

На правах рукописи

Гаврилина Екатерина Андреевна

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ НЕОБИТАЕМОГО
ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПОВЫШЕННОЙ МАНЁВРЕННОСТИ**

Специальность 2.5.4

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Кропотов Александр Николаевич**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Груммондз Валерий Тихонович**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор Московского авиационного института
(национального исследовательского
университета)

Розман Борис Яковлевич
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, заведующий Лабораторией подводной
видеотехники Института океанологии им. П.П.
Ширшова РАН

Ведущая организация: **Акционерное общество «Концерн «Морское
подводное оружие – Гидроприбор»
(АО «Концерн «МПО-Гидроприбор»)**

Защита состоится «6» июня 2023 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613 м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы и замечания к автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.331.14.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.331.14, кандидат
технических наук, доцент

Муратов Игорь Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В настоящее время необитаемые подводные аппараты (НПА) активно используются для проведения военных, инженерных и исследовательских подводных работ. Традиционно НПА эксплуатируются при близких к нулю значениях углов наклона (дифферента и крена). Однако на практике наблюдается тенденция роста числа задач, требующих повышенной манёвренности (управляемости при любых углах ориентации). К таким задачам относятся: осмотр и идентификация миноподобных объектов, маневрирование и осмотр в условиях ограниченного пространства, обследование тоннелей, затопленных шахт, осмотр корпусов судов, подводных конструкций, выполнение эквидистантных манёвров в условиях сложного рельефа и др.

Это означает, что система управления (СУ) НПА повышенной манёвренности должна обеспечивать требуемое качество работы при любых наклонах по дифференту и крену. Однако традиционно СУ НПА проектируются для режимов движения при малых углах наклона и используют углы Эйлера-Крылова (курс, дифферент и крен), вследствие чего имеют ряд особенностей и ограничений:

- 1) вырождение кинематических уравнений при угле дифферента $\pm 90^\circ$;
- 2) неоднозначность определения углов ориентации при угле дифферента $\pm 90^\circ$;
- 3) ухудшение качества работы с ростом углов наклона.

Эти особенности препятствуют применению традиционных методов построения СУ в НПА повышенной манёвренности. При этом методики построения СУ на основе других кинематических параметров исследованы недостаточно. Вследствие чего на данный момент остро встает вопрос разработки алгоритмов и методов построения СУ, обеспечивающих работоспособность НПА во всем диапазоне углов ориентации.

Степень разработанности темы. Вопрос проектирования СУ, работоспособной во всем диапазоне углов ориентации хорошо проработан для космических, летательных аппаратов и торпед. Существенный вклад в исследование внесли В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский, В.Т. Грумондз, В.В. Половинкин, Г.А. Яковлев, Ю.Н. Челноков, Б. Ви и другие исследователи. Однако задача управления НПА имеет свои особенности: специфика математической модели (тело движется на малых скоростях в вязкой среде), особенности требований к качеству и режимам работы СУ, которые выбираются исходя из удобства эксплуатации НПА оператором, а также рекомендаций по использованию навесного оборудования. Поэтому применение подходов из смежных дисциплин требует дополнительных исследований.

Исследованиями в области построения СУ НПА, управляемых по всем степеням свободы занимались О. Э. Фьельстад, Т. Фоссен, Ж.Л. Антонелли, Р. Суарез (проект UNEXMINE) и др. Однако в работах не проводилось исследование работы СУ при больших (более 45°) углах наклона, вместо этого рассматривалось движение по всем степеням свободы при малых наклонах по

дифференту и крену (до 20°) или частные случаи вертикального движения с наклоном по углу дифферента $\pm 90^\circ$ (НПА MARES и проект UNEXMINE).

Можно констатировать, что на данный момент вопрос построения СУ ориентацией НПА повышенной манёвренности проработан недостаточно: отсутствуют исследования работы СУ при больших углах наклона, не определены требования к качеству и режимы работы СУ, не разработаны алгоритмы и методики, обеспечивающие требуемое качество работы при любых углах наклона.

Цель работы - разработка алгоритмов и методов построения СУ ориентацией НПА, обеспечивающих требуемое качество управления во всем диапазоне углов ориентации. Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- 1) Обзор и анализ подводно-технических работ, для которых необходима повышенная манёвренность НПА, формирование требований к СУ.
- 2) Обзор и анализ существующих подходов к построению СУ, работоспособных во всём диапазоне углов ориентации.
- 3) Исследование особенностей работы СУ НПА при больших углах наклона.
- 4) Разработка алгоритмов, устраняющих ограничения, которые возникают в традиционных СУ при больших наклонах НПА.
- 5) Разработка методики синтеза СУ НПА повышенной манёвренности.
- 6) Разработка алгоритмов, обеспечивающих работоспособность традиционной СУ при любых углах ориентации НПА.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Проведен анализ причин ухудшения качества работы СУ НПА при больших углах наклона.
2. Предложена новая структура СУ НПА, использующая алгоритм декомпозиции и регулятор сепаратного канала, имеющий низкую чувствительность к перекрестным возмущениям.
3. Предложена новая методика синтеза регулятора сепаратного канала СУ НПА, которая обеспечивает низкую чувствительность системы к возмущениям со стороны других каналов и достаточные запасы устойчивости.
4. Предложены новые алгоритмы, обеспечивающие работоспособность СУ, основанной на углах Эйлера-Крылова, во всем диапазоне углов ориентации.

Теоретическая и практическая значимость исследования. В результате проведенного исследования разработаны и испытаны алгоритмы, которые позволяют получить СУ, обеспечивающую заданное качество работы НПА во всем диапазоне углов ориентации, что сократит время проектирования НПА повышенной манёвренности. Полученные в работе новые сведения об особенностях работы СУ НПА при больших наклонах по дифференту и крену, могут использоваться для дальнейшего исследования и повышения качества её работы. Отдельные результаты и практические рекомендации, приведенные в работе, позволят повысить качество и обойти ограничения традиционных СУ (основанных на углах Эйлера-Крылова), что будет способствовать

использованию накопленного практического и исследовательского опыта для разработки НПА повышенной манёвренности.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач в работе используется аппарат теоретической механики, алгебры кватернионов, теории функций комплексного переменного, теории автоматического управления. Проверка теоретических результатов выполнялась методами математического моделирования с использованием программного обеспечения Matlab, а также в ходе натурных экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа особенностей работы СУ, основанных на углах Эйлера-Крылова при больших углах наклона.
2. Результаты исследования работоспособности СУ, основанной на кватернионах, при больших углах наклона.
3. Алгоритмы декомпозиции СУ ориентацией НПА.
4. Методика синтеза регуляторов сепаратных каналов СУ ориентацией НПА на основе H_∞ - подхода.
5. Алгоритмы, обеспечивающие работоспособность СУ, основанной на углах Эйлера-Крылова, во всем диапазоне углов ориентации.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты работы обсуждались на 10 научных конференциях (в том числе 4 международных) и одном научном семинаре: OCEANS (Сан-Диего и Порто, 2021), Всероссийской научно-практической конференции «Опыт и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов» (Астрахань, 2021), International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) (Синайя, 2020), IFAC World Congress (Берлин, 2020), Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и XI молодёжной школе-семинаре «Управление и обработка информации в технических системах» (Домбай, 2020), European Control Conference (ECC19) (Неаполь, 2019), XVI Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2019» (Москва, 2019), Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Научно-технологическое развитие судостроения (НТРС-2017)» (Санкт-Петербург, 2017), Конференции Управление морскими и аэрокосмическими системами (УМАС 2016) (Санкт-Петербург, 2016), Молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее» (Санкт-Петербург, 2016), научном семинаре лаборатории 7 «Адаптивных и робастных систем им. Я.З. Цыпкина» ИПУ РАН под руководством Б.Т. Поляка (Москва, 2018).

Публикации: Результаты диссертационной работы изложены в 14 научных публикациях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ [1]-[5], 4 в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science [6]-[9], 5 – в тезисах докладов [10]-[14].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Основное содержание диссертации изложено на 243

страницах текста с 80 рисунками. Список литературы содержит 145 наименований.

Содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость результатов работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и описана краткая структура диссертации.

В первой главе проведен обзор НПА повышенной манёвренности и задач, для которых они используются: противоминные работы, дефектоскопия корпусов судов и подводных конструкций, контактные операции с объектами, расположенными под наклоном, работа в условиях сложного рельефа, ограниченного пространства, задачи автономных НПА резидентного типа и др. В результате обобщения особенностей движения НПА во время выполнения задач, учитывая фактор удобства эксплуатации НПА оператором, были определены следующие режимы работы СУ ориентацией: режим 1 - отработка заданных углов курса, дифферента и крена; режим 2 - отслеживание поворотов НПА вокруг осей связанной с ним системы координат. Дополнительно сформулированы общие рекомендации по проектированию НПА повышенной манёвренности.

Кроме того, в главе был проведен обзор подходов к построению СУ НПА, управляемых по всем степеням свободы, который показал, что большинство исследователей отказываются от использования углов Эйлера-Крылова, ввиду их кинематических ограничений, и применяют кватернионы. В связи с этим было выявлено отсутствие исследований работы традиционных СУ при больших наклонах по дифференту и крену. При этом в существующих исследованиях СУ, построенных с использованием кватернионов и других кинематических параметров, рассматриваются лишь частные случаи движения НПА при больших углах наклона, например, вертикальное движение с наклоном $\pm 90^\circ$ по углу дифферента (вдоль вертикального тоннеля) или движение НПА при малых наклонах.

Таким образом, работоспособность СУ НПА не исследована при больших наклонах НПА как по дифференту, так и по крену. Можно утверждать, что вопрос построения СУ НПА повышенной манёвренности исследован недостаточно.

Вторая глава посвящена разработке математической модели. Описываются используемые системы координат, модель динамики НПА, винтомоторных агрегатов, модели кинематики для углов Эйлера-Крылова (последовательность поворотов 2-3-1: курс ψ , дифферент ϑ , крен γ), Эйлера (последовательность 2-3-2: прецессия Ψ , нутация Θ , собственное вращение φ), кватернионов, необходимые для дальнейшего исследования.

Основными кинематическими параметрами при проведении численных экспериментов были выбраны нормированные кватернионы:

$$\Lambda = [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]^T = \left[\cos \frac{\chi}{2} \cos \bar{\alpha} \sin \frac{\chi}{2} \cos \bar{\beta} \sin \frac{\chi}{2} \cos \bar{\gamma} \sin \frac{\chi}{2} \right]^T, \quad (1)$$

где χ – угол поворота вокруг оси конечного поворота $\bar{\xi}$, а $\cos \bar{\alpha}$, $\cos \bar{\beta}$, $\cos \bar{\gamma}$ – направляющие косинусы между осью $\bar{\xi}$ и осями Ox , Oy и Oz системы координат $Oxyz$, связанной с НПА, соответственно. Кинематика вращательного движения НПА с использованием кватернионов описывается уравнением:

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \Omega, \quad (2)$$

где Λ – собственный кватернион, задающий текущее положение системы координат $Oxyz$, относительно полусвязанной системы координат – $Ox_g y_g z_g$, $\Omega = [0 \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ – кватернионное представление угловой скорости НПА. При интегрировании уравнения (2) должно выполняться условие равенства нормы кватерниона единице.

Традиционно ориентация НПА описывается углами Эйлера-Крылова, уравнения кинематики которых имеют вид:

$$\dot{\eta} = P(\vartheta, \gamma) \cdot v, \quad (3)$$

где $P(\vartheta, \gamma)$ – матрица Эйлера, описывающая преобразование вектора угловых скоростей $v = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ относительно системы координат $Oxyz$, вектор $\dot{\eta} = [\dot{\psi} \ \dot{\vartheta} \ \dot{\gamma}]^T$ угловых скоростей по курсу, дифференту и крену соответственно.

Уравнения (3) вырождаются при $\vartheta = \pm 90^\circ$. Для решения проблемы в окрестности особой точки было предложено переключение на уравнения кинематики углов Эйлера, которые вырождаются при углах нутации $\Theta = 0^\circ$ и $\Theta = 180^\circ$, что соответствует нулевому наклону по дифференту.

Помимо проблемы вырождения кинематических уравнений углам Эйлера-Крылова свойственна проблема неоднозначности описания ориентации. Было показано, что углы можно рассчитывать следующим образом:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \text{atan}_2 \left(c_{12}, \sigma \sqrt{1 - c_{12}^2} \right), \\ \psi &= \text{atan}_2 (-\sigma c_{13}, \sigma c_{11}), \\ \gamma &= \text{atan}_2 (-\sigma c_{32}, \sigma c_{22}). \end{aligned} \quad (4)$$

где c_{ij} – элемент i – й строки, j – го столбца матрицы направляющих косинусов S , которая описывает положение системы координат $Oxyz$ относительно $Ox_g y_g z_g$, а $\sigma = \pm 1$. Было показано, что одно и то же положение НПА описывают две триады углов поворота: $T_{\sigma+} = \{\psi, \vartheta, \gamma\}$ (соответствует $\sigma = 1$) и $T_{\sigma-} = \{\psi', \vartheta', \gamma'\}$ (соответствует $\sigma = -1$), в связи с этим описание ориентации неоднозначно. В особой точке ($\vartheta = \pm 90^\circ$) углы курса и крена становятся неотличимы друг от друга и описывают ориентацию НПА в соответствии с выражениями:

$$\gamma \pm \psi = \text{atan}_2(c_{23}, c_{33}), \text{ при } \vartheta = \pm 90^\circ. \quad (5)$$

Модель динамики вращательного движения НПА была описана дифференциальными уравнениями, которые в матричной форме имеют вид:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = M_{двv} + w_B, \quad (6)$$

где $\dot{v} = [\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z]^T$ – вектор угловых ускорений НПА в системе координат $Oxyz$; M – матрица массо-инерционных характеристик НПА и присоединенной жидкости; $C(v)$ – матрица моментов от центробежной силы инерции; $D(v)$ – матрица гидродинамических сил сопротивления; $g(\eta)$ – вектор моментов гидростатических сил, действующих на НПА; $M_{двv} = [M_{двx} \ M_{дву} \ M_{двz}]^T$ – вектор моментов, создаваемых движительным комплексом НПА; $w_B = [w_{Bx} \ w_{By} \ w_{Bz}]^T$ – вектор моментов от внешних возмущений, действующих на НПА (влияние кабеля и др.).

С учетом требований повышенной маневренности при построении модели рассматривался НПА, который: имеет малую метацентрическую высоту; работает в швартовном режиме (движется с малыми скоростями); представляет собой твердое тело, постоянной массы; симметричен относительно плоскостей Oxy , Oyz ; имеет движительный комплекс, основанный на винтомоторных агрегатах, которые расположены попарно для управления вращением вокруг осей Ox , Oy , Oz .

Была выбрана модель винтомоторного агрегата, которая представляет собой апериодическое звено первого порядка с насыщением и зоной нечувствительности. Передаточная функция движительного комплекса для вращения НПА вокруг осей Ox , Oy , Oz имеет вид:

$$W_{двj}(p) = \frac{M_{двj}(p)}{U_j(p)} = \frac{K_{двj}}{T_{двj}p+1}, j = x, y, z, \quad (7)$$

где p – оператор Лапласа, $K_{двj}$ – коэффициент усиления, а $T_{двj}$ – постоянная времени винтомоторных агрегатов, управляющих вращением вокруг j -й оси.

В третьей главе исследуется работа СУ, основанной на углах Эйлера-Крылова и альтернативных кинематических параметрах, при больших углах наклона. На практике наблюдается ухудшение качества работы традиционных СУ с ростом углов наклона, однако отсутствует аналитическое объяснение данного явления. Для решения задачи была разработана обобщенная структурная схема (представлена на Рис. 1), которая подходит для описания известных СУ: с демпфирующей скоростной связью по угловой скорости $\dot{\eta}$ по курсу, дифференту и крену, по вектору угловой скорости v относительно связанных с НПА осей; пропорционально-дифференцирующим регулятором по вектору ошибки ε_η .

Рассогласования между заданными и текущими значениями по курсу, дифференту и крену, заданные вектором ε_η , и текущие угловые скорости $\dot{\eta}$ поступают в регуляторы сепаратных каналов управления курсом, дифферентом и креном НПА, представленных матрицей $W_{рег\eta}(p)$. Сформированные управляющие сигналы сепаратных каналов U_η преобразуются в сигналы U_v относительно системы координат, связанной с НПА. При этом используется матрица $P^{-1}(\vartheta, \gamma)$, обратная по отношению к матрице $P(\vartheta, \gamma)$ (3). Управляющие

сигналы U_v подаются в локальный контур управления угловой скоростью или поступают на движительный комплекс НПА.

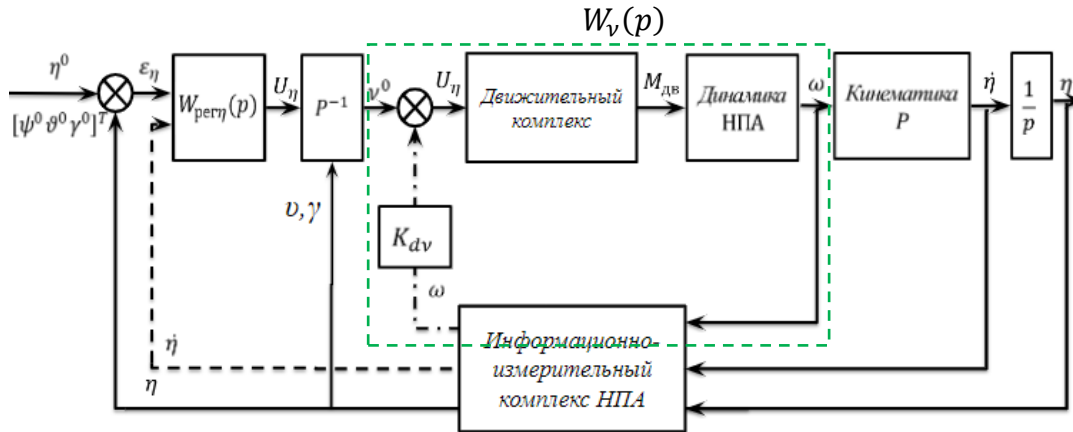


Рис. 1. Структурная схема СУ ориентацией НПА

В работе была проведена линеаризация математической модели и получена передаточная матрица $W(p)$ разомкнутой системы, которая, для случая НПА с нулевой метacentрической высотой, имеет вид:

$$\eta = \frac{1}{p} W(p) \varepsilon_\eta, \quad (8)$$

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{\text{пер.}\psi}(W_y \cos^2 \gamma + W_z \sin^2 \gamma) & \frac{\sin 2\gamma}{2\cos\vartheta} W_{\text{пер.}\vartheta}(W_y - W_z) & 0 \\ \frac{1}{2} \sin 2\gamma \cos \vartheta W_{\text{пер.}\psi}(W_y - W_z) & W_{\text{пер.}\vartheta}(W_z \cos^2 \gamma + W_y \sin^2 \gamma) & 0 \\ \sin \vartheta W_{\text{пер.}\psi}(W_x - W_y \cos^2 \gamma - W_z \sin^2 \gamma) & \frac{1}{2} \sin 2\gamma \tan \vartheta W_{\text{пер.}\vartheta}(W_y - W_z) & W_{\text{пер.}\gamma} W_x \end{bmatrix},$$

где $W_v(p) = \text{diag} \{W_x(p), W_y(p), W_z(p)\}$ - передаточная матрица той части системы, которая находится между матрицами $P(\vartheta, \gamma)$ и $P^{-1}(\vartheta, \gamma)$ (см. Рис. 1), $W_{\text{пер.}\alpha}(p)$, $\alpha = \psi, \vartheta, \gamma$ - передаточные функции регулятора, соответствующие выбранной схеме СУ.

В результате анализа передаточной матрицы $W(p)$, был сделан вывод о том, что СУ ориентацией НПА многосвязна и имеет следующие особенности:

- 1) С ростом угла крена изменяются передаточные функции диагональных элементов передаточной матрицы СУ (8).
- 2) С ростом угла дифферента усиливаются взаимовлияния между каналами.
- 3) Контур крена наиболее подвержен возмущающим воздействиям со стороны других каналов.

Передаточная матрица (8) использовалась для анализа устойчивости СУ по обобщенному критерию Найквиста, в результате которого были получены следующие выражения для собственных чисел матрицы:

$$\begin{cases} \lambda_{1,2}(p) = \frac{1}{2p} \left(W(p) \pm \sqrt{W(p)^2 - 4W_{\text{пер.}\psi}(p)W_{\text{пер.}\vartheta}(p)W_z(p)W_y(p)} \right), \\ \lambda_3 = \frac{1}{p} W_{\text{пер.}\gamma}(p)W_x(p), \end{cases} \quad (9)$$

где $W(p) = \sin^2(\gamma) (W_z(p) - W_y(p)) (W_{\text{рег}\psi}(p) - W_{\text{рег}\vartheta}(p)) + W_y(p)W_{\text{рег}\psi}(p) + W_z(p)W_{\text{рег}\vartheta}(p)$, при условии, что $\vartheta \neq \pm 90^\circ$.

На основе выражений для собственных чисел $\lambda_{1,2}(p)$ (9) было доказано, что устойчивость каналов управления курсом и дифферентом ухудшается с ростом угла крена. Так как собственное число, соответствующее каналу управления креном $\lambda_3(p)$, не зависит от углов наклона НПА, был сделан вывод о том, что синтез канала управления креном можно проводить независимо. Однако необходимо учитывать, что он наиболее подвержен возмущениям со стороны других каналов.

Для анализа влияния момента от силы Архимеда на устойчивость СУ была разделена на линейную и нелинейную части. К полученной системе была применена теорема о малом коэффициенте усиления. Так как компоненты момента от силы Архимеда представляют собой ограниченные по модулю тригонометрические функции, то было показано, что они не влияют на \mathcal{L} -устойчивость СУ, но будут приводить к наличию статических ошибок.

Полученные результаты были подтверждены в ходе численных и натурных экспериментов на НПА «Износ», разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для проверки СУ были введены специальные тестовые движения: управление курсом при большом наклоне НПА по дифференту (тестовое движение 1, см. Рис. 2, а); управление дифферентом при наклоне НПА по крену (тестовое движение 2); управление курсом при критическом наклоне НПА по крену (тестовое движение 3) (Рис. 2, б). Графики, полученные в ходе численных экспериментов, приведены на Рис. 2, а в ходе натурных экспериментов - на Рис. 4, а. При выполнении тестового движения 1 (Рис. 2, а) динамические ошибки в канале крена достигали 53° , при выполнении тестового движения 2 - 20° . При отработке тестового движения 3 на линейной модели СУ становилась неустойчивой, а на нелинейной - была близка к границе устойчивости (наблюдалось значительное повышение колебательности по курсу, см. Рис 2, б).

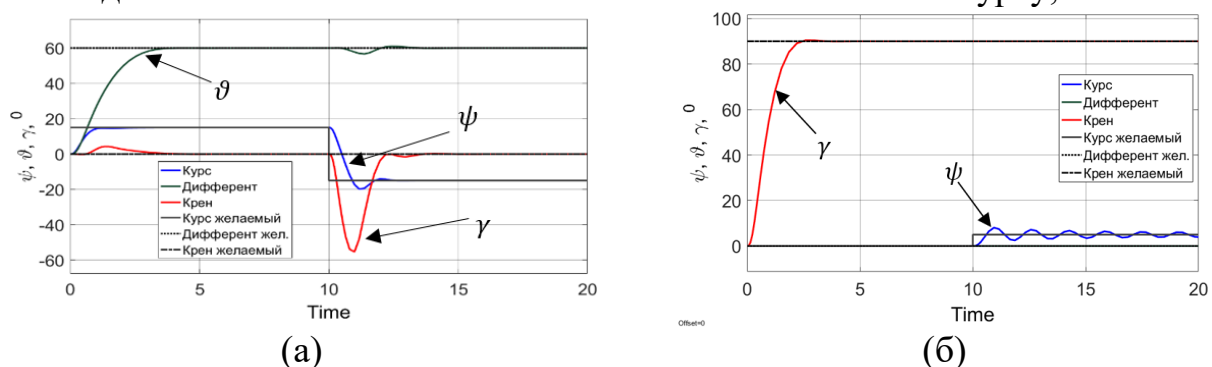


Рис. 2. Переходные процессы при выполнении тестовых движений

В качестве альтернативных рассматривались подходы, основанные на матрицах направляющих косинусов, кватернионах, векторе конечного поворота, классических и модифицированных параметрах Родригеса. В результате сравнительного анализа был выбран подход, на основе кватернионов. Результаты численных экспериментов показали, что подходу свойственна проблема наличия динамических ошибок при работе в режиме 1.

Был проведен дополнительный численный эксперимент, который показал, что в альтернативных СУ, в отличие от традиционных, динамические ошибки не связаны с перекрестными взаимовлияниями между каналами, а обусловлены недостаточной точностью при отслеживании задающего сигнала. В связи с этим дальнейшие исследования были посвящены повышению качества работы традиционной СУ.

В четвертой главе для решения проблем связности между каналами в традиционной СУ было предложено использовать алгоритмы, приводящие передаточную матрицу (8) к диагональному виду:

$$W_{\text{общ}}^{\text{дек}}(p) = \text{diag}\{W_{\text{пер}\psi}(p)W_y(p), W_{\text{пер}\vartheta}(p)W_z(p), W_{\text{пер}\gamma}(p)W_x(p)\}. \quad (10)$$

В частности, рассматривалось получение декомпозирующего алгоритма для линейной СУ, а также линеаризация СУ обратной связью. В первом случае для решения проблемы вместо $P^{-1}(\vartheta, \gamma)$, использовалась декомпозирующая матрица вида:

$$P_{\text{дек.общ.}}^{-1}(\vartheta, \gamma) = \begin{bmatrix} \sin(\vartheta) \frac{W_y'(p)}{W_x'(p)} & 0 & 1 \\ \cos(\gamma) \cos(\vartheta) & \sin(\gamma) \frac{W_z'(p)}{W_y'(p)} & 0 \\ -\sin(\gamma) \cos(\vartheta) \frac{W_y'(p)}{W_z'(p)} & \cos(\gamma) & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

где $W_x'(p)$, $W_y'(p)$, $W_z'(p)$ – передаточные функции декомпозирующего алгоритма, расчет которых определяется выбранным подходом. В случае полной декомпозиции параметры (11) выбираются следующим образом: $W_i'(p) = W_i(p)$, $i = x, y, z$, а в случае упрощенного алгоритма: $W_i'(p) = W_i(0)$, т.е. вместо (8) к диагональному виду приводится матрица $W(0)$, что не позволяет полностью устранить перекрестные связи однако уменьшает их влияние. Для декомпозированной СУ также была получена передаточная матрица и проведен анализ устойчивости.

Так как значения параметров НПА на практике определяются неточно, то был проведен анализ устойчивости СУ с учетом отклонений параметров от номинальных. Неточность определения параметров НПА была задана в виде:

$$P_{\text{дек}\Delta}^{-1}(\vartheta, \gamma) = P_{\text{дек}}^{-1}(\vartheta, \gamma)(I_{3 \times 3} + \Delta(p)), \quad (12)$$

где $\Delta(p)$ – матрица отклонений параметров НПА от номинальных. В результате анализа было определено, что для повышения запасов устойчивости СУ необходимо ограничение показателей колебательности сепаратных каналов.

Вторым подходом к декомпозиции рассматривалась линеаризация СУ обратной связью. Была получена модель НПА в форме вход-выход, без учета динамики движительного комплекса. Закон управления выбран таким образом, чтобы привести нелинейную СУ к виду (10).

Алгоритмы декомпозиции были проверены в ходе численных и натурных экспериментов. Численные эксперименты проводились на тестовых движениях 1-3 для СУ с номинальной моделью НПА, а также с моделью, все параметры которой отклонялись от номинальных в пределах 25 и 50 %. Величины динамических ошибок при выполнении тестового движения 1 для сравнения

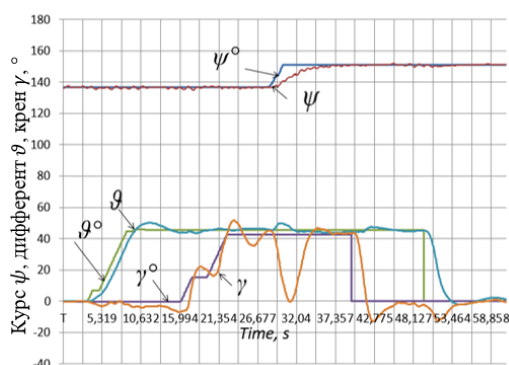
приведены в Таблице 1. Представленные результаты показывают, что динамические ошибки в декомпозированной СУ уменьшены более чем в 10 раз в сравнении с исходной. Аналогичные тенденции наблюдаются и при выполнении тестового движения 2.

Упрощённые алгоритмы декомпозиции были также апробированы в ходе натурных экспериментов. В работе даны практические рекомендации по настройке параметров алгоритма декомпозиции. Виды переходных процессов в исходной СУ и СУ с упрощенным алгоритмом декомпозиции приведены на Рис. 3, а, б соответственно. Динамическая ошибка в канале дифферента (Δ_θ) уменьшена с 8° до 1° , а в канале крена (Δ_γ) с 60° до 5° , т.е. более чем в 10 раз. Время переходного процесса в канале крена уменьшилось с 18 до 6 с, а в канале дифферента - с 9 до 6 с.

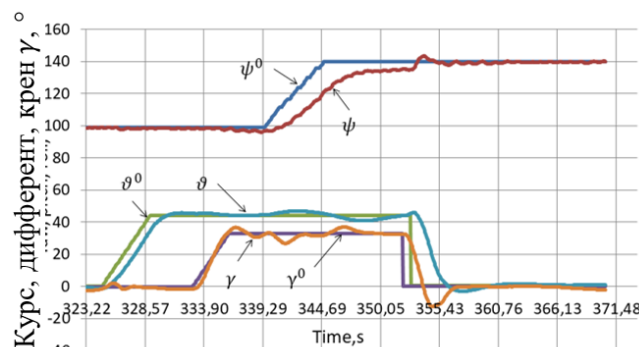
Таблица 1

Динамические ошибки в СУ

Подход	Эксперименты на номинальной модели		Модель с отклонением параметров не более 25%		Модель с отклонением параметров не более 50%	
	$\Delta_\gamma, ^\circ$	$\Delta_\theta, ^\circ$	$\Delta_\gamma, ^\circ$	$\Delta_\theta, ^\circ$	$\Delta_\gamma, ^\circ$	$\Delta_\theta, ^\circ$
Без декомпозиции	53	2	Эксперименты не проводились			
Полная декомпозиция обратная связь по $\omega_x, \omega_y, \omega_z$	2	1.9	5	0.5	12.7	1
Линеаризация обратной связью	2.6	0.25	5	0.5	8	1



(а)



(б)

Рис. 3. Результаты натурных экспериментов на НПА «Износ»: (а) СУ без алгоритма декомпозиции, (б) СУ с алгоритмом декомпозиции

В пятой главе разрабатывается методика синтеза регулятора сепаратного канала, обеспечивающего низкую чувствительность СУ к возмущениям со

стороны других каналов. В связи с тем, что параметры НПА на практике будут определены неточно, в СУ будут наблюдаться остаточные перекрестные связи между каналами, которые будут ухудшать качество работы СУ. Для решения данной проблемы была разработана методика синтеза на основе H_∞ — подхода. Структура сепаратного канала, используемая при синтезе, приведена на Рис. 4.

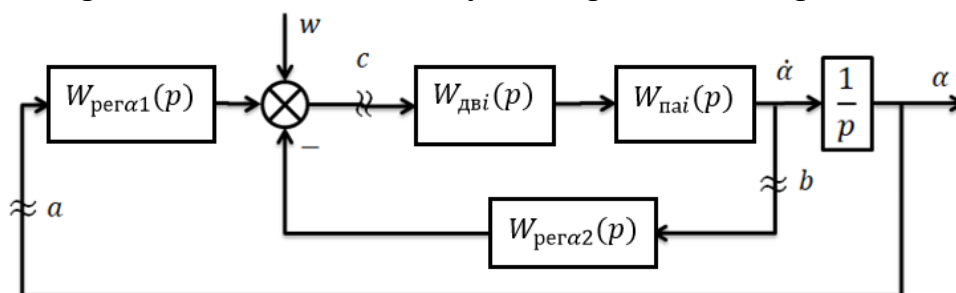


Рис.4. Схема сепаратного канала

На Рис. 4 α - обозначает управляемый угол ориентации (курс, дифферент или крен), $\dot{\alpha}$ – соответствующую угловую скорость ($\dot{\psi}, \dot{\vartheta}, \dot{\gamma}$), индекс $i = x$, при $\alpha = \gamma, i = y$, при $\alpha = \psi, i = z$, при $\alpha = \vartheta$. СУ имеет обратную связь по углу и угловой скорости НПА, управляющий сигнал по углу формируется за счет регулятора $W_{\text{рег}\alpha 1}(p)$, а управляющий сигнал по угловой скорости формируется за счет регулятора $W_{\text{рег}\alpha 2}(p)$.

Для решения задачи синтеза была сконструирована проблема H_∞ - оптимизации, решение которой обеспечивало выполнение следующих требований: величина динамической ошибки при совместной работе каналов не более $\Delta\alpha^*$, при возмущении не более w^* ; достаточные запасы устойчивости системы, т.е. радиус запасов устойчивости СУ, разомкнутой в точках «а», «b», «с» (см. Рис. 4) более 0.75; низкая чувствительность к внешним возмущающим воздействиям; требования к быстродействию СУ, работоспособности с учетом нелинейных характеристик движительного комплекса. Предлагаемая схема

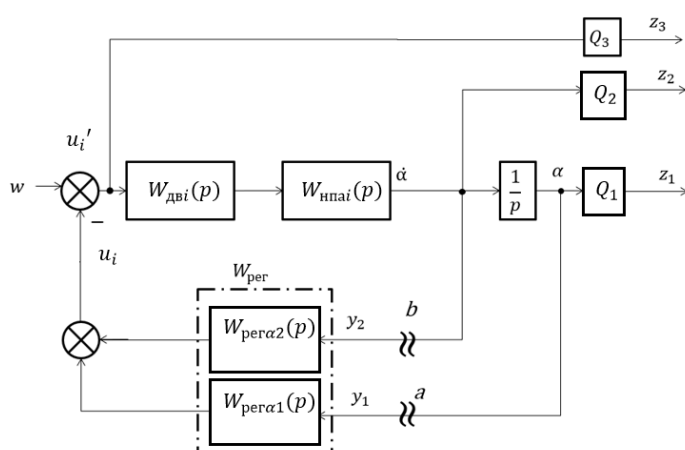


Рис. 5. Схема синтеза сепаратного канала

синтеза приведена на Рис. 5.

В схеме были введены три регулируемые переменные: z_1 – взвешенный коэффициентом Q_1 угол ориентации, z_2 – взвешенная коэффициентом Q_2 угловая скорость, z_3 – взвешенный коэффициентом Q_3 итоговый управляющий сигнал, поступающий на вход движительного комплекса. Данные переменные составляют вектор регулируемых переменных $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$.

При решении задачи H_∞ - оптимизации минимизируется норма передаточной матрицы системы $T_{zw}(p) = [T_{z_1w}(p) \ T_{z_2w}(p) \ T_{z_3w}(p)]$ от вектора внешних возмущений w к вектору регулируемых переменных z :

$$z = T_{zw}(p) w. \quad (13)$$

Передаточные функции вычисляются следующим образом:

$$T_{z_1w} = Q_1 W_\alpha^w(p), \quad (14)$$

$$T_{z_2w} = Q_2 W_\alpha^w(p), \quad (15)$$

$$T_{z_3w} = Q_3 T_c(p), \quad (16)$$

где $W_\alpha^w(p), W_\alpha^w(p)$ – передаточные функции, связывающие величину и скорость изменения динамической ошибки от возмущения w ; $T_c(p)$ – функция чувствительности СУ с точки «с».

Для передаточной матрицы, будет выполняться условие:

$$\|T_{zw}(j\omega)\|_\infty \leq \gamma', \quad (17)$$

где γ' – минимизируемый параметр. Условие (17) выполняется для всех компонент передаточной матрицы $T_{zw}(p)$, обеспечивая выполнение заданных требований к сепаратному каналу.

Методика синтеза заключается в следующем. Уравнения обобщенного объекта, используемые при синтезе, в стандартной форме имеют вид:

$$\dot{x} = A_g x + B_g \begin{bmatrix} w \\ u_i \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u_i, \quad (19)$$

$$y = C x + D_{21} w + D_{22} u_i, \quad (20)$$

где матрицы обобщенного объекта:

$$A_g = A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-C_{\omega_{i1}}}{I_i + \lambda_{jj}} & \frac{1}{I_i + \lambda_{jj}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{двi}} \end{bmatrix}, \quad C_1 = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_g = [B_1 \ B_2],$$

$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{двi}}{T_{двi}} \end{bmatrix}^T$, $D_{11} = D_{12} = [0 \ 0 \ Q_3]^T$, $D_{21} = D_{22} = [0 \ 0]^T$, $i=x$, при $\alpha = \gamma$, $i=y$, при $\alpha = \psi$, $i=z$, если $\alpha = \vartheta$, $C_{\omega_{i1}}$ – коэффициент гидродинамического сопротивления вращательному движению НПА вокруг i -й оси, $I_i + \lambda_{jj}$ – момент инерции НПА и присоединенный момент инерции жидкости относительно i -й оси.

Для обеспечения требований к быстродействию при синтезе используется смещенная матрица объекта $\tilde{A} = A + \beta I$, где β – параметр смещения.

На основе представленной схемы синтеза была предложена следующая методика настройки СУ.

1) На начальном этапе проводится синтез для несмещенного объекта ($\beta = 0$) со следующими значениями весовых коэффициентов: $Q_1 = Q_2 = Q = \frac{w^*}{\Delta\alpha}$.

2) Для полученной СУ проверяется выполнение условий малости нормы передаточных функций по возмущению, если условия не выполняются, то необходимо увеличить коэффициент Q .

3) Для полученной СУ необходимо проверить запасы устойчивости в точках «а» и «b», если СУ имеет недостаточные запасы в точке «а», то рекомендуется увеличение коэффициента Q_2 .

4) Проверяется выполнение требований к быстродействию, если требования не выполняются, то увеличивается значение параметра β и повторяется процесс синтеза с п.1.

5) Для полученной системы проверяется величина частоты среза системы в точке «с».

6) Если частота среза больше желаемой, то устанавливается фильтр (апериодическое звено первого порядка). После установки фильтра для системы повторно проверяются п. 1 – 4.

Если при этом не получилось обеспечить заданные требования к СУ, то выбранный подход к синтезу не подходит, необходимо повышение качества работы информационно-измерительного комплекса или снижение требований к допустимым динамическим ошибкам в СУ.

Работоспособность методики была проверена методами математического моделирования в программе Matlab с использованием дополнения Robust Control Toolbox и включала следующие этапы: синтез и исследование отдельных каналов, исследование совместной работы каналов при выполнении тестовых движений 1-3 как для номинальной СУ, так и для СУ с отклонениями параметров НПА от номинальных до 50 %.

Регуляторы курса, дифферента и крена, синтезированные по предложенной методике, обеспечили радиусы запасов устойчивости более 0.83 для всех каналов (и всех точек размыкания СУ), при этом запасы по амплитуде составили более 22 дБ, а по фазе более 76° . Переходные процессы в СУ дифферентом с отклонением параметров НПА (моментов инерции, коэффициентов усиления движителей и др.) от номинальных до 50% приведены на Рис. 6, а, (100 итераций с разными отклонениями параметров) и соответствуют заданными требованиями.

Динамические ошибки в каналах крена и дифферента при выполнении тестового движения 1 на номинальной модели не превышали 0.1° и 0.5° (для СУ с алгоритмом декомпозиции) и 0.1° , 0.2° (для СУ с линеаризацией обратной связью), а для модели, параметры которой отклоняются от номинальных в пределах 50% - не превышали 1.5° (для СУ с алгоритмом декомпозиции) и -0.5° (для СУ с линеаризацией обратной связью). То есть полученные регуляторы позволили уменьшить динамические ошибки более чем в 20 раз в сравнении с декомпозированной

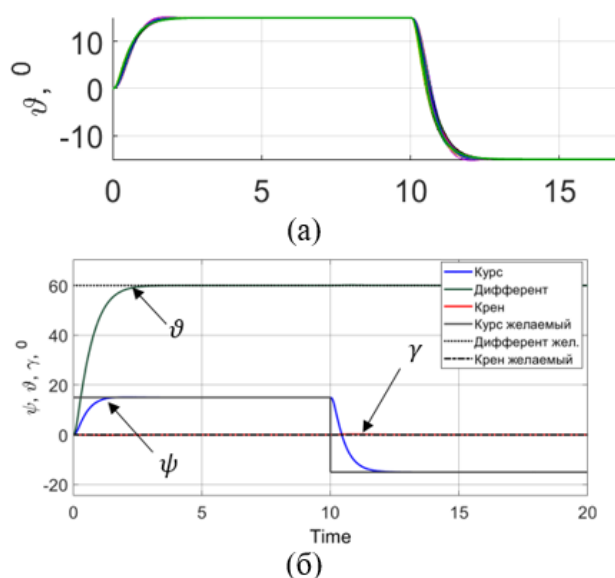


Рис. 6. Переходные процессы в СУ

СУ с традиционным регулятором и более чем в 100 раз в сравнении с не декомпозированной.

В шестой главе был разработан алгоритм, обеспечивающий работоспособность СУ, построенных на основе углов Эйлера-Крылова, во всем диапазоне углов ориентации. Ограничения работоспособности СУ вызваны следующими особенностями углов Эйлера-Крылова: вырождением кинематических уравнений при угле дифферента $\pm 90^\circ$ (3); неоднозначностью описания ориентации (4); неотличимостью углов курса и крена при угле дифферента $\pm 90^\circ$ (5); переключением угла крена на 180° , когда значение угла дифферента находится в окрестности $\pm 90^\circ$ (4). Для устранения перечисленных ограничений была предложена схема построения СУ, представленная на Рис. 7.

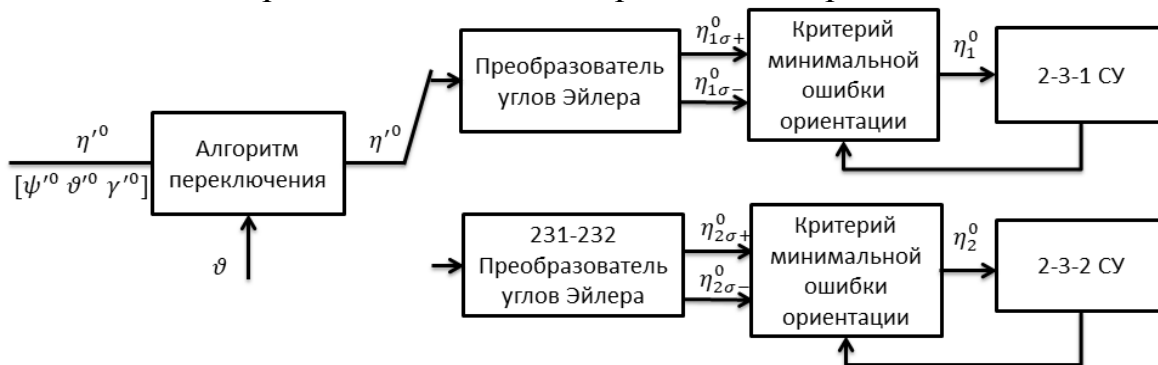


Рис.7. Схема СУ, не имеющей ограничений на углы наклона

СУ включает в себя две подсистемы: основную, использующую углы Эйлера-Крылова (2-3-1 СУ), и вспомогательную (2-3-2 СУ), использующую углы Эйлера, и работает следующим образом. Оператор задает желаемую ориентацию НПА, изменяя углы Эйлера-Крылова η'^0 . В зависимости от величины текущего угла дифферента НПА алгоритм переключения выбирает подсистему, которая будет формировать управляющие сигналы. Переключение на вспомогательную СУ происходит в окрестности особой точки.

Поверхность переключения от СУ 2-3-1 к СУ 2-3-2 соответствует условию:

$$|\sin \vartheta| > |\sin(\vartheta_{max} + \delta)|, \quad (21)$$

где $\delta \geq 0$ и выбрано таким, чтобы не нарушалось условие $\vartheta_{max} + \delta < 90^\circ$, и ϑ_{max} выбрано в окрестности критической точки. Обратный переход из СУ с 2-3-2 к СУ 2-3-1 происходит по условию:

$$|\cos \varphi \sin \Theta| > |\sin(\vartheta_{max} - \delta)|. \quad (22)$$

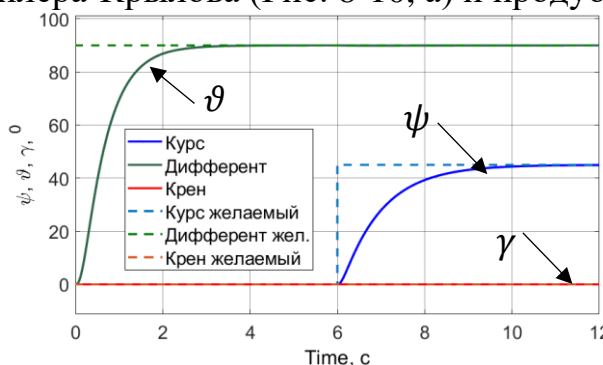
В случае, когда алгоритм переключения выбирает СУ, основанную на углах Эйлера-Крылова, заданные углы ориентации поступают на вход преобразователя углов Эйлера. В блоке преобразователя в соответствии с выражениями (4) вычисляются две триады углов Эйлера-Крылова для значений параметра $\sigma = \pm 1$. Полученные триады $\eta_{1\sigma+}^0, \eta_{1\sigma-}^0$ поступают на вход блока критерия минимальной ошибки ориентации, где используются для расчета двух возможных векторов ошибок:

$$\varepsilon_{\eta}^j = \eta_{1j}^0 - \eta_1, \quad j = \sigma+, \sigma-. \quad (23)$$

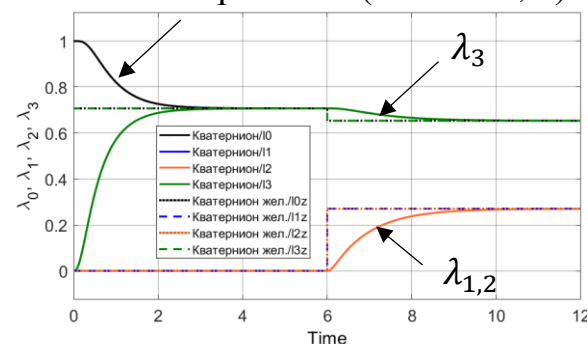
Для каждого вектора ошибок ориентации вычисляется квадратичная норма. Из полученных значений выбирается триада углов, норма которой имеет наименьшее значение. Вектор желаемой ориентации η_1^0 , соответствующий наименьшей норме, передается далее в СУ. Такой подход позволяет решить проблему неоднозначности и избежать потери устойчивости СУ.

В том случае, если алгоритм переключения выбирает подсистему 2-3-2, то желаемая ориентация НПА, заданная в углах Эйлера-Крылова, поступает на блок 231-232 преобразователя углов Эйлера, который вычисляет соответствующие углы Эйлера, далее расчет проводится аналогичным образом. Подсистемы 2-3-2 и 2-3-1 построены на основе алгоритма декомпозиции и регуляторов сепаратных каналов.

Работоспособность СУ была проверена в ходе численных экспериментов на 7 тестовых движениях, которые проверяли работу СУ: в окрестности особой точки с малым поворотом по крену или курсу (см. Рис. 8); работу на границе области переключения (см. Рис. 9); при поворотах по курсу/крену, когда дифферент $\pm 90^\circ$ (см. Рис. 8, 9); при выполнении тестовой траектории, которая задается изменением параметров кватерниона желаемой ориентации по синусоиде (см. Рис. 10). Переходные процессы на рисунках приведены для углов Эйлера-Крылова (Рис. 8-10, а) и продублированы в кватернионах (Рис. 8-10, б).

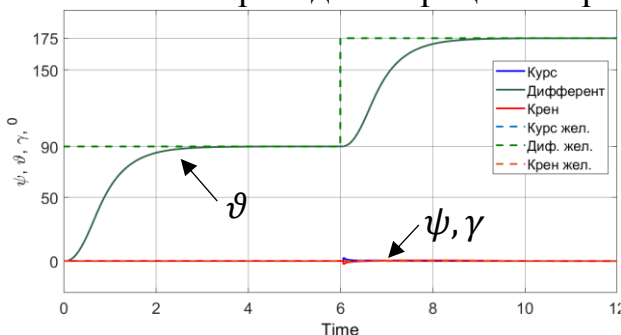


(а)

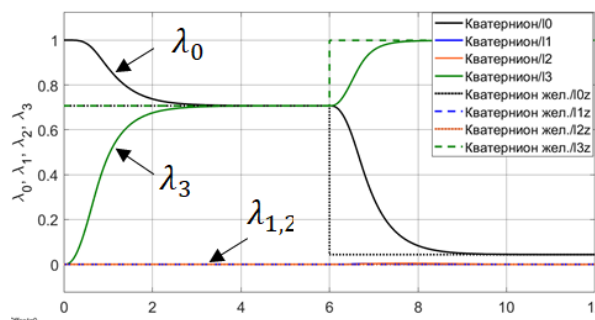


(б)

Рис. 8. Переходные процессы при выполнении тестового движения 4



(а)



(б)

Рис. 9. Переходные процессы при выполнении тестового движения 5

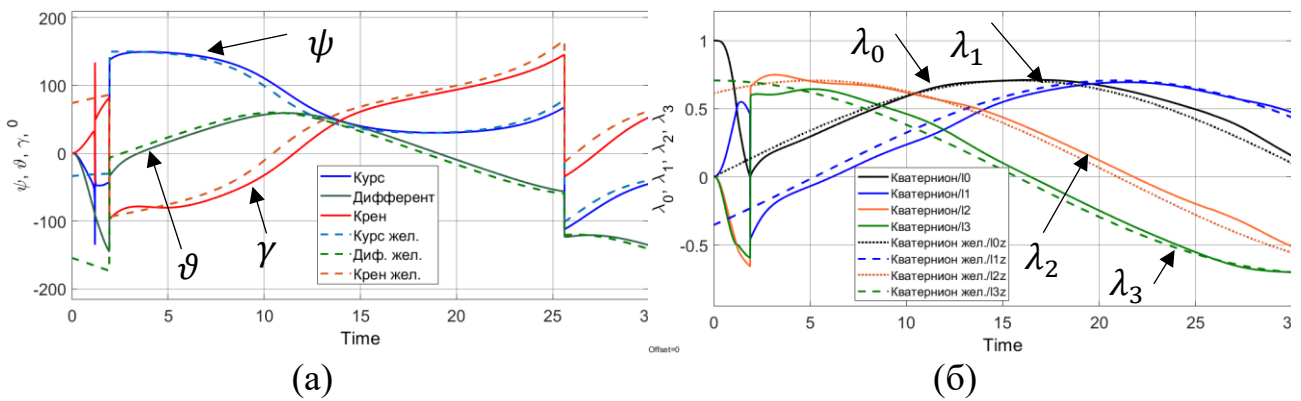


Рис.10. Переходные процессы при выполнении тестового движения 10

Кроме того, работа СУ проверялась при выполнении тестовых движений в режиме 2. Переходные процессы в СУ, где НПА в начальный момент времени был наклонен по дифференту на 45° , а затем был подан сигнал ω_y^0 поворота вокруг оси Oy , представлены на Рис. 11. Переходные процессы для угловых скоростей ω_x, ω_z , представленные на Рис. 11, б, показывают, что традиционной СУ свойственны перекрестные возмущения в каналах управления вращением НПА вокруг своих осей. В то же время при выполнении аналогичного движения в СУ, основанной на кватернионах, возмущения в каналах поворота НПА вокруг осей Ox, Oz отсутствуют.

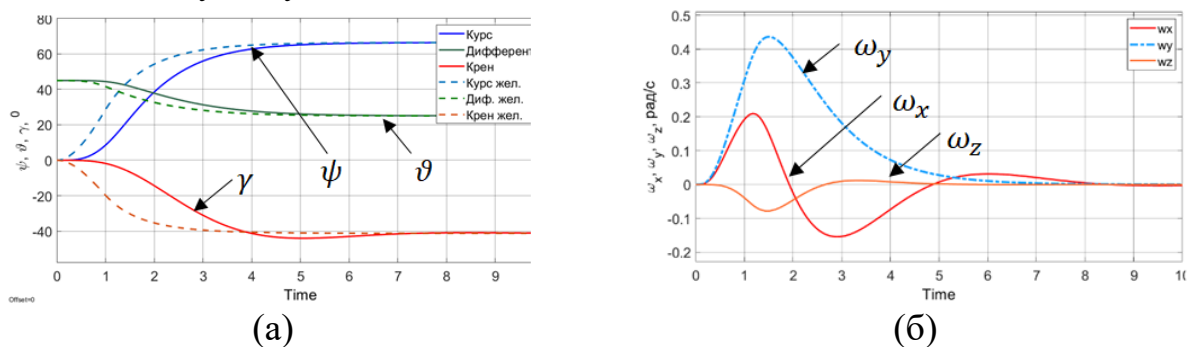


Рис. 11. Переходные процессы в СУ в режиме 2

Общие выводы и заключение

В работе получены следующие результаты:

- 1) Проведен обзор задач, требующих повышенной манёвренности, существующих подходов к построению СУ ориентацией НПА, определены режимы работы и требования к СУ.
- 2) Проведено исследование особенностей работы традиционных СУ при больших углах наклона, определены причины ухудшения качества работы СУ с ростом углов наклона. Аналитические выводы подтверждаются как результатами численных, так и натурных экспериментальных исследований.
- 3) Разработаны и проверены экспериментально алгоритмы декомпозиции, повышающие качество работы традиционных СУ. Даны практические рекомендации по настройке алгоритмов.
- 4) Разработана методика синтеза СУ сепаратным каналом, основанная на H_∞ - подходе, обеспечивающая малые динамические ошибки от перекрестных

возмущений. Приведены рекомендации по реализации регуляторов на практике.

5) Разработаны и проверены алгоритмы, обеспечивающие работоспособность СУ, основанной на углах Эйлера-Крылова, во всем диапазоне углов ориентации.

6) Проведено исследование особенностей работы СУ, построенной на основе кватернионов, при больших углах наклона.

7) Приведены рекомендации по выбору структуры и алгоритмов СУ НПА повышенной манёвренности в зависимости от приоритетных режимов работы НПА и требований к качеству переходных процессов.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача разработки алгоритмов и методов построения СУ ориентацией НПА, обеспечивающих требуемое качество управления во всем диапазоне углов ориентации.

2) Согласованность аналитических выводов, результатов численных и натурных экспериментов свидетельствуют в целом о достоверности основных положений и решений задач диссертации.

Список публикаций по теме диссертации

1. Лямина Е. А., Егоров С.А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 3(75). С. 6-17. (0,63 п.л./0,6 п.л.)

2. Лямина, Е. А. Подходы к построению системы управления угловым положением необитаемого подводного аппарата без ограничений на углы наклона // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № S1. С. 224-234. (0,6 п.л.)

3. Гаврилина Е. А., Вельтищев В. В. Управление ориентацией высокоманевренного необитаемого подводного аппарата с использованием кватернионов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2021. №2. С. 106-112. (0,53 п.л. /0,5 п.л.)

4. Е.А. Гаврилина, В.Н. Честнов. Синтез системы управления высокоманевренного необитаемого подводного аппарата с использованием Н ∞ подхода // Вестник МГТУ «Станкин». 2022. №1 (60). С. 64 – 72. (0,79 п.л / 0,77 п.л.)

5. Е.А. Гаврилина. Подход к построению системы управления подводного аппарата повышенной маневренности, работоспособной во всем диапазоне углов ориентации // Подводные исследования и робототехника. 2022. №2 (40). С. 39-53. (1,06 п.л.)

6. Е. А. Gavrilina, V. N. Chestnov, A. N. Kropotov, «A Decomposition Algorithm for Attitude Control of the Remotely Operated Vehicle at Large Pitch and Roll Angles» // 2019 18th European Control Conference (ECC). 2019. P. 3334-3339. (0,57 п.л./0,55 п.л.)

7. E.A. Gavrilina, V.N. Chestnov, «Synthesis of an Attitude Control System for Unmanned Underwater Vehicle Using H-infinity Approach» // IFAC-PapersOnLine. 2020. V. 53. I. 2, P. 14642-14649. (0,87 п.л./ 0,83 п.л.)
8. E. Gavrilina, V. Chestnov, «Singularity-Free Attitude Control of the Unmanned Underwater Vehicle» // 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). 2020. P. 512-519. (0,91 п.л/ 0,89 п.л.)
9. E. Gavrilina, V. Veltishev, A. Kropotov, «Attitude Control System of a Highly Maneuverable Hybrid ROV for Ship-Hull Inspection» // OCEANS 2021: San Diego – Porto. 2021. P. 1-6. (0,66 п.л. / 0,64 п.л.)
10. Лямина Е.А., Егоров С.А. Особенности построения системы управления угловым положением подводного аппарата с учетом перекрестных связей между каналами для больших углов крена и дифферента // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016): Материалы 9-ой Мультиконференции по проблемам управления, Санкт-Петербург. 2016. С. 183-191. (0,33 п.л. / 0,3 п.л.)
11. Лямина, Е. А., Егоров С.А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2017. Т. 7, С. 351-356. (0,42 п.л. / 0,38 п.л.)
12. Гаврилина Е.А. Управление ориентацией необитаемого подводного аппарата с использованием кватернионов // Материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием в рамках Международного научного форума «Каспий 2021: пути устойчивого развития». 2021. С.86-90. (0,31 п.л.)
13. Экспериментальное исследование алгоритмов управления ориентацией необитаемого подводного аппарата при больших углах наклона / Гаврилина Е.А. [и др.] // Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2019». 2019. Т.II. С.95-99. (0,14 п.л. / 0,12 п.л.)
14. Гаврилина Е.А., Честнов В.Н. Система управления ориентацией НПА с режимами движения при больших углах наклона // Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и XI молодёжной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». 2020. С. 214 - 218. (0,29 п.л. / 0,27 п.л.)