

*На правах рукописи*



**Буй Ван Там**

**СИНТЕЗ РЕЗОНАНСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ  
ДВИЖЕНИЙ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАТФОРМ НА ПОДВИЖНОМ  
ОСНОВАНИИ**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Юркевич Валерий Дмитриевич**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра автоматике, профессор.

Официальные оппоненты: **Колюбин Сергей Алексеевич**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», (ИТМО), факультет систем управления и робототехники, профессор, руководитель лаборатории биомехатроники и энергоэффективной робототехники.

**Котов Константин Юрьевич**  
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматике и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук», (ИАиЭ СО РАН), лаборатория нечётких технологий, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук», (ИПУ РАН), г. Москва.

Защита диссертации состоится «**10**» **июля 2024 г. в 12.00** часов на заседании совета 24.2.347.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск пр-т К. Маркса, д. 20, I корпус, конференц - зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации [www.nstru.ru](http://www.nstru.ru).

Автореферат разослан «    » мая 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета 24.2.347.06, д.т.н., доцент



Вагин Денис Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Эффективность работы большого числа прецизионных бортовых информационно – управляющих систем на подвижных объектах существенным образом зависит от точности углового позиционирования этих систем. С целью устранения влияния колебаний подвижной основы на такое оборудование, его размещают на специальной стабилизированной платформе. Применение системы угловой стабилизации платформы позволяет изолировать специальное оборудование от действия перемещений подвижного основания. Необходимо отметить, что тема диссертационного исследования также непосредственно связана с решением проблем компенсации возмущений при разработке высокоточных систем для стабилизации аппаратуры наблюдения и вооружения на подвижных платформах. Решение проблемы подавления периодических возмущающих воздействий является актуальной при проектировании активных систем виброизоляции операторов промышленных установок и промышленного оборудования. В диссертационной работе рассматривается проблема синтеза эффективных систем управления для стабилизации углового положения платформ на подвижном основании.

В силу расширения области практического применения стабилизированных платформ и повышения требований к точности их углового позиционирования при действии внешних возмущений можно отметить, что разработка методов синтеза эффективных систем управления для стабилизации углового положения платформ на подвижном основании является актуальной научно - технической задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** При решении задачи синтеза систем управления для стабилизации платформ на подвижном основании могут быть использованы различные методы, такие как адаптивное управление (J. Jao, W. Deng, Y. Zhu, J. Liu), синтез на основе H-infty подхода (O. Sushenko), методы нечеткой логики (J.Y. Li), бэкстеппинг (X. Zibin, Y. Chen, C Kaddissi), системы на основе формирования скользящих режимов (H. Wang, A. G. Luokianov, L. Fraguera, V. V. Alexandrov, P. C. P. Chao). Также используются методы синтеза следящих систем управления (A.G. Luokianov, J. Rivera, Y.V. Orlov) и нейросетевого управления (Б. И. Кузнецов, Т.Е. Василец, А.А. Варфоломеев).

Повышение точности угловой стабилизации платформы может быть достигнуто согласно теории инвариантных систем (В.С. Кулебакин) путем реализации принципа двухканальности или на основе применения больших коэффициентов усиления в обратной связи (М.В. Мееров).

Применение больших коэффициентов усиления в обратной связи (Крутько П.Д., Филимонов Н.Б.) приводит к рассмотрению динамических систем с разнотемповыми процессами (А.Н. Тихонов, Н.Н. Красовский, А.И. Климушев, Е.И. Геращенко). При анализе свойств систем управления с разнотемповыми процессами привлекается метод разделения движений (М.В. Мееров, С.А. Краснова, В.А. Уткин, А.С. Антипов, А.В. Уткин).

Учитывая гармонический или полигармонический характер возмущающих воздействий на угловое положение платформы на корабле, для решения задачи стабилизации платформы в структуру регулятора можно дополнительно включить

модель возмущающего воздействия (принцип внутренней модели) (В.А. Francis, W.M. Wonham, R. Costa-Castello), что позволяет обеспечить свойство селективной инвариантности регулируемых величин в системе управления по отношению к периодическим возмущениям определенной частоты (В.О. Никифоров, А.А. Бобцов, А.С. Кремлев, А.А. Пыркин, С.А. Колюбин, С.В. Арановский). При проектировании селективно-инвариантных систем управления применяется полиномиальный метод синтеза (А.Р. Гайдук, В.В. Аполонский, Л.Г. Копылова, С.В. Тарарыкин, И.А. Тихомирова). Алгоритмы управления с моделью гармонического возмущения также называют резонансными регуляторами (О.В. Нос, А.Г. Гарганеев, D. Halim, R. Teodorescu, C. Citro, L.F. A. Pereira, Z. Pan, F. Hans, A. De Heredia, C. Lorenzini).

Включение модели возмущения в структуру регулятора приводит к увеличению динамического порядка системы, что усложняет процедуру расчета регулятора. В этом случае могут привлекаться методы синтеза адаптивных систем с наблюдателями (А.Л. Фрадков, А.А. Бобцов, А.А. Пыркин), расчет регуляторов на основе решения матричного уравнения Сильвестра (А.Р. Гайдук) или путем решения линейных матричных неравенств (Д.В. Баландин, М.М. Коган). Однако отмеченные выше методы не дают явных расчетных соотношений для выбора параметров резонансных регуляторов.

**Цель диссертационного исследования.** Целью диссертационного исследования является разработка и исследование алгоритмов управления для решения проблемы угловой стабилизации платформ на подвижном основании с учётом требования на заданную степень подавления влияния гармонических возмущений или требования асимптотической устойчивости углового положения платформы при действии гармонических возмущений.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1) Выполнить обзор существующих методов синтеза систем управления для стабилизации платформ.

2) Рассмотреть математические модели стабилизированной платформы с электрогидроприводом в качестве исполнительного механизма.

3) Разработать методику синтеза алгоритмов управления для стабилизации платформ с учетом влияния малых инерционностей электрогидропривода.

4) Разработать методику синтеза алгоритмов управления для стабилизации платформ, обеспечивающих заданную степень подавления гармонических возмущений.

5) Разработать методику синтеза одноканальных и многоканальных систем угловой стабилизации платформы, обеспечивающих асимптотическую устойчивость переходных процессов по регулируемым переменным и инвариантность углового положения платформы по отношению к гармоническим возмущениям.

**Объектом исследования** являются стабилизированные платформы на подвижном основании с электрогидроприводом в качестве исполнительного механизма.

**Предметом исследования** является синтез регуляторов на основе принципа внутренней модели и метода разделения движений при действии гармонических возмущений.

**Методы исследования.** Методы теории автоматического управления, методы анализа разнотемповых процессов в динамических системах, теория матриц, аппарат функций чувствительности. При численном моделировании использовался MatLAB/Simulink.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Предложены новые структуры резонансных алгоритмов управления для обеспечения асимптотической устойчивости процессов по регулируемым переменным при гармонических возмущениях (п. 2, 4, 14 паспорта специальности 2.3.1).

2. Разработана методика синтеза алгоритмов управления для стабилизации платформ с учетом влияния малых инерционностей электрогидропривода (п. 4, 14 паспорта специальности 2.3.1).

3. Разработана методика синтеза алгоритмов управления для стабилизации платформ с заданной степенью подавления влияния гармонических возмущений на основе функции чувствительности (п. 4, 14 паспорта специальности 2.3.1).

4. Разработана методика синтеза одноканальных и многоканальных систем угловой стабилизации платформ, обеспечивающих асимптотическую устойчивость заданного положения платформ при гармонических возмущениях (п. 4, 14 паспорта специальности 2.3.1).

**Практическая значимость и реализация результатов работы.** Результаты работы могут быть использованы при решении задач управления, связанных с подавлением влияния гармонических или полигармонических возмущений, для стабилизации положения платформ, в системах активной виброизоляции операторов и промышленного оборудования, а также при проектировании высокоточных систем воспроизведения гармонических режимов поведения регулируемых переменных на стендах прочностных испытаний механических конструкций.

Результаты работы были использованы при разработке алгоритмов управления для электрогидроприводов в Сибирском научно-исследовательском институте авиации имени С. А. Чаплыгина (СибНИА, г. Новосибирск) и в учебном процессе на кафедре автоматики Новосибирского государственного технического университета (НЭТИ), г. Новосибирск, что подтверждается актами внедрения.

**Личный вклад автора** состоит в предложении темы исследования и непосредственном решении поставленных задач диссертационного исследования, а именно: разработке математической модели стабилизированной платформы с электрогидроприводом, разработке методики применения функций чувствительности при выборе параметров регуляторов, разработке методик синтеза резонансных регуляторов для стабилизации платформы с электрогидроприводом, проведении численного моделирования разработанных систем управления с использованием математического пакета MatLAB/Simulink. Постановка цели и задач диссертационного исследования осуществлялась автором совместно с научным руководителем Юркевичем В.Д.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

1) По пункту 2: Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки;

2) По пункту 4: Разработка методов и алгоритмов решения задач системного оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

3) По пункту 14: Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов системы управления с целью улучшения и технических характеристик.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1) Методика синтеза регуляторов на основе метода разделения движений и функции чувствительности, позволяющая обеспечить заданную степень подавления влияния гармонических возмущений;

2) Методика синтеза резонансных ПИ регуляторов на основе метода разделения движений для одноканальных и многоканальных систем управления стабилизированной платформой с жесткими связями, позволяющая учесть влияние малых инерционностей электрогидропривода на устойчивость системы управления;

3) Методика синтеза резонансных регуляторов методом разделения движений для системы подавления колебаний упругого подвеса, позволяющая обеспечить асимптотическую устойчивость положения подвеса при гармонических возмущениях;

4) Методика синтеза резонансных ПИД регуляторов на основе метода разделения движений для одноканальных и многоканальных систем управления стабилизированной платформой с упругими связями, позволяющая осуществить выбор параметров резонансных компонент регулятора независимо от выбора параметров для компонент ПИД регуляторов.

**Достоверность и обоснованность** результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью расчетных соотношений, сходимостью результатов аналитических исследований с результатами численного моделирования.

**Публикации.** Всего опубликовано 10 печатных работ, в том числе 10 работ по теме диссертационного исследования, из них: количество публикаций, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации 2.3.1 – 2; 6 статей в изданиях, проиндексированных в Scopus или Web of Science; 2 статьи в других публикации.

**Структура и объём диссертации:** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 1 приложения. Объём диссертации составляет 151 страницу, включая 54 рисунка, 3 таблицы. Список литературы содержит 124 наименования.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснованы актуальность темы диссертации, цели и задач, научная новизна, теоретическая и научная значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов и общие сведения о диссертации.

В первой главе рассмотрены математические модели электрогидропривода, математические модели углового перемещения стабилизированной платформы по тангажу и крену. Получена математическая модель стабилизированной платформы с двумя степенями свободы на корабле для случая жесткой кинематической связи платформы с штоком гидроцилиндров. Кинематические схемы рассматриваемых стабилизированных платформ показаны на рисунках 1 - 3.

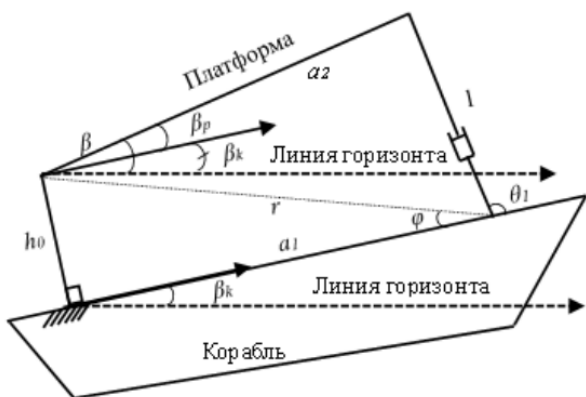


Рисунок 1- Кинематическая схема модели стабилизированной платформы по тангажу

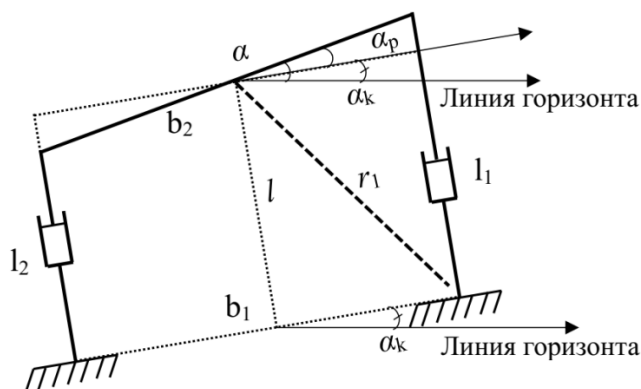


Рисунок 2- Кинематическая схема модели стабилизированной платформы по крену

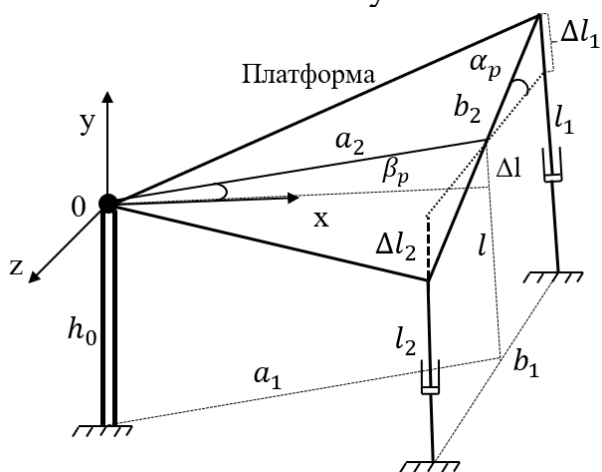


Рисунок 3 - Кинематическая схема платформы на корабле с двумя степенями свободы

Углы наклона стабилизированной платформы определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} \beta = \beta_p + \beta_k, \\ \alpha = \alpha_p + \alpha_k. \end{cases}$$

Цель управления, необходимо обеспечить требования:

$$\begin{cases} \limsup_{t \rightarrow \infty} |\beta(t)| = 0, \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} |\alpha(t)| = 0, \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \limsup_{t \rightarrow \infty} |\beta(t)| \leq \varepsilon_\beta, \\ \limsup_{t \rightarrow \infty} |\alpha(t)| \leq \varepsilon_\alpha. \end{cases}$$

Рассматривается математическая модель электрогидравлического привода следующего вида (рисунок 4):

$$\begin{cases} \tau_v \dot{x}_v = -x_v + k_v u, \\ Q_1 = K_q x_v - K_c P_h, \\ Q_1 = A_h \dot{X}_h + \frac{V_h}{4E_h} \dot{P}_h + C_{hl} P_h, \\ A_{hl} P_h = m \ddot{X}_h + B_h \dot{X}_h + F_h. \end{cases}$$

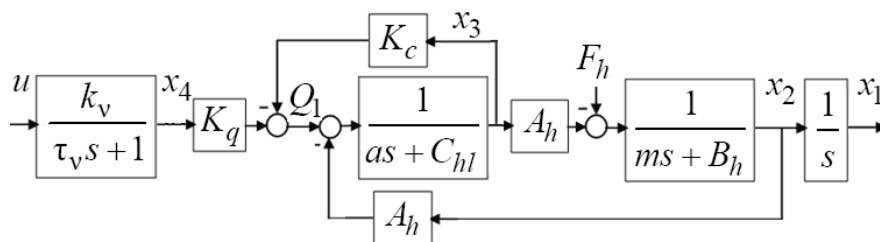


Рисунок 4 - Структурная схема математической модели электрогидравлического привода

Из структурной схемы на рисунке 4, получена передаточная функция электрогидропривода вида:

$$W(s) = \frac{x_1(s)}{u(s)} = \frac{b}{s(\tau_1 s + 1)(\tau_2^2 s^2 + 2d\tau_2 s + 1)},$$

$$d = \frac{mC_{hl} + mK_c + aB_h}{2\tau(B_{hl}C_{hl} + K_c B_h + A_h^2)}, \quad a = \frac{V_h}{4E_h},$$

где  $b = \frac{k_v K_q A_h}{B_{hl} C_{hl} + K_c B_h + A_h^2},$   
 $\tau_2 = \sqrt{\frac{ma}{B_{hl} C_{hl} + K_c B_h + A_h^2}}.$

**Во второй главе** представлена разработанная процедура синтеза одноканального ПИ регулятора и резонансного ПИ регулятора для стабилизации платформы на корабле на основе метода разделения движений. Разработана методика расчета регулятора методом разделения движений на основе функции чувствительности, позволяющая определять параметры регулятора исходя из требования на точность регулирования при действии гармонических возмущений.

Рассматривается упрощенная модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом следующего вида:

$$\frac{d\beta}{dt} = b_0 u + \bar{\beta}_k, \quad \text{где } b_0 = \frac{\partial \beta}{\partial l} b; \quad \bar{\beta}_k = \frac{d\beta_k}{dt}.$$

Предложена новая структура для резонансного регулятора и рассмотрены свойства системы управления с двумя вариантами алгоритма управления, которые заданы следующими выражениями:

$$u(s) = -k_0 \left( \frac{s + T^{-1}}{\mu s} \right) \beta(s),$$

$$u(s) = -k_0 \left( \frac{s + T^{-1}}{\mu s} \right) \left( \frac{s^2 + k_r s + \omega_1^2}{s^2 + \omega_1^2} \right) \beta(s),$$

где  $\mu$  малый положительный параметр,  $\mu > 0$ . Соответствующие структурные схемы рассматриваемых систем управления показаны на рисунках 5, 6.

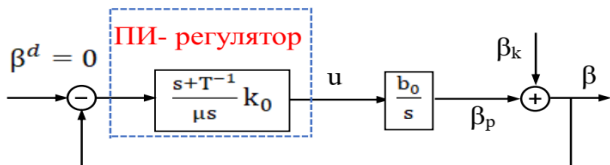


Рисунок 5 - Структурная схема для стабилизированной платформы с ПИ-регулятором

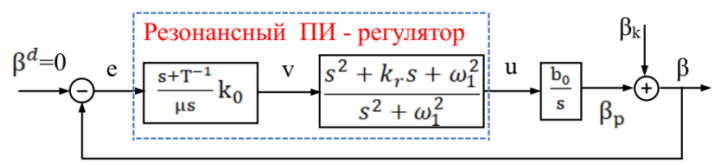


Рисунок 6 - Структурная схема для стабилизированной платформы с резонансным ПИ-регулятором

В результате анализа свойств замкнутых систем методом разделения движений, получены характеристические полиномы подсистемы быстрых движений (ПБД) и подсистемы медленных движений (ПМД) в двух случаях:

Характеристический полином ПБД:

$$A_{ПБД}(s) = \mu s + k_0 b_0.$$

Характеристический полином ПМД:

$$A_{ПМД}(s) = s + T^{-1}.$$

Характеристический полином ПБД:

$$A_{ПБД}(s) = \mu s + k_0 b_0.$$

Характеристический полином ПМД:

$$A_{ПМД}(s) = (s + T^{-1})(s^2 + k_r s + \omega_1^2).$$



При двухчастотных гармонических возмущениях предлагается использовать алгоритм ПИ регулятора с двумя резонансными блоками.

$$u(s) = -k_0 \left( \frac{s+T^{-1}}{\mu s} \right) \left( \frac{s^2 + k_{r1}s + \omega_1^2}{s^2 + \omega_1^2} \right) \left( \frac{s^2 + k_{r2}s + \omega_2^2}{s^2 + \omega_2^2} \right) \beta(s).$$

Структурная схема для стабилизированной платформы с ПИ - регулятором с двумя резонансными блоками показана на рисунке 7.



Рисунок 7- Структурная схема для стабилизированной платформы с ПИ-регулятором с двумя резонансными блоками

В результате анализа свойств замкнутой системы методом разделения движений получены характеристические полиномы ПБД и ПМД следующего вида:

$$A_{ПБД}(s) = \mu s + k_0 b_0 \quad \text{и} \quad A_{ПМД}(s) = (s + T^{-1})(s^2 + k_{r1}s + \omega_1^2)(s^2 + k_{r2}s + \omega_2^2).$$

Таким образом показано, что введение резонансных блоков предлагаемого вида не влияет на характеристический полином ПБД, а полиномы числителя резонансных блоков входит в характеристический полином ПМД.

На рисунках 8 - 9 приведены результаты моделирования при следующих параметрах системы управления:

$$\bar{b} = 0,0165; b = 4,9533; b_0 = \bar{b}b = 0,82; k_0 = 1/b_0 = 1,22; T = 0,5 \text{ c}; \eta = 20; \\ \mu = T/\eta = 0,025 \text{ c}; \quad \omega_1 = 2 \text{ рад/с}; \quad \omega_2 = 3 \text{ рад/с}; \quad k_{r1} = 2\omega_1; k_{r2} = 2\omega_2;$$

Результаты моделирования для системы с упрощенной моделью стабилизированной платформы показаны на рисунках 8 - 9.

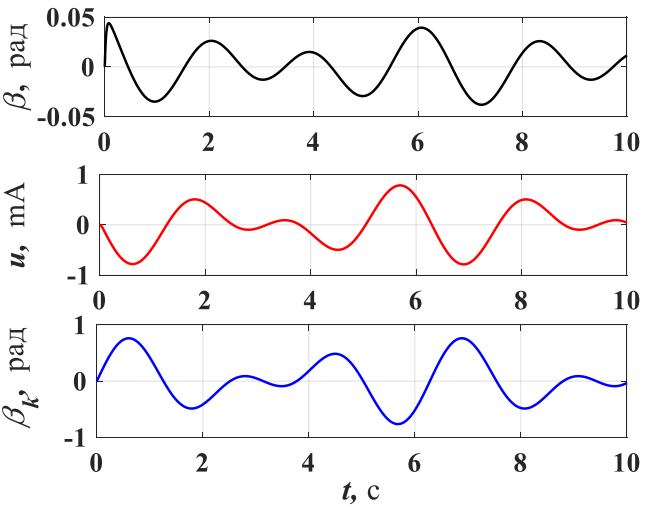


Рисунок 8- Результаты моделирования для системы на рисунке 5 с ПИ-регулятором без резонансных блоков

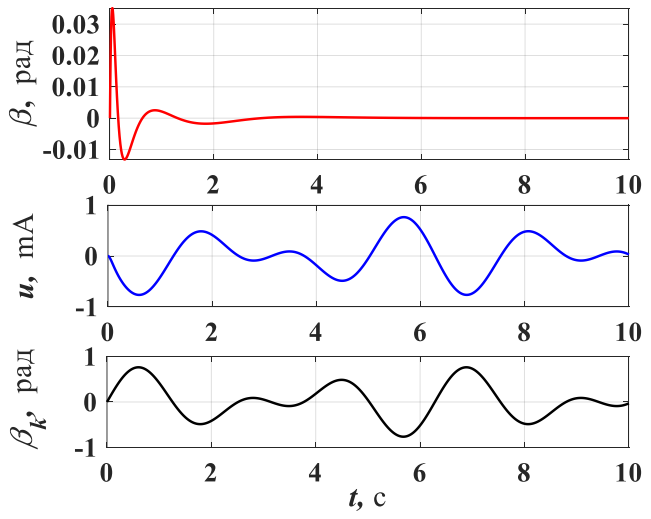


Рисунок 9- Результаты моделирования для системы на рисунке 7 с ПИ-регулятором с резонансными блоками

Предложена методика синтеза регулятора на основе метода разделения движений и функции чувствительности, например, для системы на рисунке 5 функция чувствительности имеет вид:

$$S(\mu, s) = \frac{\beta(\mu, s)}{\beta_k(s)} = \frac{\mu s^2}{\mu s^2 + k_0 b_0 (s + T^{-1})}.$$

Предложена методика выбора параметра  $\mu$  на основе требований к функции чувствительности и к степени разделения темпов быстрых и медленных процессов:

$$|S(\mu, j\omega_1)| \leq \varepsilon, \quad \eta(\mu) = \left[ \min_{i=1,2} |\operatorname{Re}(s_i^{\text{ПБД}}(\mu))| \right] / |s^{\text{ПМД}}| \geq \eta_{\min}.$$

Предлагается выбирать параметр  $\mu$  в соответствии с условием:  $0 < \mu \leq \{\mu_\eta, \mu_\varepsilon\}$ .

Рассматривается задача синтеза ПИ - регулятора для стабилизации платформы с учетом влияния малых параметров  $\tau_1, \tau_2$  электрогидропривода, где модель платформы задана передаточной функцией вида:

$$W(s) = \frac{b_0}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2^2 s^2 + 2d\tau_2 s + 1)s}.$$

В первом случае рассматривается система для модели стабилизированной платформы с учетом влияния малых параметров  $\tau_1, \tau_2$  и ПИ - регулятором, которая показана на рисунке 10, где

$$u(s) = -k_0 \left( \frac{s + T^{-1}}{\mu s} \right) \beta(s).$$

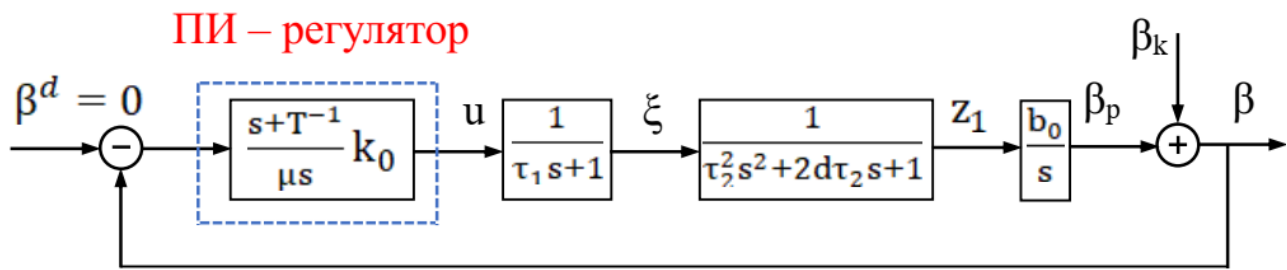


Рисунок 10 - Структурная схема для модели стабилизированной платформы с ПИ - регулятором с учетом малых параметров  $\tau_1, \tau_2$

В результате анализа свойств замкнутой системы получены характеристические полиномы ПБД и ПМД в следующем виде:

$$A_{\text{ПБД}}(s) = \mu s (\tau_1 s + 1) (\tau_2^2 s^2 + 2d\tau_2 s + 1) + k_0 b_0 \quad \text{и} \quad A_{\text{ПМД}}(s) = s + T^{-1}.$$

Предложена методика расчета параметра  $\mu$  с учетом функции чувствительности. Так для системы на рисунке 10 функция чувствительности имеет вид:

$$S(\mu, s) = \frac{\beta(\mu, s)}{\beta_k(s)} = \frac{\mu s^2 (\tau_1 s + 1) (\tau_2^2 s^2 + 2d\tau_2 s + 1)}{\mu s^2 (\tau_1 s + 1) (\tau_2^2 s^2 + 2d\tau_2 s + 1) + k_0 b_0 (s + T^{-1})}.$$

Графики, которые показывают зависимость  $|S(\mu, j\omega_1)|$  и степени разделения темпов быстрых и медленных процессов  $\eta(\mu)$  от параметра  $\mu$  в системе стабилизации платформы (рисунок 10), показаны на рисунках 11, 12:

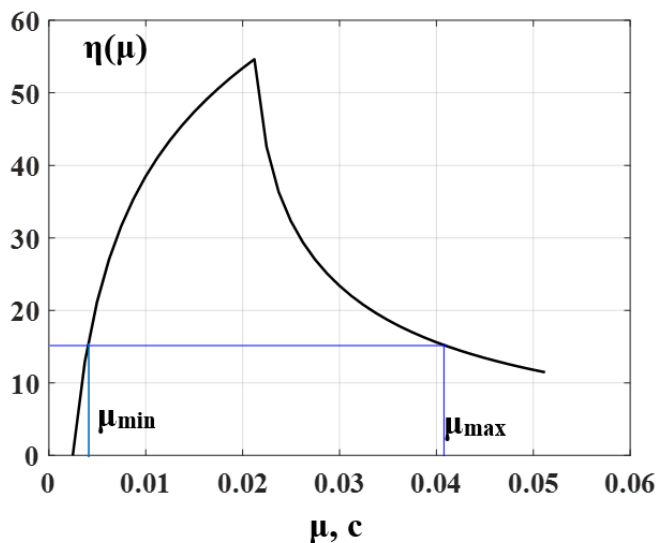


Рисунок 11 - Зависимость  $\eta(\mu)$  от параметра  $\mu$

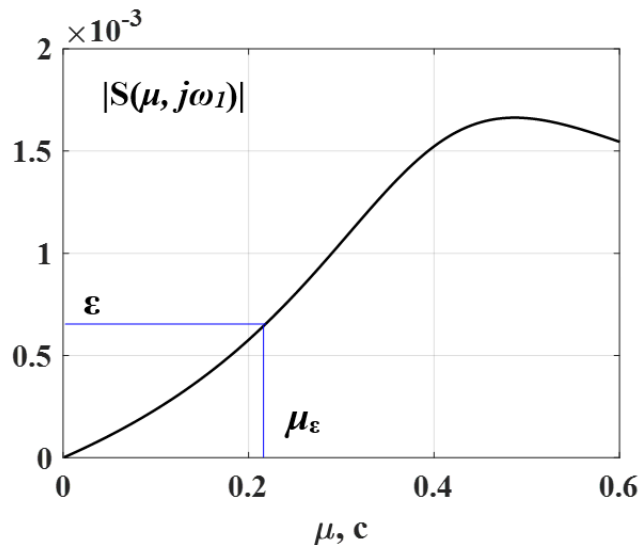


Рисунок 12 - Зависимость  $|S(\mu, j\omega_1)|$  от параметра  $\mu$

Предлагается выбирать параметр  $\mu$  в соответствии с условиями:

$$\mu \in [\mu_{\min}, \mu_{\max}], \mu \leq \mu_{\epsilon}.$$

В втором случае рассматривается синтез ПИ регулятора для модели стабилизированной платформы с резонансным ПИ – регулятором. Предлагается резонансный алгоритм управления вида:

$$u(s) = -k_0 \left( \frac{s + T^{-1}}{\mu s} \right) \left( \frac{s^2 + k_r s + \omega_1^2}{s^2 + \omega_1^2} \right) \beta(s).$$

Структурная схема для модели стабилизированной платформы с учетом влияния малых параметров  $\tau_1, \tau_2$  в модели электрогидропривода и резонансным ПИ - регулятором показана на рисунке 13.

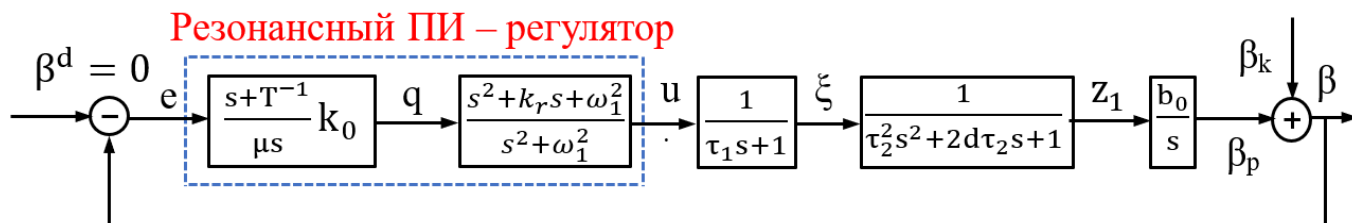


Рисунок 13 - Структурная схема для стабилизированной платформы с учетом малых параметров  $\tau_1, \tau_2$  и резонансным ПИ - регулятором

В результате анализа свойств системы на рисунке 13 получены характеристические полиномы ПБД и ПМД в следующем виде:

$$A_{ПБД}(s) = \mu s (\tau_1 s + 1) (\tau_2^2 s^2 + 2d\tau_2 s + 1) + k_0 b_0 \text{ и } A_{ПМД}(s) = (s + T^{-1}) (s^2 + k_r s + \omega_1^2).$$

Результаты моделирования системы с учетом влияния малых параметров  $\tau_1, \tau_2$  (рисунок 13) приведены на рисунках 14 и 15, которые были получены при следующих параметрах:

$$\bar{b} = 0,0165; b = 4,9533; b_0 = \bar{b}b = 0,82; k_0 = 1/b_0 = 1,22; T = 0,5 \text{ c};$$

$$\eta = 20; \mu = T/\eta = 0,025 \text{ c}; \tau_1 = 0,001 \text{ c}; \tau_2 = 0,0031 \text{ c}; \omega_1 = 2 \text{ рад/c}; k_{r1} = 2\omega_1.$$

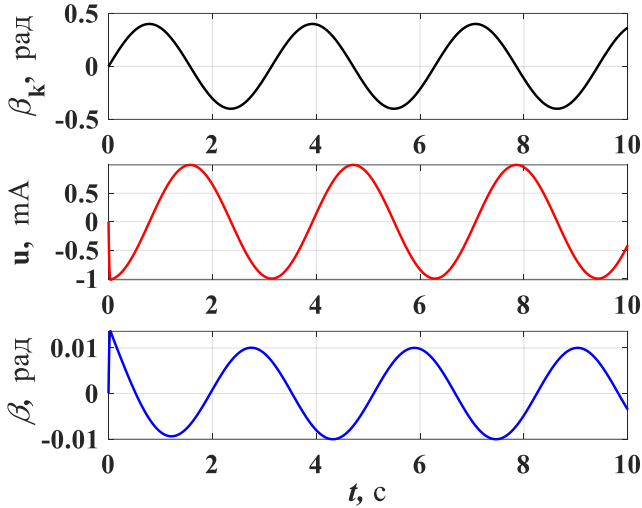


Рисунок 14 - Результаты моделирования для системы на рисунке 10 без резонансного блока

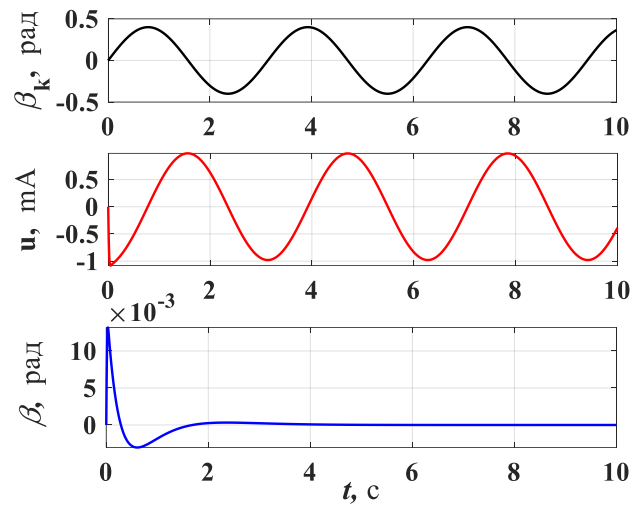


Рисунок 15 - Результаты моделирования для системы на рисунке 13 с резонансным блоком

В третьей главе разработана процедура синтеза двухканального ПИ-регулятора для двухканальной стабилизированной платформы на корабле на основе метода разделения движений. Рассматривается математическая модель для двухканальной стабилизированной платформы в следующем виде:

$$\dot{y} = Gu + F; y = [y_1, y_2]^T = [\beta, \alpha]^T; u = [u_1, u_2]^T; F = [\bar{\beta}_k, \bar{\alpha}_k]^T$$

В первом случае рассматривается задача синтеза ПИ регулятора для двухканальной стабилизированной платформы. Предлагается алгоритм управления следующего вида:

$$u = K_0 \tilde{y}, \quad \mu \dot{\tilde{y}} = -[\mathcal{T}y + \dot{y}],$$

где  $\mathcal{T} = \text{diag} \{T_1, T_2\}, K_0 \in R^{2 \times 2}$ .

Структурная схема для двухканальной стабилизированной платформы с ПИ-регулятором показана на рисунке 16.

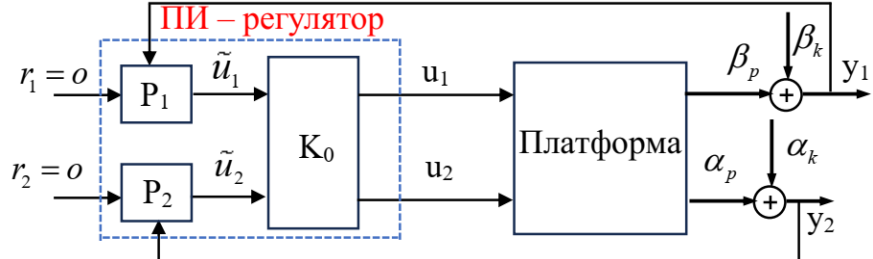


Рисунок 16 - Структурная схема для двухканальной стабилизированной платформы с ПИ-регулятором без резонансных блоков

В результате анализа свойств системы на рисунке 16 получены при  $K_0 = G^{-1}$  характеристические полиномы ПБД и ПМД в следующем виде:

$$A_{ПБД}(s) = (\mu s + 1)^2 \text{ и } A_{ПМД}(s) = (s + T^{-1})^2.$$

Во втором случае рассматривается синтез двухканального резонансного ПИ-регулятора для стабилизации платформы (рисунок 17), где уравнения резонансного ПИ-регулятора имеют следующий вид:

$$u = K_0 \tilde{u}; \quad \tilde{u} = [\tilde{u}_1, \tilde{u}_2]^T; \quad \tilde{u}_i(s) = - \left( \frac{s + T^{-1}}{\mu_i s} \right) \left( \frac{s^2 + k_{r1} s + \omega_1^2}{s^2 + \omega_1^2} \right) y_i(s); \quad i = 1, 2.$$

Структурная схема двухканальной системы управления для стабилизации платформы с резонансным ПИ-регулятором показана на рисунке 17.

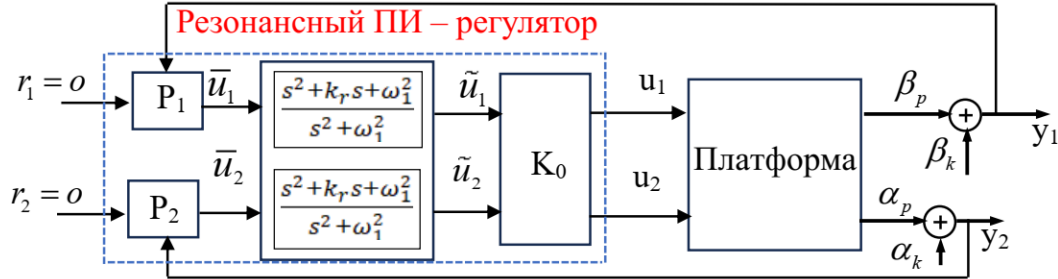


Рисунок 17 - Структура двухканальной системы управления для стабилизации платформы с резонансным ПИ - регулятором в каждом канале

В результате анализа свойств двухканальной системы, представленной на рисунке 17, методом разделения движений получены характеристические полиномы ПБД и ПМД вида:

$$A_{ПБД}(s) = (\mu s + 1)^2 \text{ и } A_{ПМД}(s) = (s + T^{-1})^2 (s^2 + k_r s + \omega_1^2)^2 \text{ при } K_0 = G^{-1}.$$

В третьем случае предложена структура ПИ регулятора с двумя резонансными блоками для двухканальной стабилизированной платформы. При гармоническом возмущении с двумя частотами предлагается использовать ПИ-регуляторы с двумя резонансными блоками в каждом канале:

$$\begin{cases} \tilde{u}_i(s) = - \left( \frac{s + T^{-1}}{\mu_i s} \right) \left( \frac{s^2 + k_{r1} s + \omega_1^2}{s^2 + \omega_1^2} \right) \left( \frac{s^2 + k_{r2} s + \omega_2^2}{s^2 + \omega_2^2} \right) y_i(s), \\ u = K_0 \tilde{u}; \quad \tilde{u} = [\tilde{u}_1, \tilde{u}_2]^T; \quad i = 1, 2. \end{cases}$$

Структурная схема для двухканальной стабилизированной платформы с двумя резонансными блоками в каждом канале показана на рисунке 18.



Рисунок 18 - Структурная схема двухканальной стабилизированной платформы с двумя резонансными блоками в каждом канале

В результате анализа свойств системы на рисунке 18 получены характеристические полиномы ПБД и ПМД в следующем виде при  $K_0 = G^{-1}$ :

$$A_{ПБД}(s) = (\mu s + 1)^2 \text{ и } A_{ПМД}(s) = (s + T^{-1})^2 (s^2 + k_{r1}s + \omega_1^2)^2 (s^2 + k_{r2}s + \omega_2^2)^2.$$

Результаты моделирования для модели двухканальной стабилизированной платформы с двумя резонансными блоками показаны на рисунках 19, 20, которые были получены при следующих параметрах системы:

$$b_{01} = 3,977; b_{02} = 0,8156; k_{01} = 1/b_{01}; k_{02} = 1/b_{02}; T = 0,5 \text{ с}; \eta = 20; \mu = T/\eta = 0,025 \text{ с}$$

$$\omega_1 = 2 \text{ рад/с}; \omega_2 = 3 \text{ рад/с}; k_{r1} = 2\omega_1; k_{r2} = 2\omega_2.$$

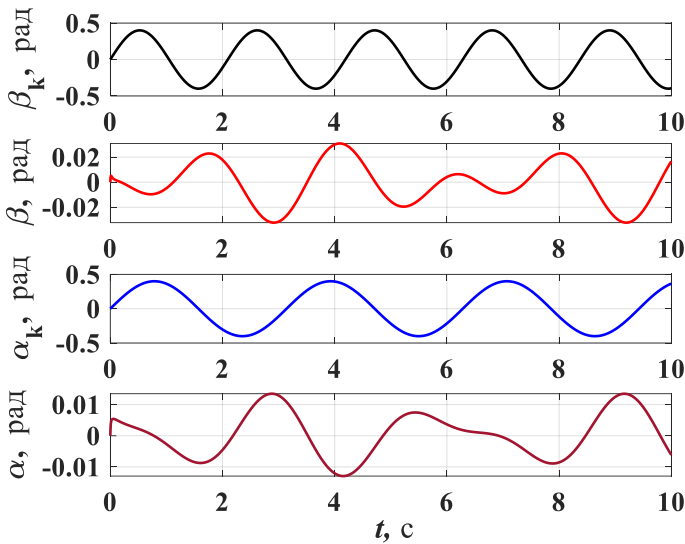


Рисунок 19 - Результаты моделирования для двухканальной системы с ПИ-регулятором

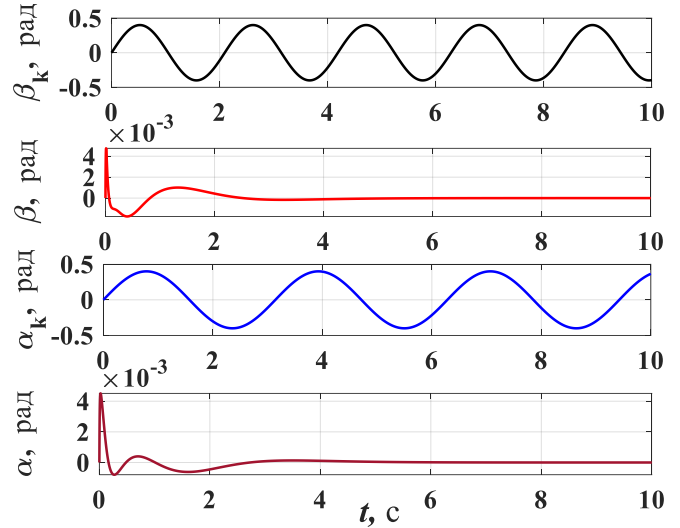


Рисунок 20 - Результаты моделирования для двухканальной системы с двумя резонансными блоками

В четвертой главе рассмотрена математическая модель системы стабилизации положения упругого подвеса (рисунок 21).

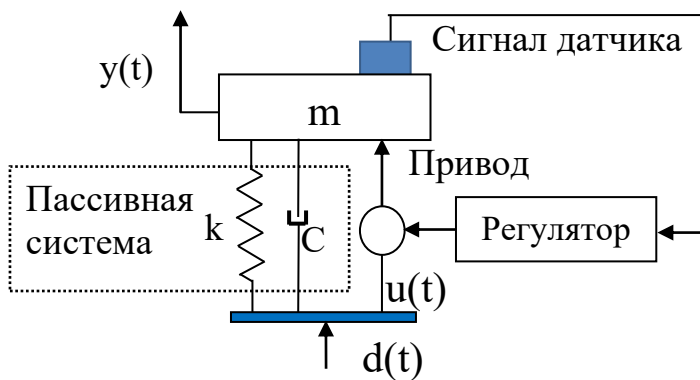


Рисунок 21 - Функциональная схема системы стабилизации положения упругого подвеса с ПИД регулятором

Рассмотрена математическая модель упругого подвеса в следующем виде:

$$m y^{(2)} + c y^{(1)} + k y = b(u + d).$$

Цель управления, необходимо обеспечить требования:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} |y(t)| \leq \varepsilon, \quad t > 0$$

или

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} |y(t)| = 0, \quad t > 0$$

В первом случае рассматривается задача синтеза ПИД - регулятора методом разделения движений для модели упругого подвеса. Предлагается использовать алгоритм управления в следующем виде:

$$u(s) = -k_0 \left( \frac{s^2 + a_1^d T^{-1} s + T^{-2}}{\mu^2 s^2 + d_1 \mu s} \right) y(s).$$

Структурная схема для модели упругого подвеса с ПИД - регулятором показана на рисунке 22.

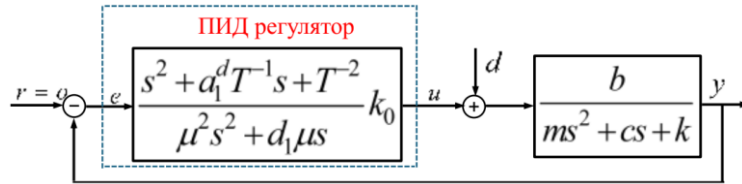


Рисунок 22 - Структурная схема для модели упругого подвеса с ПИД - регулятором

В результате анализа свойств системы на рисунке 22 методом разделения движений получены характеристические полиномы ПБД и ПМД в следующем виде:

$$A_{ПБД}(s) = \mu^2 s^2 + d_1 \mu s + \frac{k_0 b}{m} \quad \text{и} \quad A_{ПМД}(s) = s^2 + a_1^d T^{-1} s + T^{-2}.$$

Во втором случае рассматривается задача синтеза резонансного ПИД - регулятора методом разделения движений для модели упругого подвеса. Предлагается использовать алгоритм управления в следующем виде:

$$u(s) = -k_0 \left( \frac{s^2 + a_1^d T^{-1} s + T^{-2}}{\mu^2 s^2 + d_1 \mu s} \right) \left( \frac{s^2 + k_r s + \omega_1^2}{s^2 + \omega_1^2} \right) y(s).$$

Структурная схема для модели упругого подвеса с резонансным ПИД - регулятором показана на рисунке 23.

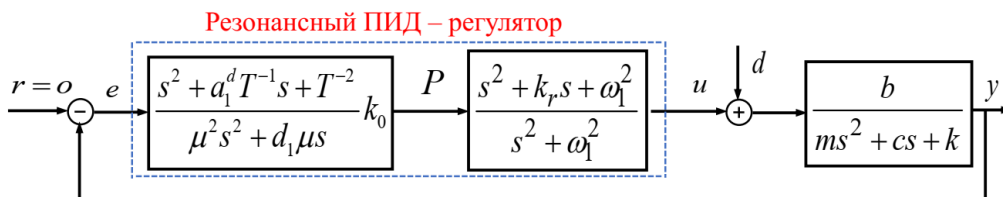


Рисунок 23 - Структурная схема для модели упругого подвеса с резонансным ПИД - регулятором

В результате анализа свойств системы на рисунке 23 получены характеристические полиномы ПБД и ПМД в следующем виде.

$$A_{ПБД}(s) = \mu^2 s^2 + d_1 \mu s + \frac{k_0 b}{m} \quad \text{и} \quad A_{ПМД}(s) = (s^2 + a_1^d T^{-1} s + T^{-2}) (s^2 + k_r s + \omega_1^2).$$

Предложена методика расчета параметра  $\mu$  регулятора для системы на рисунке 22 на основе функции чувствительности. Передаточная функция чувствительности  $S(s) = y(s)/d(s)$  имеет вид:

$$S(\mu, s) = \frac{b_0 (\mu^2 s^2 + d_1 \mu s)}{(\mu^2 s^2 + d_1 \mu s) (s^2 + a_1 s + a_0) + k_0 b_0 (s^2 + a_1^d T^{-1} s + T^{-2})}.$$

Здесь  $a_1 = c/m$ ,  $a_0 = k/m$  и  $b_0 = b/m$ .

Тогда дополнительное требование при выборе параметра  $\mu$  на основе функции чувствительности получаем из условия:  $|S(\mu, j\omega_1)| \leq \varepsilon$ .

Результаты моделирования для модели упругого подвеса в двух случаях показаны на рисунках 24, 25.

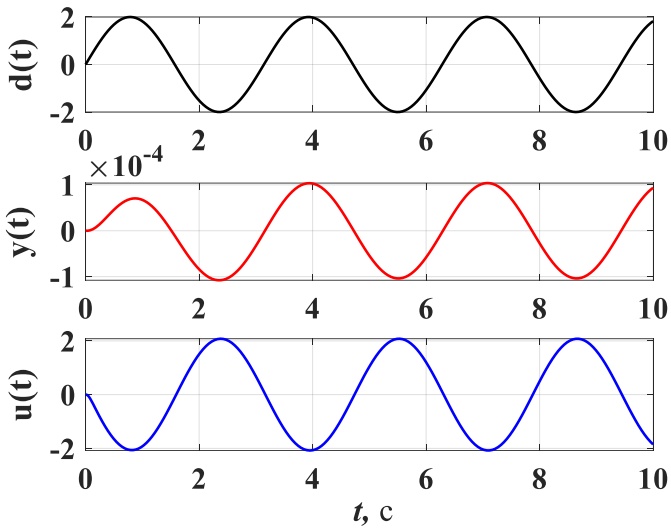


Рисунок 24 - Результаты моделирования для модели упругого подвеса с ПИД - регулятором

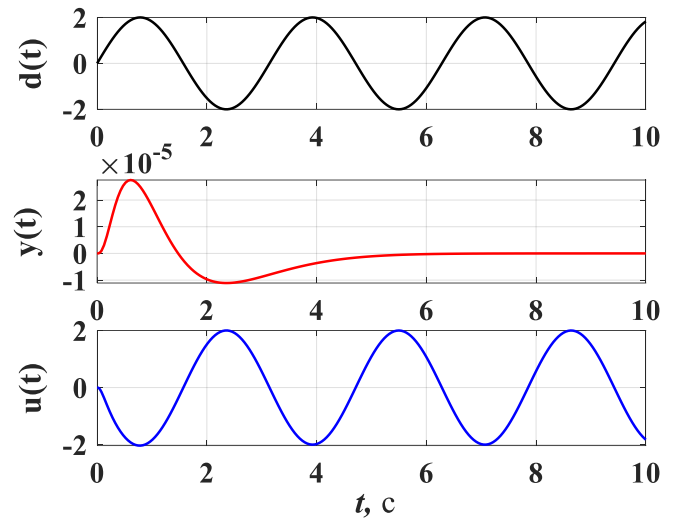


Рисунок 25 - Результаты моделирования для модели упругого подвеса с резонансным ПИД - регулятором

В пятой главе рассмотрена математическая модель стабилизированной платформы для случая упругой кинематической связи платформы и штоков гидроцилиндров. Разработана процедура синтеза двухканального ПИД - регулятора для стабилизированной платформы на корабле на основе метода разделения движений.

Для кинематической схемы на рисунке 26, модель для углового положения платформы описывается уравнением Лагранжа:

$$Jy^{(2)} + \bar{C}y^{(1)} + \bar{G}y = u + f,$$

которое можно представить в виде:

$$\begin{cases} \dot{X} = Ax + B(u + f) \\ y = Cx \end{cases}; \text{ где } X = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} O & I \\ -J^{-1}\bar{G} & -J^{-1}\bar{C} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} O \\ J^{-1} \end{bmatrix}; C = [I \quad O]; y = [y_1, y_2]^T = [\beta, \alpha]^T.$$

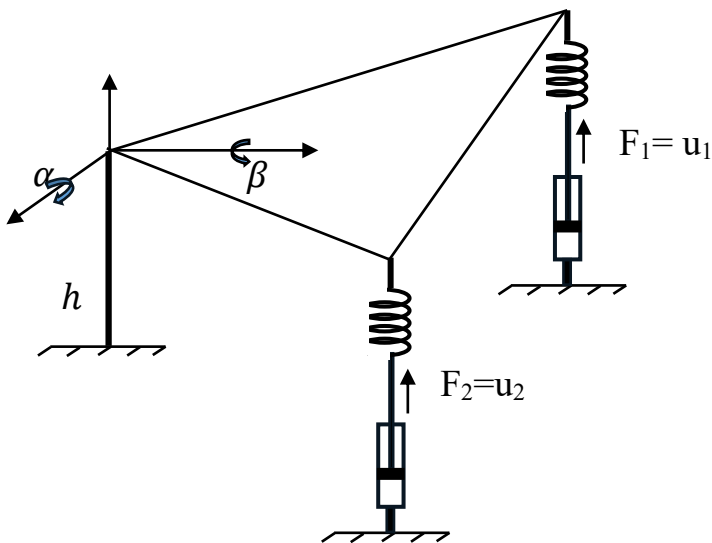


Рисунок 26 - Кинематическая схема платформы с упругими связями

Цель управления состоит в том, что необходимо обеспечить требования:

$$\begin{cases} \limsup_{t \rightarrow \infty, t > 0} |y_1(t)| = 0, \\ \limsup_{t \rightarrow \infty, t > 0} |y_2(t)| = 0, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \limsup_{t \rightarrow \infty, t > 0} |y_1(t)| \leq \epsilon_{y_1}, \\ \limsup_{t \rightarrow \infty, t > 0} |y_2(t)| \leq \epsilon_{y_2}. \end{cases}$$



В первом случае рассматривается задача синтеза ПИД - регулятора методом разделения движений для двухканальной стабилизированной платформы с упругими связями. Предложен алгоритм управления вида:

$$\begin{cases} u = K_0 \tilde{u}, \\ \tilde{u}_i(s) = - \left( \frac{s^2 + a_i^d T_i^{-1} s + T_i^{-2}}{\mu_i^2 s^2 + d_i \mu_i s} \right) y_i(s), \quad i=1,2. \end{cases}$$

Структурная схема для двухканальной стабилизированной платформы с ПИД-регулятором показана на рисунке 27.

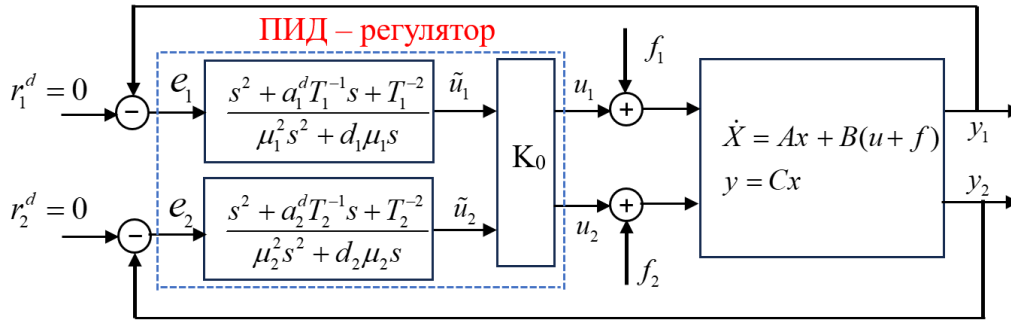


Рисунок 27 - Структура системы управления для двухканальной стабилизированной платформы с ПИД-регулятором

В результате анализа свойств системы на рисунке 27 получены характеристические полиномы ПБД и ПМД в следующем виде.

$$A_{ПБД}(s) = (\mu^2 s^2 + d\mu s + 1)^2 \text{ и } A_{ПМД}(s) = (s^2 + a^d T^{-1} s + T^{-2})^2 \text{ при } K_0 = J.$$

Во втором случае рассматривается задача синтеза резонансного ПИД - регулятора для двухканальной стабилизированной платформы с упругими связями. Предлагается алгоритм управления в следующем виде:

$$u = K_0 \tilde{u}, \quad \tilde{u}_i(s) = - \left( \frac{s^2 + a_i^d T_i^{-1} s + T_i^{-2}}{\mu_i^2 s^2 + d_i \mu_i s} \right) \left( \frac{s^2 + k_r s + \omega_1^2}{s^2 + \omega_1^2} \right) y_i(s), \quad i=1,2.$$

Структурная схема для двухканальной стабилизированной платформы с резонансным ПИД – регулятором показана на рисунке 28.

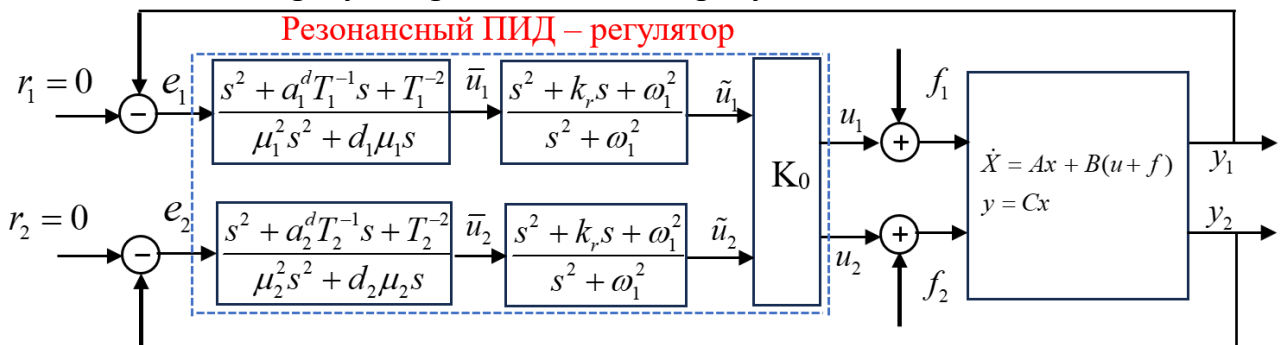


Рисунок 28 - Структура системы управления для двухканальной стабилизированной платформы с резонансным ПИД – регулятором

В результате анализа свойств системы на рисунке 28 получены характеристические полиномы ПБД и ПМД в следующем виде:

$$A_{ПБД}(s) = (\mu^2 s^2 + d\mu s + 1)^2 \text{ и } A_{ПМД}(s) = (s^2 + a^d T^{-1} s + T^{-2})^2 (s^2 + k_r s + \omega_1^2)^2.$$

В третьем случае предложен ПИД - регулятор с двумя резонансными блоками в каждом канале при гармоническом возмущении в виде суммы колебаний с двумя частотами. Структурная схема с таким регулятором показана на рисунке 29.



Рисунок 29 - Структура системы управления для двухканальной стабилизированной платформы с двумя резонансными блоками

Для замкнутой системы в данном случае получены характеристические полиномы ПБД и ПМД при  $K_0 = J$  в следующем виде:

$$A_{ПБД}(s) = (\mu^2 s^2 + d\mu s + 1)^2, \quad A_{ПМД}(s) = (s^2 + a^d T^{-1} s + T^{-2})^2 (s^2 + k_{r1} s + \omega_1^2)^2 (s^2 + k_{r2} s + \omega_2^2)^2.$$

Результаты моделирования двухканальной системы управления для стабилизированной платформы с ПИД - регулятором и двумя резонансными блоками в каждом канале показаны на рисунках 30, 31. Моделирование двухканальной системы управления стабилизированной платформой были выполнено при следующих параметрах платформы и регулятора:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.145 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.667 & 0.333 \\ 0 & 0 \\ 0.051 & -0.051 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$T = 0,5 \text{ c}; \quad \eta = 20; \quad \mu = T/\eta = 0,025 \text{ c}; \quad \omega_1 = 2 \text{ рад/c};$$

$$\omega_2 = 3 \text{ рад/c}; \quad k_{r2} = 2\omega_1; \quad k_{r1} = 2\omega_2; \quad a^d = 2; \quad d = 2.$$

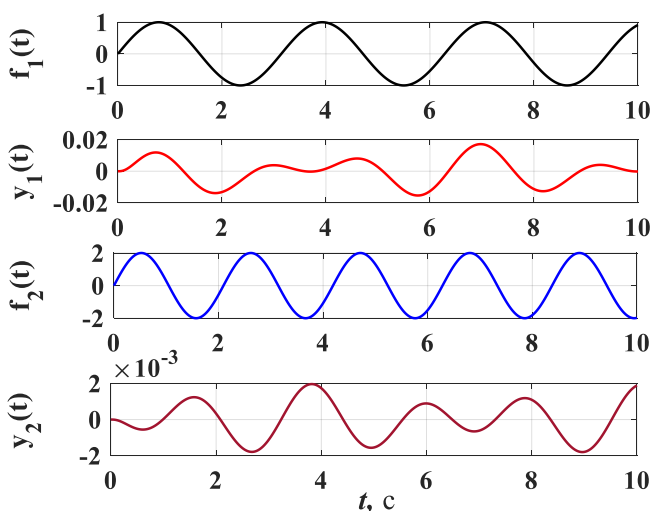


Рисунок 30 - Система без резонансных блоков в каналах управления

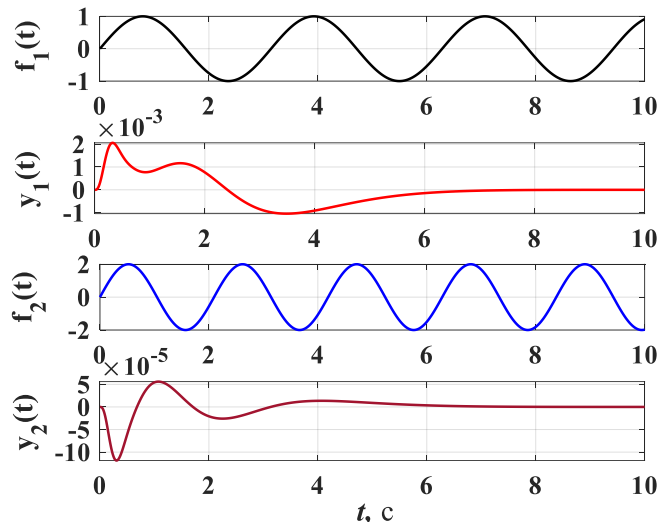


Рисунок 31 - Система с двумя резонансными блоками

Таким образом показано, что введение резонансного ПИД - регулятора позволяет обеспечить селективную инвариантность углового положения платформы в установившемся режиме в условиях действия внешних гармонических

возмущений, а применение метода разделения движений позволяет осуществить выбор параметров резонансных блоков независимо от выбора параметров ПИД - регуляторов.

**Процедура синтеза резонансного регулятора методом разделения движений:**

- 1) Формирование математической модели платформы с электрогидроприводом;
- 2) Выбор структуры ПИ - регулятора или ПИД - регулятора в соответствии со структурой математической модели платформы с электрогидроприводом;
- 3) Выбор параметра  $k_0 = 1/b_0$  для одноканальной системы или  $K_0 = G^{-1}$  для двухканальной системы управления;
- 4) Выбор параметра  $T$  в соответствии с требованием на время переходного процесса для ошибки регулирования;
- 5) Выбор числа резонансных блоков исходя из частотного спектра возмущений;
- 6) Расчет параметра  $\mu$  в соответствии с требованиями на степень подавления гармонических возмущений и разделения темпов быстрых и медленных процессов в системе управления;
- 7) Проверка устойчивости быстрых процессов и степени разделения темпов быстрых и медленных процессов в системе с учетом малых параметров электрогидропривода.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе решены поставленные задачи и получены следующие результаты:

1. Разработана методика синтеза ПИ - регуляторов для угловой стабилизации платформ методом разделения движений с учетом влияния малых инерционностей электрогидропривода.
2. Разработана методика синтеза ПИ и ПИД - регуляторов для угловой стабилизации платформ на основе метода разделения движений и функции чувствительности с заданной степенью подавления гармонических возмущений.
3. Предложены новые структуры резонансных алгоритмов управления для стабилизации платформ, позволяющие обеспечить асимптотическую устойчивость углового положения платформ при гармонических и полигармонических возмущениях;
4. Разработана методика синтеза резонансных ПИ и ПИД - регуляторов для одноканальных и многоканальных систем угловой стабилизации платформ, позволяющая осуществить выбор параметров резонансных компонент регулятора независимо от выбора параметров компонент ПИ и ПИД - регуляторов.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК*

1. **В. Т. Буй.** Резонансный ПИ - регулятор для судовой электрогидравлической стабилизированной платформы / В. Т. Буй, В. Д. Юркевич // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 81–87. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-81-87.

**2. Буй Т.В.** Математическая модель стабилизированной платформы с электрогидроприводом на корабле // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 3 (91). – С. 7–18. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-3-7-18.

*Публикации в материалах зарубежных и периодических изданиях, входящих в базу данных Scopus и/или Web of Science*

**3. Bui Van Tam.** Synthesis of an Adaptive Slide Controller for a Stabilized object on the Ship // 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russia, 2020, pp. 237–240, doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314633

**4. Bui Van Tam, Yurkevich V.D.** PID Resonant Controller for Suppressing the Oscillations of an Elastic Suspension // 16th International Conference on Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1–3, doi: 10.1109/STAB54858.2022.9807473.

**5. Bui V.T, Yurkevich V.D.** Platform Stabilization on a Ship under Wave Disturbances // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer, and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 1740–1743, doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017114.

**6. Bui Van Tam, Yurkevich V.D.** Resonant PI Controller Design for the Electrohydraulic Drive of a Stabilized Platform System // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 29 июня – 3 июля, 2023, pp. 1690-1694, doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225123.

**7. Bui Van Tam, Yurkevich V.D.** Stabilized Platform Control System Design Based on Time-Scale Separation Method // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 1080–1085, doi: 10.1109/APEIE59731.2023.10347614.

*Другие публикации по теме диссертации*

**8. Bui Van Tam.** Модификация метода расчета ПИД – регулятора для колебательного объекта второго порядка с запаздыванием // Автоматика и программная инженерия. 2021, №2(35), С. 21 – 27.

**9. Bui Van Tam.** Построение математической модели корабельной платформы для подавления эффектов качки // Автоматика и программная инженерия. 2021, №2(36), С. 96 – 109.

**10. Буй В.Т.** Математическая модель стабилизированной платформы на корабле // Сборник научных трудов XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых. В 11-и частях. Том Часть 1. Новосибирск, 2022, С. 36 – 40.

**Личный вклад автора в совместные публикации**

[1,4,5,6,7] - разработка алгоритмов управления, методик синтеза резонансных регуляторов для платформы и подвеса, проведение расчетов и моделирование.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383)346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1.5 п. л. Тираж 110 экз  
Заказ № Р - 03281. Подписано в печать 08.05.2024 г.