-12-13 на рис. 1), и при необходимости проводятся последовательно циклы итерационных исследований динамики, состоящих из блоков 13-22-11-12-13, 13-22-23-8-9-10-11-12-13, 13-22-28-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13 (рис. 1), до обеспечения критериев качества (2).

3) Разработка компьютерных имитационных моделей и исследование пространственных линейных и нелинейных моделей с применением MATLAB — блоки 14-15-16 (рис. 1). Если критерии (2) не выполняются, то переходим на 3-й цикл последовательных итераций, состоящий из блоков 16-24-23-8-9-10-11-12-13-14-15-16, 16-24-28-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16 (рис. 1), при этом доопределяем степени свободы математических моделей САУ и системы ВЗ и их параметры путем последовательных предыдущих итераций до выполнения критериев (2). Также доопределяются ограничения и нелинейности в контурах управления, приемлемые варианты построения и, в случае необходимости, уточняются

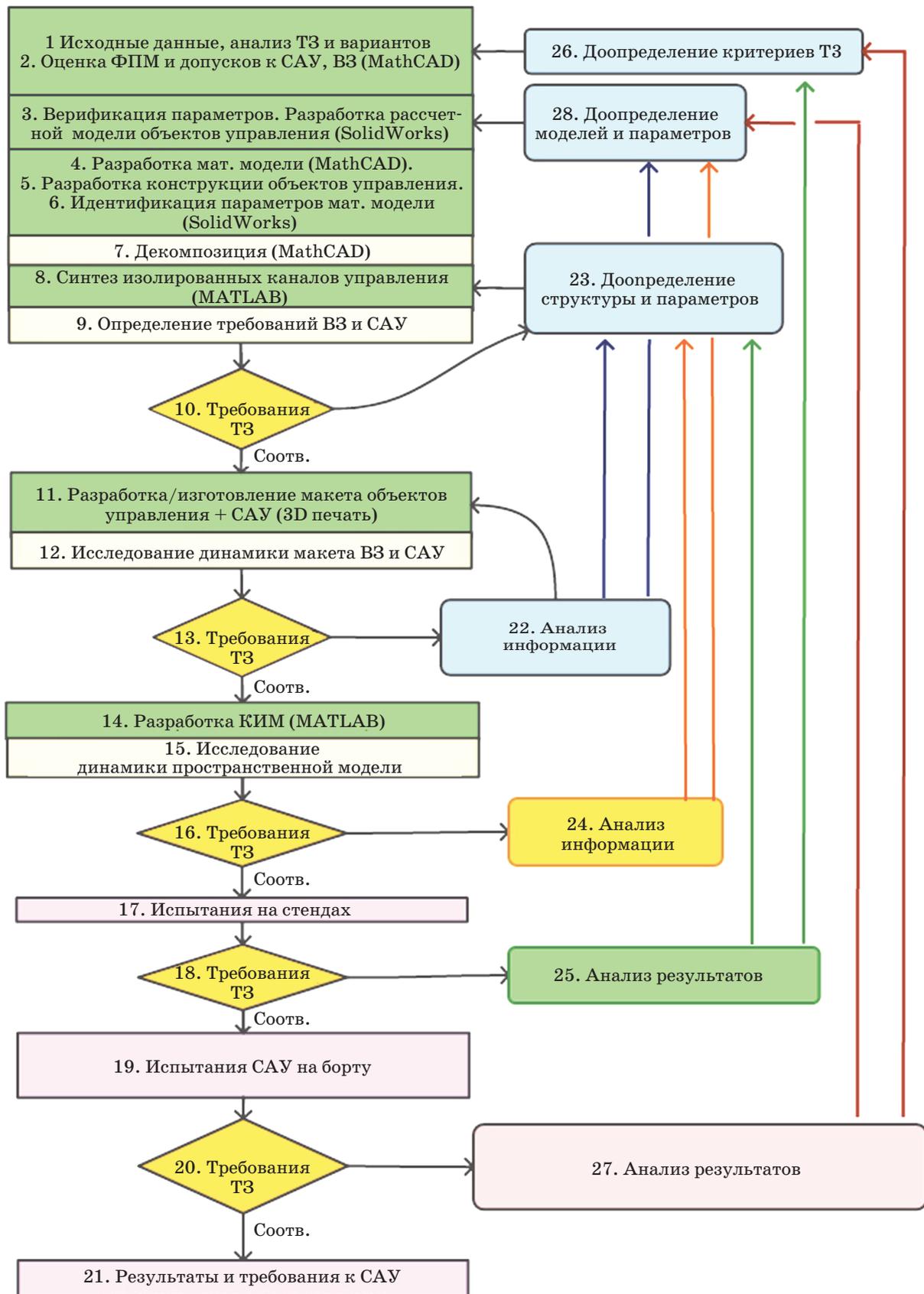


Рис. 1. Блок-схема методики разработки и испытаний САУ и системы ВЗ.

критерии (2) и задачи, которые может решать ОЭП. По результатам исследования делается заключение о необходимости конструктивных разработок опытного образца САУ и системы ВЗ.

4) Испытание опытного образца на стендах [17, 18] в соответствии с методиками испытаний, требованиями ТЗ, техническими условиями (ТУ), программой и методикой испытаний и воздействиями соответствует блоку 17 (рис. 1).

Здесь используются виброиспытательные комплексы, вибрационные стенды и стенды для имитации низкочастотных колебаний. Стендовые вибрационные испытания включают определение резонансов конструкции и испытание на виброустойчивость (контрольные испытания с учетом резонансов конструкции). Если критерии (2) не выполняются, то переходим на 4-й цикл последовательных итерационных процедур, состоящий из блоков 18-25-23-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18, 18-25-26-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18 (рис. 1) до выполнения критериев (2), ТУ, ТЗ. При необходимости проводят 1-й, 2-й, 3-й циклы исследований. Результаты испытаний отражаются в протоколе и делается заключение о необходимости доработок системы ВЗ и САУ и проведения повторных испытаний или допуске их к испытаниям на борту.

5) Испытания на борту в соответствии с методиками натурных испытаний и требованиями ТЗ [17] — блоки 19-20-21 (рис. 1). Если критерии (2) не выполняются, то переходим на 5-й цикл итераций, состоящий из блоков 20-27-28-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18-19-20, 20-27-26-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18-19-20 (рис. 1), с использованием 1–4 циклов (по необходимости). Результаты испытаний и требования к техническим характеристикам системы ВЗ и САУ фиксируются в протоколе испытаний и делается заключение о необходимости доработок системы ВЗ и САУ или допуске их к дальнейшему производству.

Приведенная методика была апробирована при разработке ряда САУ ОЭП [5, 6, 12]. Каждому из блоков на рис. 1 присущи своя специфика, математическое или логическое описание и соответствующая методика реализации. Сущность особенностей некоторых из них раскроем далее.

ОЦЕНКА ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА И ДОПУСКА НА ТОЧНОСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Выполнение задач наблюдения, фотографирования, определение координат неподвижных и движущихся объектов наблюдения в режимах сканирования и слежения возлагаются на управляемые БОЭП, которые могут находиться в довольно жестких внешних условиях: силовые нагрузки ($4g-10g$), угловые ускорения ($1,5 \text{ рад/с}^2$) и скорости (1 рад/с), температурные воздействия ($-60 - +60 \text{ }^\circ\text{C}$), вибрации до 2000 Гц . Воздействие внешних условий, а также остаточные погрешности САУ и ВЗ, обеспечивающие выполнение указанных задач, приводят к смещению изображения, т.е. к изменению структуры изображения (ухудшению качества изображения) объектов наблюдения аналогично влиянию аберраций, зависящих от значения и характера изменения динамических погрешностей САУ и внешних воздействий. Наиболее существенное изменение качества изображения происходит из-за смещения изображения от действия вибраций (α_v), расфокусировки и динамических погрешностей систем сканирования и слежения, управляющими воздействиями которых являются колебания носителя (α_1, α_2) и движение (α_3) вида

$$\alpha_1 = A_1 \sin \omega_1 t, \alpha_2 = A_2 \sin \omega_2 t, \\ \alpha_3 = V_T t, \alpha_3(0) \neq 0, \alpha_v = A_v \sin \omega_4 t, \quad (3)$$

где t — время, V_T — угловая скорость объектов наблюдения относительно носителя, A_1, A_2 — амплитуды колебаний носителя, A_v — амплитуда вибраций, ω_1, ω_2 — частоты колебаний носителя, ω_4 — частоты вибраций.

В связи с этим для синтеза САУ и системы ВЗ необходимо определить допустимые динамические погрешности САУ и вибрационного смещения изображения системы ВЗ, обеспечивающие выполнение задач наблюдения и фотографирования объектов наблюдения в процессе сканирования и слежения [2, 6, 17].

Для изучения процесса формирования изображения с учетом множества факторов, влияющих на формирование, преобразование и передачу изображения, рассмотрим функциональную схему одного из вариантов ОЭП (рис. 2), представляющую взаимосвязь движения объ-

ектов наблюдения, носителя, окружающей среды, формирующей оптики, управляющих устройств, фотоприемника, систем терморегулирования, преобразования и обработки информации в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра. В результате действия внешних возмущений, идущих от носителя, и наличия САУ и ВЗ остается компенсированный сдвиг изображения (динамическая погрешность), ухудшающий качество изображения.

Для оценки допуска на точность стабилизации изображения воспользуемся частотным критерием качества изображения ОЭП — ФПМ [1, 2, 19, 20]. Оценка качества изображения БОЭП определяется на основе анализа произведения ФПМ элементов оптико-электронного тракта (рис. 2, 3), формирующего изображение и влияющих на качество изображения, и выполнения условий

$$T_{\text{OED}}(\nu) = T_A(\nu)T_{\text{OS}}(\nu)T_D(\nu)T_C(\nu)T_S(\nu) > T_{\text{OED}}^{\text{adm}}(\nu), \quad (4)$$

$$T_{\text{CS}}(\nu) = T_L(\nu)T_G(\nu)T_V(\nu)T_{\text{AF}}(\nu) > T_{\text{CS}}^{\text{adm}}(\nu) = T_{\text{OED}}^{\text{adm}}(\nu)/T_{\text{ST}}(\nu), \quad (5)$$

$$T_{\text{ST}}(\nu) = T_A(\nu)T_{\text{OS}}(\nu)T_D(\nu)T_C(\nu)T_S(\nu), \quad (6)$$

где ν — пространственная частота (рад^{-1}), $T_{\text{OED}}(\nu)$ — ФПМ ОЭП, $T_{\text{OED}}^{\text{adm}}(\nu)$ — допустимая ФПМ ОЭП, $T_A(\nu)$ — ФПМ атмосферы, $T_{\text{OS}}(\nu)$ — ФПМ объектива, $T_D(\nu)$ — ФПМ фотоприемника, $T_C(\nu)$ — ФПМ преобразования оптической информации, вид которых можно найти в публикации [1], $T_S(\nu)$ — ФПМ монитора, $T_{\text{CS}}(\nu)$ — ФПМ сдвига изображения (динамических погрешностей САУ и ВЗ), зависящая от 4-х составляющих динамического смещения изображения, включающая в себя $T_L(\nu)$ — ФПМ линейного смещения, $T_G(\nu)$ — ФПМ гармонического смещения, $T_V(\nu)$ — ФПМ случайного или вибрационного смещения, $T_{\text{AF}}(\nu)$ — ФПМ системы фокусировки, $T_{\text{ST}}(\nu)$ — групповая ФПМ с медленно-меняющимися параметрами блоков ОЭП.

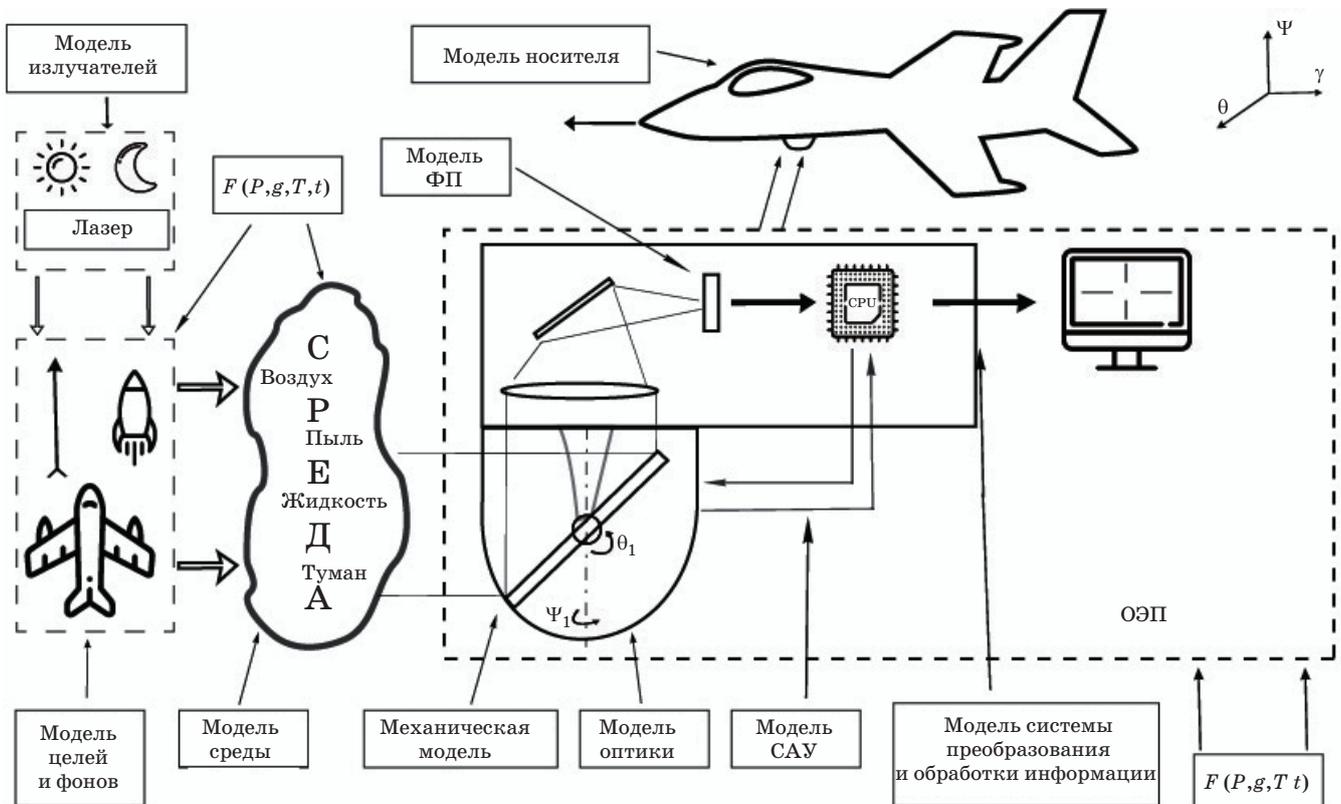


Рис. 2. Функциональная схема модели ОЭП. $F(P, g, T, t)$ — функция возмущений, где P — атмосферное давление, g — земное ускорение, T — температура, t — время; ФП — фотоприемник.

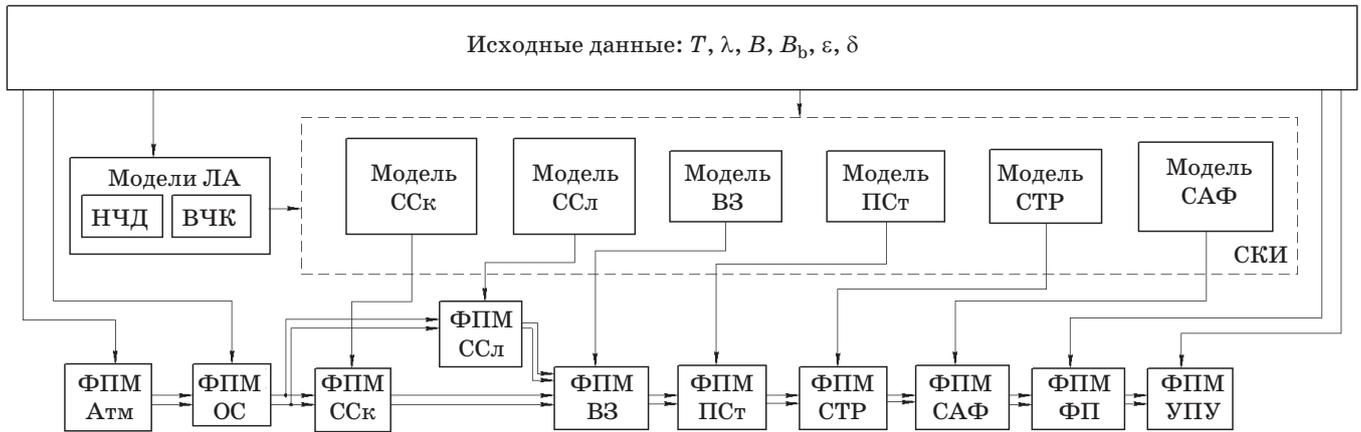


Рис. 3. Функциональная схема моделирования ФПМ БОЭП. Атм — атмосфера, ОС — оптическая система, ССк — система сканирования, ССл — система слежения, ВЗ — система виброзащиты, ПСт — прецизионная система стабилизации, СТР — система терморегулирования, САФ — система автоматической фокусировки, ФП — фотоприемник, УПУ — усилительно-преобразовательное устройство, НЧД — низкочастотные движения, ВЧК — высокочастотные колебания, T — температура, λ — длина волны, B, B_0 — яркости объекта наблюдения и фона, ε — угловые ускорения, δ — точность функционирования.

Можно оценить допустимые ФПМ $T_{\text{OED}}^{\text{adm}}(\nu)$ ИК системы [8] и малоразмерного источника излучения [21] соответственно

$$T_{\text{OED}}^{\text{adm}}(\nu) = \exp(-2\pi^2\sigma^2\nu^2), \sigma = 0,55 \text{ рад}, \quad (7)$$

$$T_{\text{OED}}^{\text{adm}}(\nu) = \frac{\nu\gamma_s}{2\sin\left(\frac{\nu\gamma_s}{2}\right)} \exp\left[-\frac{(\nu\gamma_p)^2}{16\ln(2m)}\right], \quad (8)$$

$$\Phi(\chi) = 1 - 2P_F, \quad \Phi(m - \chi) = 2P_T - 1,$$

где χ — пороговый уровень обнаружения, m — отношение сигнал/шум, P_T, P_F — вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги, γ_s — угловой размер источника излучения, γ_p — угловое разрешение ОЭП,

$$\Phi(\chi) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp[-0,5t^2] dt$$

— интеграл вероятности.

Считая, что за время получения одного или нескольких кадров съемки (одной сцены объектов наблюдения [3]) ФПМ $T_{\text{ST}}(\nu) = \text{const}$ (6), потребуем на первом этапе разработки, чтобы доля влияния каждой (j) подсистемы САУ и системы ВЗ на качество изображения была одинакова, тогда их допустимые ФПМ определяются как

$$T_j^{\text{adm}}(\nu) = \sqrt[4]{T_{\text{OED}}^{\text{adm}}(\nu)/T_{\text{ST}}(\nu)}. \quad (9)$$

Систему автоматического управления, состоящую из 3-х подсистем (ССк, ССл, САФ) и систему ВЗ, обеспечивающие качество изображения в процессе сканирования и слежения БОЭП, в зависимости от вида движения изображения их ФПМ представим следующими выражениями (рис. 4а) [1, 19]:

$$T_L(\nu_x) = \frac{\sin(\pi(\Delta\alpha_L)\nu_x)}{\pi(\Delta\alpha_L)\nu_x}, \quad (10)$$

$$T_G(\nu_x) = J_0(2\pi(\Delta\alpha_G)\nu_x),$$

$$T_V(\nu_x) = \exp\left[-2(\pi(\Delta\sigma_V)\nu_x)^2\right], \quad (11)$$

$$T_{\text{AF}}(\nu_x) = 2J_1(\Delta)/\Delta,$$

где

$$\Delta = 28\pi\sigma_\omega(\lambda_{\text{av}}\nu_x/D)(1 - \lambda_{\text{av}}\nu_x/D), \quad (12)$$

$T_L(\nu_x), T_G(\nu_x), T_V(\nu_x), T_{\text{AF}}(\nu_x)$ — ФПМ изображений линейного, гармонического, вибрационного смещений изображения и расфокусировки соответственно, $\Delta\alpha_L$ — погрешность линейного смещения изображения за время экспозиции, $\Delta\alpha_G$ — амплитуда погрешности синусоидального колебания, $\Delta\sigma_V$ — среднеквадратическое отклонение случайной амплитуды вибраций, $J_0(\nu)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $J_1(\Delta)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка,

Δ — расфокусировка (мм), σ_ω — среднее квадратическое значение волновой аберрации в долях длины волны, $\lambda_{\text{ср}}$ — средняя длина волны спектрального диапазона, D — диаметр входного зрачка объектива.

Приведенные ФПМ (10)–(12) позволяют решать задачи анализа качества изображения ОЭП по данным испытаний и разработки БОЭП. При этом параметры $\Delta\alpha_L$, $\Delta\alpha_G$, $\Delta\sigma_V$, Δ определяются на основе решения имитационных математических моделей ССк, ССл, СВ, САФ, моделируемых нелинейными дифференциальными уравнениями [6].

Для определения допустимых динамических погрешностей (ДДП) ($\Delta\alpha_L$, $\Delta\alpha_G$, $\Delta\sigma_V$, Δ) решим обратную задачу (задачу синтеза) исходя из допустимых требований к ФПМ ($T_{\text{ОЭД}}^{\text{adm}}(\nu)$) (4)–(9), которые определяются из задач наблюдения.

Для решения задачи синтеза ДДП необходимо определить верхнюю границу пространственных частот (пространственного разрешения) ОЭП. Поскольку процессы обнаружения, распознавания, классификации и идентификации объектов наблюдения являются вероятностными, то для определения границы пространственных частот воспользуемся числовым критерием Джонсона [1]. Предельные пространственные частоты, которые должен разрешать БОЭП в процессе наблюдения по одной из осей, и частоты Найквиста определяются соответственно для каждого вида задач наблюдения (обнаружения, распознавания, классификации и идентификации) с требуемой вероятностью (P) согласно [1]

$$\nu_d = \frac{N_p L}{h_{\text{ср}}}, \quad N_d = \frac{N_p L}{h_{\text{ср}} f'}, \quad (13)$$

$$\nu_N = 0,5\nu_d, \quad N_N = 0,5N_d,$$

где ν_d — угловая (штр/рад) и N_d — линейная в фокальной плоскости (штр/мм) пространственные частоты, N_p — число элементов разрешения (числа Джонсона можно найти в публикации [1] по таблицам или графикам), укладываемых вдоль критического размера объекта наблюдения (например высота танка), ν_N , N_N — частоты Найквиста, L — дальность до объекта наблюдения, $h_{\text{ср}}$ — критический размер объекта наблюдения, f' — фокусное расстояние оптической системы. Если наблюдение ведется в двух ортого-

нальных направлениях x и y , тогда рекомендуется использовать формулу

$$\nu_{xy} = N_p L (h_{\text{ср}x} h_{\text{ср}y})^{-0,5}. \quad (14)$$

Предельные граничные пространственные частоты ν_b^{OS} , N_b^{OS} , ν_b^D оптической системы и фотоприемника можно оценить и сопоставить с выражением (8)

$$\nu_b^{\text{OS}} \frac{D}{2,44\lambda k_{\text{ab}}} \geq \nu_d, \quad (15)$$

$$N_b^{\text{OS}} = \frac{D}{2,44\lambda k_{\text{ab}} f'} \geq N_d, \quad \nu_b^D = \frac{f'}{2x_e} \geq \nu_d,$$

где D — диаметр входного зрачка объектива, x_e — размер элемента приемника (пиксела), k_{ab} — коэффициент, учитывающий аберрации, f' — фокусное расстояние объектива.

Решение обратной задачи определения ДДП: используя разложение нелинейных функций (10)–(12) в ряды и ограничиваясь первыми двумя членами разложения

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots, \quad (16)$$

$$\exp(-x^2) = 1 - x^2 + \frac{x^4}{2!} - \frac{x^6}{3!} + \dots,$$

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{2^2 1!} + \frac{x^4}{2^4 (2!)^2} - \frac{x^6}{2^6 (3!)^2} + \dots, \quad (17)$$

$$J_1(x) = \frac{x}{2} \left(1 - \frac{x^2}{2^3 1!} + \frac{x^4}{2^5 2! 3} - \dots \right),$$

получены приближенные формулы ФПМ САУ, ВЗ и САФ (система автоматической фокусировки)

$$\frac{\sin x}{x} \cong 1 - \frac{0,765x^2}{6},$$

$$\exp(-x^2) \cong 1 - 0,664x^2, \quad (18)$$

$$J_0(x) \cong 1 - \frac{0,813x^2}{4},$$

$$\frac{2J_1(x)}{x} \cong 1 - \frac{0,738x^2}{8},$$

из которых следуют оценки ДДП (19)–(22) САУ и системы ВЗ на любой заданной частоте с погрешностями приближения, приведенны-

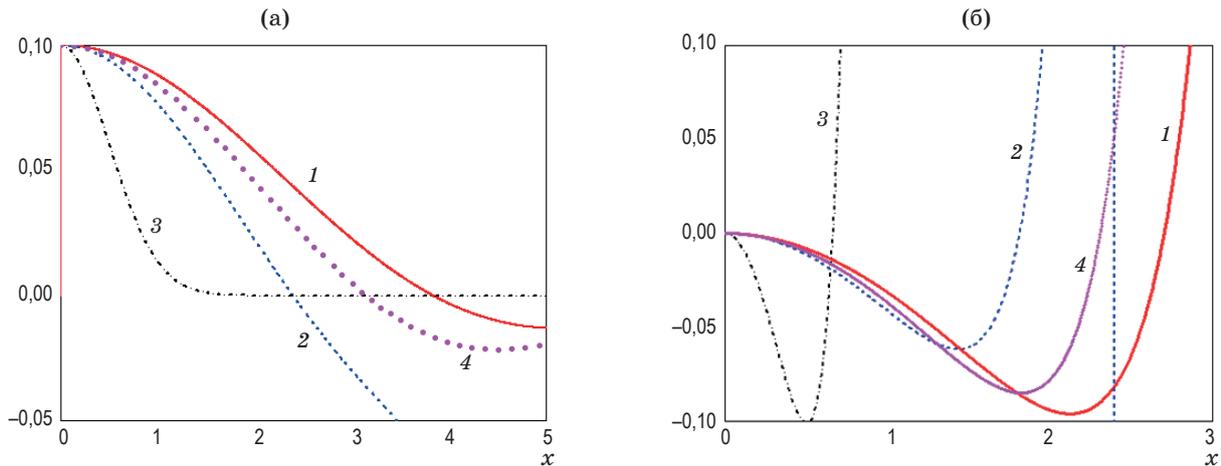


Рис. 4. Графики ФПМ ($\frac{2J_1(x)}{x}$ (1), $J_0(x)$ (2), e^{-2x^2} (3), $\frac{\sin(x)}{x}$ (4)) — (а) и их оценки приближения

$$\Delta 1(x) = \frac{2J_1(x)/x - (1 - 0,738x^2/8)}{2J_1(x)/x}, \quad (1)$$

$$\Delta 2(x) = \frac{J_0(x) - (1 - 0,813x^2/4)}{J_0(x)}, \quad (2)$$

$$\Delta 3(x) = \frac{\exp(-x^2) - (1 - 0,644x^2)}{\exp(-x^2)}, \quad (3)$$

$$\Delta 4(x) = \frac{\sin(x^2)/x - (1 - 0,765x^2/6)}{\sin(x)/x} \quad (4) \quad (б).$$

ми на рис. 4б. Обычно в расчетах принимают частоту Найквиста ($\nu_N = 0,5\nu_d$) [1]

$$\Delta \alpha_L^{\text{adm}} \leq \frac{1}{\pi \nu_N} \sqrt{\frac{6}{0,765} (1 - T_L^{\text{adm}}(\nu_N))} =$$

$$= \frac{0,891 \sqrt{1 - T_L^{\text{adm}}(\nu_N)}}{\nu_N}, \quad (19)$$

$$\Delta \bar{\sigma}_V^{\text{adm}} \leq \frac{1}{\sqrt{2 \times 0,664} \pi \nu_N} \sqrt{1 - T_V^{\text{adm}}(\nu_N)} =$$

$$= \frac{0,276 \sqrt{1 - T_V^{\text{adm}}(\nu_N)}}{\nu_N}, \quad (20)$$

$$\Delta \alpha_G^{\text{adm}} \leq \frac{1}{2\pi \nu_N} \sqrt{\frac{4}{0,813} (1 - T_G^{\text{adm}}(\nu_N))} =$$

$$= \frac{0,353 \sqrt{1 - T_G^{\text{adm}}(\nu_N)}}{\nu_N}, \quad (21)$$

$$\Delta_{AF}^{\text{adm}} \leq 3,292 \sqrt{1 - T_{AF}^{\text{adm}}(\nu_N)}. \quad (22)$$

Формулы (19)–(22) позволяют проводить оценки ДДП САУ и системы ВЗ для линейного, гармонического, вибрационного смещений

изображения и расфокусировки из условия обеспечения допустимых ФПМ контраста изображения ($T_i(N)$) (4)–(9) с точностями, приведенными на рис. 4б. Известно [19, 20], что если при $\nu \leq \nu_d$ ФПМ $T_{OED}(\nu) \geq 0,8$, то качество изображения ОЭП считается еще хорошим, при $T_{OED}(\nu) \geq 0,26$ будет удовлетворять критерию Рэля. Эти неравенства можно также использовать как допустимые для предварительных расчетов ДДП ССк, ССл, САФ и ВЗ.

2. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ

Синтез регуляторов проводится с учетом выражений (3) в классе комбинированных астатических систем исходя из условий устойчивости, точности и качества регулирования. Предварительно выбираются приводы с учетом моментов нагрузки (M_l), скоростей и ускорений и носителя [13]. Модуль частотной характеристики разомкнутых изолированных каналов управления определяется из условия

$$|W(j\omega)| \geq \frac{\varepsilon_1 A_1 + \varepsilon_2 A_2 + V_T + k_f M_l}{\Delta \alpha(\omega)}, \quad (23)$$

$$\Delta \alpha(\omega) = \Delta \alpha_L^{\text{adm}} + \Delta \alpha_G^{\text{adm}}(\omega_1),$$

где $\varepsilon_i \leq (0,03-0,1)$ — точности инвариантности к колебаниям носителя, k_f — коэффициент передачи привода по моменту.

Постоянные времени привода (T_{dr}), усилителя (T_{ampl}), датчика (T_{sens}) определяются из условий устойчивости (при $T_{dr} > T_{sens} > T_{ampl}$), показателя колебательности (M) и добротности по скорости (K_{sp}) [14]

$$\begin{aligned} K_{sp} &\leq \frac{T_{dr} + T_{ampl} + T_{sens}}{T_{dr}(T_{sens} + T_{ampl})}, \\ T_{dr} &\leq \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{2K_{sp}}, \\ T_{sens} &\leq \frac{1}{10\omega_{sl}}, \quad T_{ampl} \leq \frac{1}{40\omega_{sl}} \end{aligned} \quad (24)$$

где ω_{sl} — частота среза.

Если условия (24) не выполняются, то далее синтез проводится частотным методом путем построения желаемых логарифмических амплитудных и фазовых характеристик (ЛАХ- $L(\omega)$, ЛФХ- $\varphi(\omega)$), реализующих требования устойчивости (критерий Найквиста) и качества регулирования (частотные свойства разомкнутой системы) [14]

а) в низкочастотной области ЛАХ

$$\begin{aligned} 20\lg(\alpha_{in}(\omega_{carr})/\Delta\alpha_{carr}) &= L(\omega_{carr}) < L(\omega), \\ 20\lg K_{sp} &< L(\omega), \end{aligned} \quad (25)$$

где ω_{carr} — частота колебаний носителя, K_{sp} — добротность регулятора по скорости, α_{in} — входное угловое отклонение носителя,

б) в среднечастотной области ЛАХ — на частоте среза (ω_{sl}) наклон ЛАХ должен быть -20 дБ/дек в диапазоне частот

$$\Delta\omega = \omega_{sl}(1 \pm 0,5(M + 1)/(M - 1)), \quad (26)$$

в) запасы устойчивости по фазе — $\Delta\varphi > (45-60)^\circ$ и по амплитуде — $\Delta L > 6$ дБ, которые определяют указанные требования к параметрам датчиков, усилителей и корректирующих звеньев, последние определяются по формулам

$$\begin{aligned} W_{corr}(p) &= \frac{T_2 p + 1}{T_3 p + 1}, \quad T_2 \geq \frac{1}{\omega_{sl}} \frac{M}{M - 1}, \\ T_3 &\leq \frac{1}{\omega_{sl}} \frac{M}{M + 1}. \end{aligned} \quad (27)$$

Далее синтез алгоритмов управления доопределяется на основе исследования динамики САУ с помощью пространственной компьютерной модели [6] с учетом нелинейностей регулятора и объекта управления.

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ

Вибрационное смещение изображения зависит от действующих возмущений (амплитуды и частоты) и дисбаланса ОЭП. На основе применения метода конечных элементов и экспериментальных исследований [5, 6] наиболее приемлемой моделью для расчета системы ВЗ в вертикальной плоскости является математическая модель с двумя степенями свободы, описывающая динамику амортизации ОЭП как твердого тела, имеющего дисбаланс (рис. 5) [13, 15].

Динамическая модель системы ВЗ (рис. 5) состоит из следующих элементов: тела 1 — носитель, который совершает линейные и угловые вибрационные колебания: $y = y_0 \sin(\omega_4 t)$, $\alpha = \alpha_0 \sin(\omega_4 t)$, тел 2, 3 — прибор с фланцем, который имеет две степени свободы: x — линейные колебания и φ — угловые колебания относительно горизонта. Следуя работе [13], получены линеаризованные уравнения (28), (29) при следующих допущениях: тела 1–3 абсолютно жесткие, тела 2, 3 — единое целое жесткое соединение, расположение амортизаторов симметрично относительно вертикальной плоскости (плоскости чертежа (рис. 5б)), проходящей через центр масс прибора, центр масс не совпадает с центром жесткости системы ВЗ вдоль тела 2 на размер $\Delta l = l_2 - l_1 \neq 0$ и по вертикали на размер r ; коэффициенты жесткости c_i и демпфирования b_i пружин одинаковы, восемь амортизаторов расположены на фланце по окружности с шагом $\pi D_{cir}/N$, где D_{cir} — диаметр окружности, N — количество амортизаторов.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + b_{11}\dot{x} + c_{11}x + b_{12}\dot{\varphi} + c_{12}\varphi &= \\ = b_{13}\dot{y} + c_{13}y + b_{14}\dot{\alpha} + c_{14}\alpha, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} J\ddot{\varphi} + b_{22}\dot{\varphi} + c_{22}\varphi + b_{21}\dot{x} + c_{21}x &= \\ = b_{23}\dot{y} + c_{23}y + b_{24}\dot{\alpha} + c_{24}\alpha, \end{aligned} \quad (29)$$

где m — масса и J — момент инерции прибора относительно центра масс,

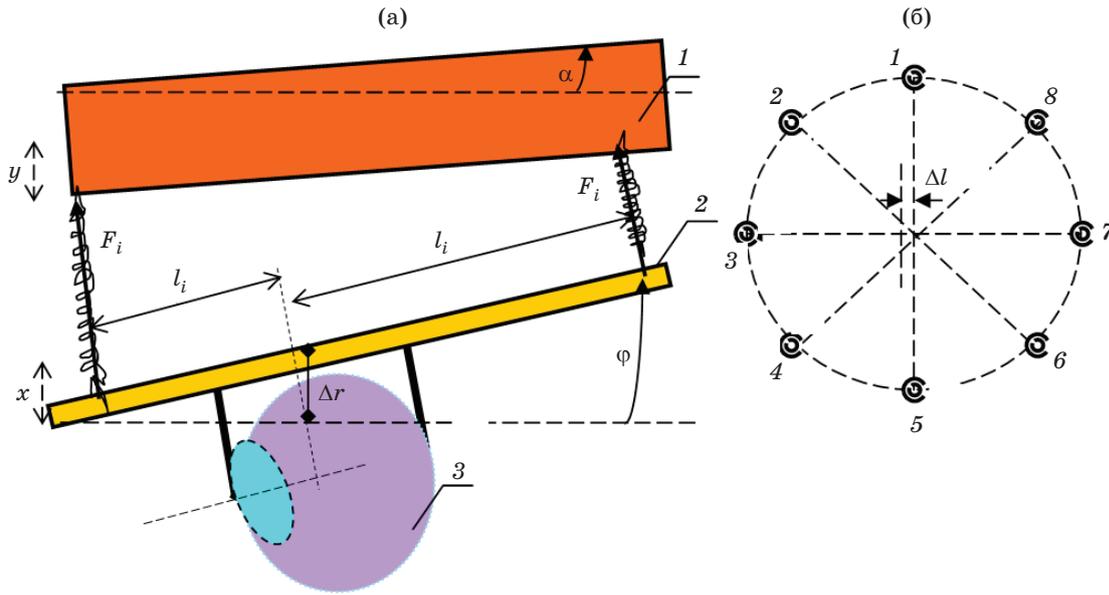


Рис. 5. Модель для расчета системы ВЗ. Динамическая модель системы ВЗ с двумя степенями свободы (а). 1 — носитель, 2 — фланец, 3 — ОЭП, Δr — дисбаланс в горизонтальной плоскости. Схема расположения амортизаторов (б). 1–8 — амортизаторы, Δl — дисбаланс в вертикальной плоскости.

$$\begin{aligned} b_{11} = b_{13} = 8b, \quad c_{11} = c_{13} = 8c, \\ c_{12} = c_{14} = c(l_{10} - l_{20}), \\ c_{24} = c[L_1^2 + L_2^2], \quad c_{21} = -c_{23} = c_{12}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} c = c_i, \quad c_{22} = c[L_1^2 + L_2^2] + mgr, \\ b_{12} = b_{14} = b(l_{10} - l_{20}), \\ b_{22} = b_{24} = b[L_1^2 + L_2^2], \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} b_{21} = b_{23} = b_{12}, \quad b = b_i, \quad l_3 = l_0 - \Delta l, \\ l_6 = l_8 = 0,707l_0 + \Delta l, \\ l_7 = l_0 + \Delta l, \quad l_4 = l_5 = \Delta l, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} l_{10} = \sum_{i=2}^4 l_i, \quad l_{20} = \sum_{j=6}^8 l_j, \quad L_1^2 = \sum_{i=1}^4 l_i^2, \\ L_2^2 = \sum_{j=5}^8 l_j^2, \quad l_2 = l_4 = l_0 \cos \frac{\pi}{4} - \Delta l. \end{aligned} \quad (33)$$

Уравнения (28), (29) после преобразования в операторной форме имеют вид

$$\begin{aligned} (T_{11}^2 p^2 + 2\xi_{11} T_{11} p + 1)x - k_{12}(Tp + 1)\varphi = \\ = (Tp + 1)y - k_{13}(Tp + 1)\alpha, \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} -k_{21}(Tp + 1)x + (T_{22}^2 p^2 + 2\xi_{22} T_{22} p + 1)\varphi = \\ = -k_{22}(Tp + 1)y + k_{23}(Tp + 1)\alpha. \end{aligned} \quad (35)$$

Из системы уравнений (34), (35), используя правило Крамера, получим в форме передаточных функций в явном виде зависимости

$$\begin{aligned} \frac{x}{y} = W_x^y(p) = \\ = k_x^y \frac{(Tp + 1)(T_3^2 p^2 + 2\xi_3 T_3 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)}, \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\varphi}{y} = W_\varphi^y(p) = \\ = k_\varphi^y \frac{(Tp + 1)p^2}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)}, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \frac{x}{\alpha} = W_x^\alpha(p) = \\ = k_x^\alpha \frac{(Tp + 1)(T_4^2 p^2 + 2\xi_4 T_4 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)}, \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \frac{\varphi}{\alpha} = W_\varphi^\alpha(p) = \\ = k_\varphi^\alpha \frac{(Tp + 1)(T_5^2 p^2 + 2\xi_5 T_5 p + 1)}{(T_1^2 p^2 + 2\xi_1 T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)}, \end{aligned} \quad (39)$$

где

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{\omega_1}, T_2 = \frac{1}{\omega_2}, \omega_1 = \omega_{11}\sqrt{1-\varepsilon_1(\Delta)}, \\ T_3 &= \frac{1}{\omega_3} = \frac{T_{22}}{\sqrt{1+k_{12}k_{21}}}, \\ \xi_3 &= \frac{(2\xi_{22}T_{22} + k_{12}k_{22}T)}{2T_3}, \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \omega_{22}\sqrt{1+\varepsilon_2(\Delta)}, \\ \varepsilon_1(\Delta) &= \frac{0,5\omega_{22}^2\Delta l^2}{(\omega_{22}^2 - \omega_{11}^2)(l_1^2 + l_2^2)}, \\ \varepsilon_2(\Delta) &= \frac{0,5\omega_{11}^2\Delta l^2}{(\omega_{22}^2 - \omega_{11}^2)(l_1^2 + l_2^2)}, \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} k_x^y &= 1, k_\phi^y = \frac{k_{22}}{\omega_{11}^2(1-k_{12}k_{21})}, \\ k_x^\alpha &= \frac{-k_{13}(1-k_{23})}{(1-k_{12}k_{21})}, k_\phi^\alpha = \frac{(k_{23}-k_{12}k_{22})}{(1-k_{12}k_{21})}, \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} k_{12} &= k_{13} = 0,5\Delta l, T = \frac{b}{c}, \\ k_{21} &= k_{22} = \frac{4\Delta l}{L_1^2 + L_2^2 + mgr}, \\ k_{23} &= \frac{c(L_1^2 + L_2^2)}{c(L_1^2 + L_2^2) + mgr}, \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} T_4 &= \frac{1}{\omega_{22}(1-k_{23})}, \xi_4 = \frac{2\xi_{22}T_{22} - k_{23}T}{2T_4}, \\ \xi_{11} &= \frac{b}{\sqrt{0,5mc}}, \xi_{22} = \frac{b(L_1^2 + L_2^2)}{2\sqrt{J[c(L_1^2 + L_2^2) + mgr]}}, \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} T_5 &= \frac{T_{11}}{1-k_{12}k_{22}/k_{23}}, \\ \xi_5 &= \frac{2\xi_{11}T_{11} - k_{12}k_{22}T/k_{23}}{2T_5}, \end{aligned} \quad (46)$$

$$T_{11} = \sqrt{\frac{m}{8c}}, T_{22} = \sqrt{\frac{J}{c(L_1^2 + L_2^2) + mgr}}.$$

ПОРЯДОК СИНТЕЗА

Входные воздействия следующие: $y = y_0 \sin(\omega_4 t)$,
 $\alpha = \alpha_0 \sin(\omega_4 t)$.

1. Параметры амортизаторов выбираются исходя из условий [13]

$$\begin{aligned} c &\leq \frac{m\omega_4^2}{16} = 246,5m, \text{ или } \omega_{\text{res}}^2 = 8c/m \leq 2\omega_4^2, \\ \omega_4 &= 2\pi f_V = 62,8c^{-1}, \xi_{11} = 0,2. \end{aligned} \quad (47)$$

2. По данным конструктивной схемы объекта управления ($m, J, l_0, \Delta l, r$) в соответствии с формулами (36)–(39) вычисляем передаточные функции и построим ЛАХ системы ВЗ

$$W_x^y(\omega), W_\phi^y(\omega), W_x^\alpha(\omega), W_\phi^\alpha(\omega). \quad (48)$$

3. Доопределяем параметры ВЗ (36–39) исходя из выполнения условий

$$\begin{aligned} x &= \max_{\omega} W_x^y(\omega_4)y_0 \leq f'\Delta\bar{\sigma}_V^{\text{adm}}, \\ \phi &= \max_{\omega} W_\phi^y(\omega_4)y_0 \leq \Delta\bar{\sigma}_V^{\text{adm}}, \omega_4 = 2\pi f, \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} x &= \max_{\omega} W_x^\alpha(\omega_4)\alpha_0 \leq f'\Delta\bar{\sigma}_V^{\text{adm}}, \\ \phi &= \max_{\omega} W_\phi^\alpha(\omega_4)\alpha_0 \leq \Delta\bar{\sigma}_V^{\text{adm}}, \\ f &\in (10-2000) \text{ Hz}. \end{aligned} \quad (50)$$

На основе уравнений (28)–(50) разработана автоматизированная программа расчета системы ВЗ «Syst.Am_v0.1» [15], позволяющая синтезировать ее конструктивные параметры, обеспечивающие допустимое вибрационное смещение изображения.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАСШТАБНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО МАКЕТА

Необходимость создания и исследования динамического макета (ДМ) возникает при разработке принципиально новых и модернизируемых САУ БОЭП с целью проверки заложенных принципов управления и стабилизации изображения, что позволяет сократить стоимость и время разработки.

Размеры (L) и массы (m) объектов управления узлов и деталей, необходимых мощностей (P) и моментов ($M_{\Delta r}$) приводов, сил пружин амортизаторов (F) ДМ определяются исходя из ТЗ на ДМ, исходных данных на разработку и ограничений, а также выбранных масшта-

бов (μ_i) динамического подоби́я [16], взятых за основу при разработке ДМ

$$\begin{aligned} \mu_i &= a_m / a, \quad (i = L, \rho, m, P, M_{dr}, F), \\ \mu_t &= \mu_x = \mu_\varphi = 1, \end{aligned} \quad (51)$$

где a_m — параметр ДМ, a — натуральный параметр прибора, ρ — плотности материалов, x , φ — линейные и угловые движения объекта управления.

Далее разработка, создание и исследование динамики ДМ проводится в следующей последовательности:

- определяются параметры ДМ, его приводов и СА с учетом выражений (51), (47),

- по рабочим чертежам БОЭП в среде SolidWorks разрабатывается сборочный чертеж ДМ и определяется его геометрия масс,

- по чертежам ДМ изготавливается механическая часть ДМ с использованием 3D-принтера или других лабораторных технологических средств совместно с ДМ приводов и амортизаторов. Электронная часть САУ (датчики, усилители, корректирующие устройства) допускается в макетном исполнении,

- по частотным характеристикам объекта управления ДМ в соответствии с критерием (2) синтезируются параметры САУ ДМ по формулам (23)–(27) и ДМ ВЗ (36)–(50) и проводится настройка и исследования динамики САУ и ВЗ ДМ,

- по результатам исследования ДМ корректируются параметры и узлы (при необходимости) реальных САУ и системы ВЗ по частотным характеристикам и параметрам ДМ с учетом масштабов (51).

По результатам разработки и исследований ДМ делается выбор приемлемости исследуемых вариантов САУ и системы ВЗ для дальнейшего применения.

Не приведенные здесь ввиду ограниченности объема статьи методики разработки блоков «Разработка математической модели»,

«Идентификация параметров», «Декомпозиция каналов управления», «Разработка компьютерных имитационных моделей» и их содержание, основанные на законах механики, на анализе устойчивости и качества регулирования каналов управления с учетом перекрестных связей в частотной области, можно найти в работах [6–10, 12]. Методики разработки остальных блоков (рис. 1), частично изложены в работах [2–4, 6–10]. Числовые примеры расчетов параметров и условий можно найти в работах [4–6, 12, 21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаются алгоритмы и методики исследований, синтеза регуляторов и испытаний САУ и системы ВЗ опытных образцов БОЭП в виде интерактивных замкнутых процедур, позволяющих проводить оценки ДДП САУ и вибрационного смещения изображения, разработку математической модели, верификацию параметров, синтез алгоритмов управления, исследование динамики на компьютерной модели, а также на стендовых и бортовых испытаниях.

Получены оценки допустимых динамических погрешностей САУ и систем ВЗ для решения задач наблюдения [1, 8] с заданной вероятностью.

Предлагаемая методика разработки и испытаний объединяет теорию оптического изображения, теорию автоматического управления и законы механики, методы математического и компьютерного моделирования в единое целое. Она позволяет решать важные прикладные задачи построения адекватных математических моделей БОЭП как объектов управления и на их основе наиболее эффективно решать задачи синтеза САУ и ВЗ опытных образцов БОЭП, что позволит уменьшить сроки, стоимость и эффективность их разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
2. Беляков Ю.М., Карпов А.И., Кренев В.А. и др. Методика разработки математических моделей автоматических бортовых оптико-электронных систем // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 3. С. 34–39.
3. Торшина И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. М.: Логос, 2009. 248 с.

4. Карпов А.И., Кренив В.А., Маливанов Н.Н. Динамика и стабилизация изображения бортовых комплексированных оптико-электронных приборов // Тр. XI Междунар. Четаевской конф. «Аналитическая механика, устойчивость и управление». 2017. Т. 3. Секция 3 «Управление». Ч. II. С. 40–51.
5. Балоев В.А., Беляков Ю.М., Карпов А.И. и др. Моделирование системы управления зеркалом в кардановом подвесе для обзорно-поисковых систем воздушного базирования // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 3. С. 11–21.
6. Маливанов Н.Н., Карпов А.И., Кренив В.А. Динамика и стабилизация изображения бортовых комплексированных оптико-электронных приборов: расчетные схемы, уравнения движения, идентификация, синтез, опыт разработки, результаты: монография. Казань: изд. КНИТУ-КАИ, 2018. 248 с.
7. Карпов А.И., Стрелнев В.А. Динамика и методы расчета систем автоматического управления стратосферными обсерваториями: идентификация, декомпозиция, синтез: монография. Казань: изд. КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008. 175 с.
8. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 574 с.
9. Карпов А.И., Кренив В.А., Молин Д.А. Исследование динамики бортовой оптико-электронной системы // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. 2013. № 4. С. 256–264.
10. Бурдинов К.А., Карпов А.И., Кренив В.А. Методика разработки и исследования динамики систем виброзащиты и управления бортовыми оптико-электронными приборами с применением компьютерных технологий // Вестник КНИТУ-КАИ. 2018. Т. 2. С. 152–161.
11. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Геча В.Я. и др. Основные источники снижения качества изображений земли, получаемых при орбитальной оптической съёмке с борта МКА // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2017. Т. 217. С. 3–19.
12. Балоев В.А., Беляков Ю.М., Карпов А.И. и др. Имитационное моделирование двухступенчатой системы управления сканирующим устройством бортового базирования // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 3. С. 6–14.
13. Бабаев А.А. Амортизация, демпфирование и стабилизация бортовых оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1984. 232 с.
14. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
15. Карпов А.И., Кренив В.А., Смирнов А.Е. Математическая модель системы виброзащиты бортового оптико-электронного прибора // Материалы VI молод. междунар. научно-техн. конф. «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы — 2019». Казань, 2019. С. 333–336.
16. Барботько А.И. Основы теории математического моделирования: уч. пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2015. 216 с.
17. Бугаенко А.Г., Белюжков Ю.М., Иванов В.П., Курт В.И., Маливанов Н.Н. Испытания тепловизионных приборов: уч. пособие. Казань: изд. КНИТУ-КАИ, 2010. 362 с.
18. Клюев В.В. Испытательная техника: справочник в двух книгах. М.: Маш, 1982. 526 с.
19. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, ЛО, 1989. 221 с.
20. Дубовик М.И., Апенко Ф.С., Дурейко Г.В., Жилкин А.М., Запрягаева Л.А., Романов Д.А., Свешникова И.С. Прикладная оптика: уч. пособие для вузов. М.: Недра, 1982. 612 с.
21. Молин Д.А. Применение функции передачи модуляции для оценки допустимых характеристик оптико-электронных приборов // Вестник Каз. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. 2011. № 1. С. 68–75.