

На правах рукописи



Бу Суан Хыонг

**УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ БЕЗОПАСНОГО
ПРИЧАЛИВАНИЯ РЕЧНЫХ СУДОВ**

Специальность 05.13.01 –

«Системный анализ, управление и обработка информации»

(информатика, управление и вычислительная техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Лебедев Георгий Николаевич

Официальные оппоненты: зав. кафедрой МИРЭА, доктор
технических наук, профессор

Ивченко Валерий Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент
Калужского филиала МГТУ им. Н.Э.
Баумана

Мышляев Юрий Игоревич

Ведущая организация: Московская государственная
академия водного транспорта
(МГАВТ)

Защита диссертации состоится « 29 » сентября 2014 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.11 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) «МАИ» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4., зал заседаний Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета),

http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=49713

Автореферат разослан « ___ » _____ 2014 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.125.11

к. т. н., доцент

Горбачев Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время причаливание судов при ручном управлении обладает существенным недостатком – время, потраченное на остановку судна в нужном месте пристани, слишком велико, либо при стремлении ускорить этот процесс возникают неизбежные терминальные ошибки, требующие дополнительного маневрирования у пристани.

Особенно сильно эти недостатки проявляются при управлении крупными грузовыми и пассажирскими речными судами, для которых в силу их большой инерции режим причаливания длится долго по сравнению общим временем транспортировки.

Для одновременного сведения к нулю линейных и скоростных координат судна в терминальной точке причаливания важно согласовывать управление тягой двигателя и рулем, когда отклонения в боковом и продольном направлении уменьшаются непропорционально друг другу. Однако известный способ ручного управления не дает нужных результатов при действии внешних аэродинамических и гидродинамических возмущений, особенно при стремлении осуществить причаливание как можно быстрее. Поэтому тема данной диссертационной работы, посвященная методам высокоточного причаливания судов с повышенным быстродействием, является актуальной.

Целью диссертационной работы является оценка возможностей автоматического управления причаливанием, чтобы при обеспечении требуемой терминальной точности добиться максимального быстродействия достижения заданной терминальной точки.

Объектом исследования является система автоматического управления причаливанием речных судов.

Предметом исследования являются методы оптимального по быстродействию и точности управления и контроля безопасности движения судов на конечном участке причаливания вблизи пристани.

На защиту выносятся следующие основные научные положения:

1. Алгоритм комплексированного управления боковым и продольным движением судна при использовании в каждом канале наряду с линейным релейного регулятора, чтобы сократить время отработки больших рассогласований по положению и скорости.
2. Алгоритм оперативного контроля безопасности движения судна вблизи пристани для формирования сигнала тревоги и последующей координации бокового и продольного движения.
3. Способ балансировки работы каналов управления продольным и боковым движением для обеспечения мягкого и точного причаливания.
4. Структура системы автоматического причаливания, имеющая логическую часть для переключения линейных и релейных регуляторов и координации управления.
5. Результаты моделирования причаливания судов, подтвердившие эффективность предложенного подхода.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Алгоритм комплексированного управления движением в каждом канале учитывает знаки отклонений по положению и скорости. Если эти знаки совпадают, то действует релейный регулятор, в противном случае – линейный регулятор, обеспечивающий плавное завершение переходного процесса и максимальную терминальную точность. Переключение регуляторов осуществляется с помощью специально выбранных областей, при попадании в которые фазовой траектории применяется линейное управление.
2. Сигналом тревоги является результат сравнения с заданным порогом функции риска, вычисленной в виде правой части уравнения Беллмана при гипотезе о прогнозируемом оптимальном поведении системы вплоть до момента причаливания. В случае превышения порога используется релейное управление для отработки значительных отклонений.
3. Балансировка работы каналов бокового и продольного движения осуществляется путем уменьшения области использования линейного регулятора в одном канале при одновременном её увеличении в другом канале,

и наоборот, с учетом величины и знаков несоответствия бокового отклонения от продольного гипотезе о их линейной пропорциональности.

4. Логическая часть системы автоматического причаливания содержит три анализатора. Первые два следят в каждом канале за совпадениям по знаку отклонений по положению и скорости и включают в этом случае релейный регулятор. Третий анализатор осуществляет координацию управления каналов с помощью вычисляемой функции риска.

Исполнительная часть содержит два линейных и два релейных регулятора, из которых первая пара используется для осторожного и мягкого причаливания, а вторая пара – для повышения быстродействия отработки значительных отклонений.

В целом предложена новая структура двухканальной системы координированного управления, обеспечивающего сочетание быстродействия и точности терминального управления судном.

Методы исследования. При исследовании поставленных в диссертации задач использовались теория дифференциальных уравнений, теория автоматического регулирования, метод динамического программирования и принцип максимума Понтрягина из теории оптимального управления. При моделировании нелинейной динамической системы управления использовался программный пакет MATLAB.

Практическая ценность работы состоит прежде всего в том, что время причаливания удалось сократить в два раза, что позволяет существенно повысить общую скорость перевозок на речном транспорте. Кроме того, показано, что за счет координации управления тягой двигателя и руля судна обеспечивается повышение терминальной точности причаливания в условиях изменяющихся внешних возмущений – при линейных отклонениях не более 0.2м и конечной скорости сближения с пристанью не более 0.2м/сек. Также предложенный подход был использован при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Современные методы теории управления» в рамках магистерской подготовки на кафедре 301 МАИ по учебному направлению «Управление и информационные технологии в технических системах».

Достоверность полученных результатов подтверждена математическим моделированием на ЭВМ системы автоматического причаливания и использованием при синтезе оптимального управления и контроля безопасности движения научно обоснованного метода динамического программирования.

Личный вклад автора состоит в проведении анализа известных способов причаливания речных судов; разработке алгоритмов комплексирования и координации работы линейных и релейных регуляторов; личном участии в моделировании на ЭВМ и подготовке основных публикаций.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК. Научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на международном научно – техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» г. Алушта в 2012 и 2013 годах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Основное содержание диссертации изложено на 122 страницах и содержит 55 рисунков и 2 таблицы. Список использованных источников включает 63 ссылок на научную библиографию по теме проводимых исследований в диссертационной работе.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, перечислены теоретические и практические результаты, указана их научная и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается проблема повышения скорости перевозок на речном транспорте, которая прежде всего зависит от времени причаливания на остановках, которое, как показал анализ известных систем управления движением, слишком велико для судов большой массы и грузоподъемности. Обоснована целесообразность применения

автоматического причаливания на основе методов оптимального управления и сформулирована следующая постановка задачи.

1. Управление судном осуществляется по двум каналам – продольного движения за счет изменения тяги двигателя и изменения продольной скорости, и бокового движения путем изменения положения руля, чтобы обеспечить общее движение судна по траектории, показанной на рис. 1.

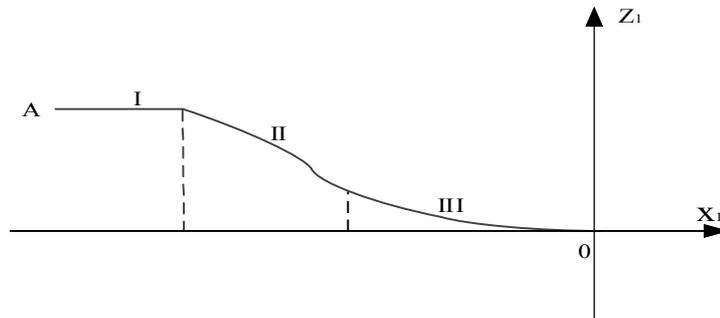


Рис.1. Траектория причаливания, на которой участок I – исходное движение к заданной точке А с максимальной скоростью; участок II – сближение с берегом с максимальным быстродействием; участок III – плавное приближение к заданной терминальной точке $x_1 = z_1 = 0$

2. Продольное движение судна описывается дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = V \cos(\beta - \varphi) + w_1 \\ \dot{V} = -a_0 V^2 - a_1 V + x_3 \\ \dot{x}_3 = -a_2 x_3 + U_1 \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 – координата продольного пути; $x_2 = \dot{x}_1$ – скорость продольного движения; V – скорость судна; w_1 – продольное возмущение; x_3 – ускорение, возникающее под действием управления U_1 тягой двигателя; β – угол дрейфа (скольжения); φ – угол рыскания; a_0, a_1, a_2 – заданные динамические коэффициенты.

Управление U_1 тягой двигателя на участке I таково, что скорость V в установившемся режиме достигает своего максимального значения V_{\max} , и согласно уравнениям (1), это управление при $\dot{x}_3 = \dot{V} = w_1 = 0$ равно:

$$U_{1\max} = (a_0 V_{\max}^2 + a_1 V_{\max}) a_2$$

На участке II управление релейное, и поэтому максимальное значение $U_1 = \delta_1$, где $\delta_1 < U_{1\max}$ – заданная величина.

На участке III управление судном желательно иметь таковым, чтобы обеспечить равнозамедленное движение:

$$x_2 = V_{\max} - at$$

где a – некоторое заданное значение, определяющее темп торможения.

3. Боковое движение подчиняется следующим дифференциальными уравнениям, для которых принято допущение, что креном судна можно пренебречь:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = V \sin(\beta - \varphi) + w_2 \\ \dot{\omega}_y = a_{22}\omega_y + a_{23}\beta + b_{21}U_2 \\ \dot{\beta} = a_{32}\omega_y + a_{33}\beta + a_{34}\beta|\beta| + b_{31}U_2 \\ \dot{\varphi} = \omega_y \end{cases} \quad (2)$$

где z_1 – координата бокового пути; $z_2 = \dot{z}_1$ – скорость бокового движения; ω_y – угловая скорость вращения относительно вертикальной оси; U_2 – сигнал для управления боковым движением; w_2 – боковое возмущение; $a_{22}, a_{23}, a_{32}, a_{33}, a_{34}, b_{21}, b_{31}$ – заданные динамические коэффициенты.

Сигнал управления U_2 – на участке I равен нулю, на участке II (при заданном ограничении δ_2 по модулю) управление может быть попеременно релейным, либо линейным. При этом желательно, чтобы боковая скорость на участке III постепенно снижалась по линейному или экспоненциальному закону. Кроме того, обязательно должно быть соблюдено условие $z_1 \geq 0$.

4. На движущееся судно действуют внешние гидродинамические и аэродинамические возмущения w_1 и w_2 учтенные в уравнениях (1) и (2). Принято, что эти возмущения содержат постоянную w_{0i} и периодическую составляющую, воспроизводящую волнение с заданной амплитудой A_i и частотой ω_i и течение реки:

$$w_i = w_{0i} + A_i \sin \omega_i t \quad (3)$$

5. Критериями оптимальности движения судна являются:

– на участке II решается задача максимального быстрогодействия;

– на участке III решается задача высокоточного движения по заданной траектории при следующих интегральных функционалах качества соответственно в продольном и боковом каналах:

$$\begin{aligned} J_1 &= \min \int_0^{t_k} [r_0 U_1^2 + r_1 (x_1 - m_1)^2 + r_2 (x_2 - V_{1m})^2] dt \\ J_2 &= \min \int_0^{t_k} [r_0 U_2^2 + r_1 (z_1 - m_2)^2 + r_2 (z_2 - V_{2m})^2] dt \end{aligned} \quad (4)$$

где m_1 и m_2 – заданные линии пути завершающего пути причаливания; V_{1m} и V_{2m} – заданные продольная и боковая скорости сближения с конечной точкой; r_0, r_1, r_2 – заданные весовые коэффициенты штрафов.

– на участке II осуществляется переменная стратегия управления, логику которой необходимо выбрать, в основном стремясь к максимальному быстродействию по одному из каналов и высокоточному – по другому.

Требуется:

– синтезировать законы релейного и линейного управления для каналов продольного и бокового движения судна;

– определить логику комплексированного попеременного использования двух способов управления, чтобы, с одной стороны, за минимальное время приблизиться к месту причаливания и, с другой, — безошибочно попасть в заданную терминальную точку, при координации действий в каналах бокового и продольного движения судна;

– промоделировать предложенные алгоритмы управления для последующего уточнения их параметров.

Во второй главе используются результаты синтеза релейных регуляторов, необходимых для отработки значительных отклонений по критерию максимального быстродействия, и линейных регуляторов, обеспечивающих плавное и мягкое причаливание.

Вначале рассмотрен процесс релейного управления, характерный для участков II и III. Согласно принципу максимума Понтрягина можно записать правило для управления продольным движением, если упрощенно представить уравнение (1) в виде динамической системы второго порядка:

$$U_1 = -\delta_1 \text{sign} \left[x_1 - m_1 + \frac{(x_2 + w_1)|x_2 + w_1|}{2\delta_1} \right] \quad (5)$$

Для бокового движения при том же упрощении можно записать:

$$U_2 = -\delta_2 \text{sign} \left[z_1 - m_2 + \frac{(z_2 + w_2)|z_2 + w_2|}{2\delta_2} \right] \quad (6)$$

Линейное управление может быть реализовано с помощью оптимального регулятора, синтезированного на основе метода динамического программирования с помощью аналитического конструирования оптимальных регуляторов. В частности, если также допустить описание бокового движения в виде системы второго порядка:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1^* &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= -a_2 z_2 + b_2 U_2 \end{aligned}$$

где координата $z_1^* = z_1 - m_2$, $z_2 = x_2 \sin \psi$; a_2, b_2 – некоторые эквивалентные динамические параметры, то можно получить структуру линейного регулятора:

$$U_2 = K_{21}(x_1 - K_0 z_1) + K_{22}(z_2 + \frac{1}{K_0} x_2) + K_{23} w_2 \quad (7)$$

Можно заметить, что управление, пропорциональное ошибкам по положению, скорости и углам, является общепринятым в инженерной практике.

Аналогично можно записать формулу для линейного управления продольным движениям:

$$U_{1L} = K_{11}(x_1 - K_0 z_1) + K_{12} x_2 + K_{13} w_1 \quad (8)$$

Представленные в формулах (5 – 8) значения m_1, m_2, V_{1m}, V_{2m} требуют уточнения, а $K_0, K_{11}, K_{12}, K_{13}, K_{21}, K_{22}, K_{23}$ – заданные при моделировании коэффициенты.

Далее в работе определена логика переключения релейного и линейного регуляторов при комплексированном управлении.

Очевидно, что релейное управление целесообразно для отработки значительных отклонений от заданной терминальной точки – при большом расстоянии x_1 от точки А и удалении z_1 . Ясно, что на участке III нужно более

осторожное линейное управление, и обычно эта область определяется в пространстве координат z_1 и x_1 .

В данной работе предложен иной подход к определению этой области, учитывающий ещё и скорости приближения к причалу z_2 и x_2 , что можно пояснить с помощью рисунка 2.

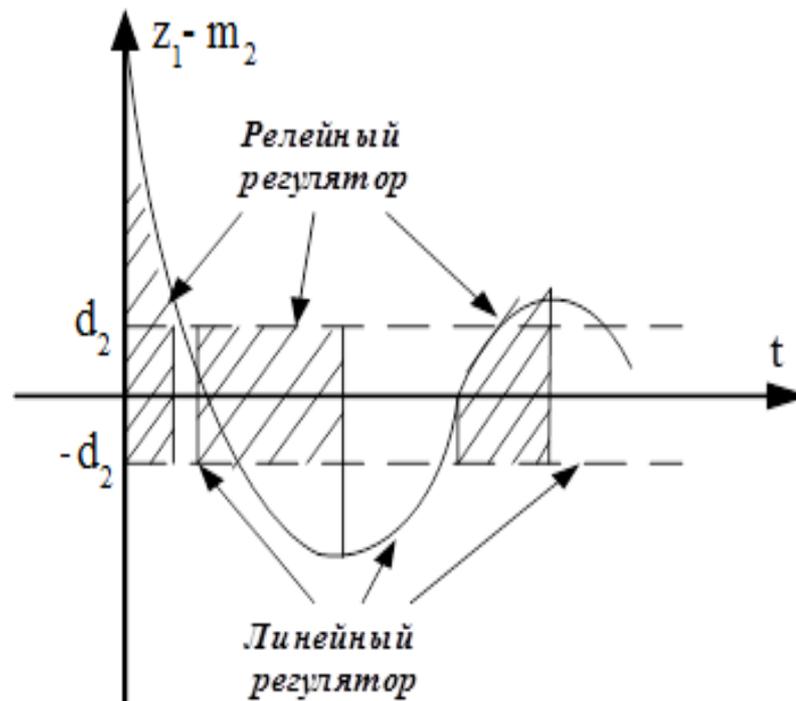


Рис. 2. График переходного процесса изменения ошибки приближения к точке при продольном движении

На изображенном рисунке показанная пунктиром полоса в интервале $[-d_2, d_2]$ соответствует малым отклонениям по положению, а внутри этой полосы – заштрихованные участки, когда отклонения по положению и по скорости имеют одинаковый знак, и поэтому представляют наибольшую опасность.

В связи с этим на указанных участках предлагается использовать релейное управление вместо линейного и лишь на незаштрихованных участках – линейное управление, чему соответствуют следующие области переключения, показанные на рис. 3 в фазовой плоскости $[x_1 - m_1, x_2]$.

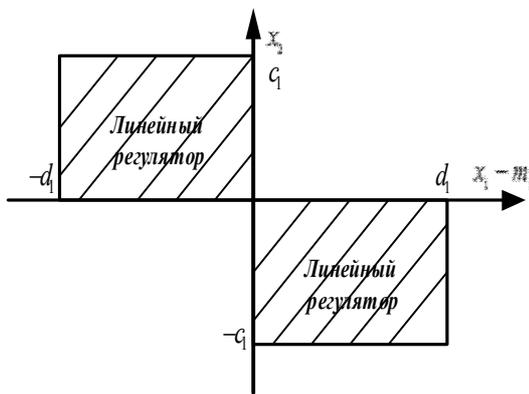


Рис. 3. Области переключения релейного регулятора продольного движения на линейный в фазовой плоскости $[x_1 - m_1, x_2]$

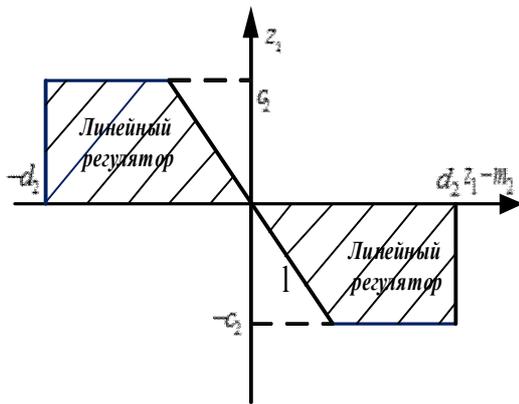


Рис. 4. Область переключения релейного регулятора бокового движения на линейный в фазовой плоскости $[z_1 - m_2, z_2]$

Границы области c_1, d_1 в которой просматривается очевидное несоответствие между реальной динамикой объекта и системой второго порядка, должны быть уточнены.

Что касается бокового движения для координат $z_1 - m_2$ и z_2 , то кроме очевидных границ c_2 и d_2 нужно учесть то усугубляющее обстоятельство, что из-за невозможности опасного приближения к берегу до подхода к точке причаливания и ограничения $z_1 > 0$ нужно как можно энергичней (то есть релейным способом) от него удалиться. В связи с этим нужно назначить одну область линейного управления вместо двух, как это показано на рис. 4.

Кроме того, на рисунке вместо прямоугольника появилась сторона трапеции 1, уменьшающая возможности линейного управления при опасном сближении с точкой А. Границы области в виде параметров l, c_2, d_2 также должны быть уточнены.

Получены результаты моделирования на ЭВМ системы управления причаливанием при обычном и комплексированном управлении. На рис.5 - 6 представлены траектории движения судна для обоих случаев при следующих условиях: начальная скорость $V_0 = 6 м / сек$, начальная дистанция $x_{10} = -70 м$ и начальное расстояние от берега $z_{10} = 10 м$.

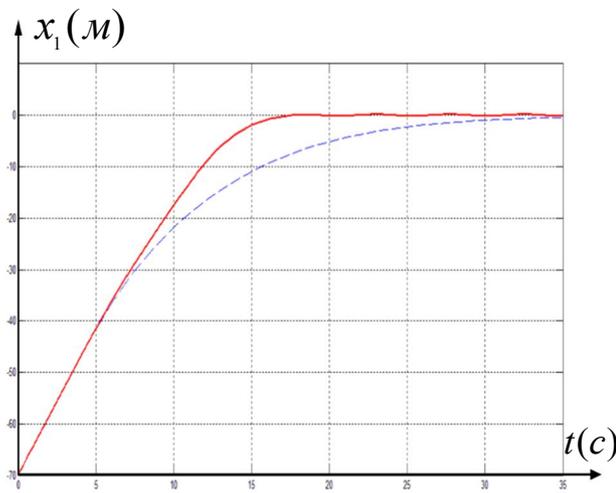


Рис. 5. Траектории движения судна в продольном канале в зависимости от времени

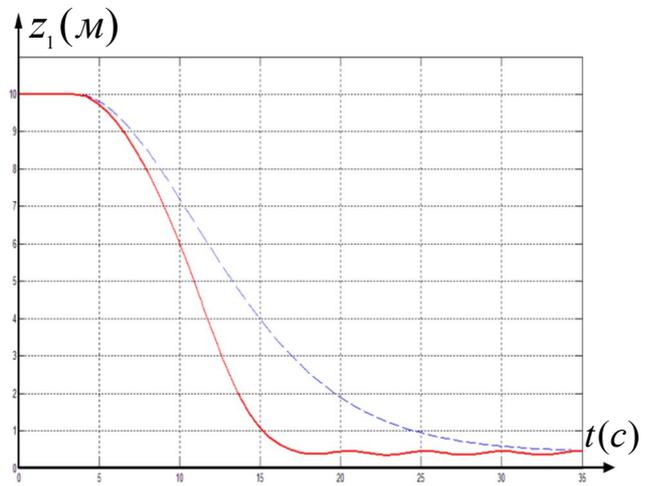


Рис. 6. Траектории движения судна в боковом канале в зависимости от времени

Моделирование показало, что в первом случае традиционного линейного управления время причаливания составило 33сек., при комплексированном линейно - релейном управлении дистанция маневрирования уменьшилась на 30%, а время составило 15сек., что в два раза меньше обычного и подтвердило эффективность предложенного подхода.

Третья глава посвящена важной задаче повышения терминальной точности причаливания, которая определяется, *во-первых* одновременностью сведения к нулю продольной и боковой координаты судна в заданной точке пристани. *Во-вторых*, качество процесса причаливания определяется терминальными ошибками по положению и скорости, зависящими от способности системы управления парировать влияние внешних возмущений.

При организации координации управления считалось, что текущие координаты x_1 продольного и z_1 бокового движения должны находиться в определенной линейной зависимости:

$$x_1 = K_0 z_1 \quad (9)$$

Если это не происходит, то площади прямоугольников со сторонами c_1, d_1 и c_2, d_2 должны меняться так, что одна область увеличивается (и тем самым снижается темп движения), а другая – уменьшается (и поэтому осуществляется большее время релейного управления), что должно привести к восстановлению баланса по принципу действия «коромысла». Для

определения правила соблюдения баланса использовалось динамическое программирование и предложен критерий, содержащий терминальную и интегральную части при заданном общем времени управления T :

$$J = \min \int_0^T \left[\frac{r_0}{2} (U_1^2 + U_2^2) + n_0 x_1 x_3 z_1 + r_1 x_1^2 + r_2 z_1^2 - 2\sqrt{r_1 r_2} x_1 z_1 \right] dt + \frac{r_3}{2} [x_1^2(T) + x_2^2(T) + z_1^2(T) + z_2^2(T)] \quad (10)$$

где $r_0 = 1$ – коэффициент штрафа за отклонение рулевых органов; r_1 – коэффициент штрафа за отклонение в продольном движении; r_2 – коэффициент штрафа за боковое отклонение от заданной линии пути; r_3 – коэффициент штрафа за отклонение от траектории вблизи терминальной точки в фиксированный момент времени, n_0 – штраф за совпадение по знакам координат.

Если свести терминальные члены к интегральному виду следующим путем:

$$\frac{r_3}{2} [x_1^2(T) + x_2^2(T) + z_1^2(T) + z_2^2(T)] = r_3 \int_0^T (x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 + z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2) dt$$

Уравнение Беллмана в частных производных можно записать:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \min_{U_1, U_2} & \left[0.5(U_1^2 + U_2^2) + r_1 x_1^2 + r_2 z_1^2 - 2\sqrt{r_1 r_2} x_1 z_1 + n_0 x_1 x_3 z_1 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z_1} + r_3 z_1 \right) z_2 + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z_2} + r_3 z_2 \right) (-a_3 z_2 + U_2) + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} + r_3 x_1 \right) x_2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} + r_3 x_2 \right) (x_3 - a_1 x_2) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_3} (-a_2 x_3 + U_1) \right] \quad (11) \\ & = \min F(\bar{z}, \bar{x}, \bar{U}) \end{aligned}$$

где $F(\bar{z}, \bar{x}, \bar{U})$ – искомая минимизируемая функция текущего риска, ε – функция Беллмана, в качестве которой был взят полином третьей степени, имеющий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \beta_1 z_1 + 0.5 \gamma_1 z_1^2 + \beta_2 z_2 + 0.5 \gamma_2 z_2^2 + \beta_3 x_1 + 0.5 \gamma_3 x_1^2 + \beta_4 x_2 + 0.5 \gamma_4 x_2^2 + \\ & + \beta_5 x_3 + 0.5 \gamma_5 x_3^2 + \psi_{12} z_1 z_2 + \psi_{13} z_1 x_1 + \psi_{14} z_1 x_2 + \psi_{15} z_1 x_3 + \psi_{23} z_2 x_1 + \quad (12) \\ & + \psi_{24} z_2 x_2 + \psi_{25} z_2 x_3 + \psi_{34} x_1 x_2 + \psi_{35} x_1 x_3 + \psi_{45} x_2 x_3 - \lambda x_1 z_1 z_2 - \xi x_1 x_3 z_1 \end{aligned}$$

Решение этой задачи методом, аналогичным аналитическому конструировано оптимальных регуляторов, позволило найти для установившегося состояния при $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0$ вместо дифференциальных уравнений систему из 22 нелинейных алгебраических уравнений относительно искомых коэффициентов $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$ функции Беллмана.

Приближенное аналитическое решение этой системы возможно, если провести по этапное сокращение числа уравнений и пойти на упрощение, считая $\psi_{45} = 0$. Тогда можно получить в квадратурах все коэффициенты функции Беллмана:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0;$$

$$\psi_{12} = 2.9998; \psi_{13} = -2.4460; \psi_{14} = -0.9925; \psi_{15} = -0.1045;$$

$$\psi_{23} = -0.9994; \psi_{24} = -0.8020; \psi_{25} = -0.3159;$$

$$\psi_{34} = 0.3308; \psi_{35} = 0.0348;$$

$$\gamma_1 + r_3 = 7.3381; \gamma_2 + r_3 = 2.2365; \gamma_3 + r_3 = 0.8153;$$

$$\gamma_5 = -0.0675;$$

$$\xi = -2.5539; \lambda = -0.3312.$$

Это позволяет найти в аналитическом виде интересующую функцию риска $F(\bar{z}, \bar{x})$, которая обладает замечательным свойством прогнозировать опасность неудачного терминального результата в конце причаливания и тем самым служить сигналом к балансирующему изменению областей использования линейных регуляторов.

Пример поведения вычисленных по формуле (11) функции риска $F(\bar{z}, \bar{x})$ при управлении судна в присутствии возмущений, а также функции риска F_0 в их отсутствие показан на рис.7, а разность $(F - F_0)$ этих функций использовалась для координации работы двух каналов.

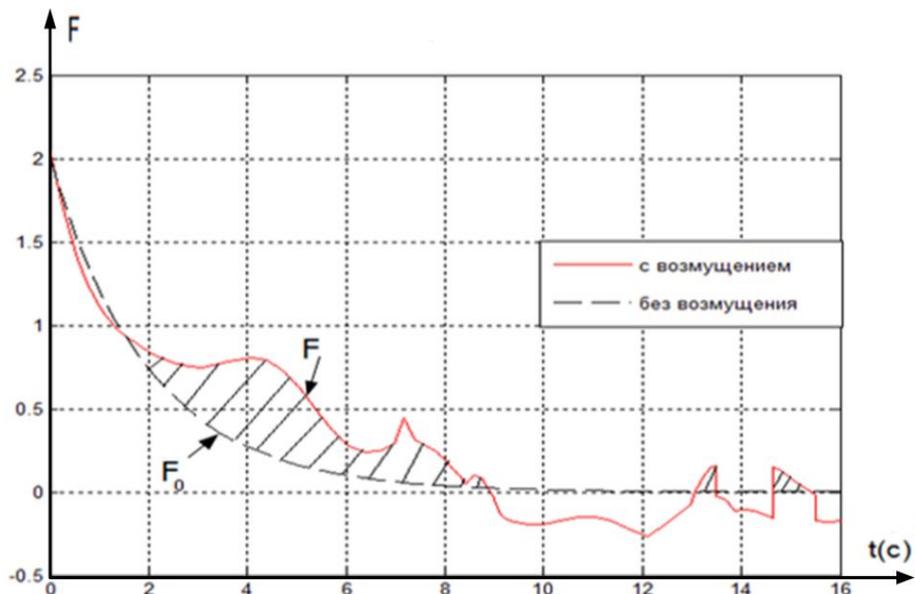


Рис. 7. Изменение функции риска без возмущений и с их учетом для координации управления с помощью «коромысла»

Структура двухканальной системы управления причаливанием показана на рис.8.

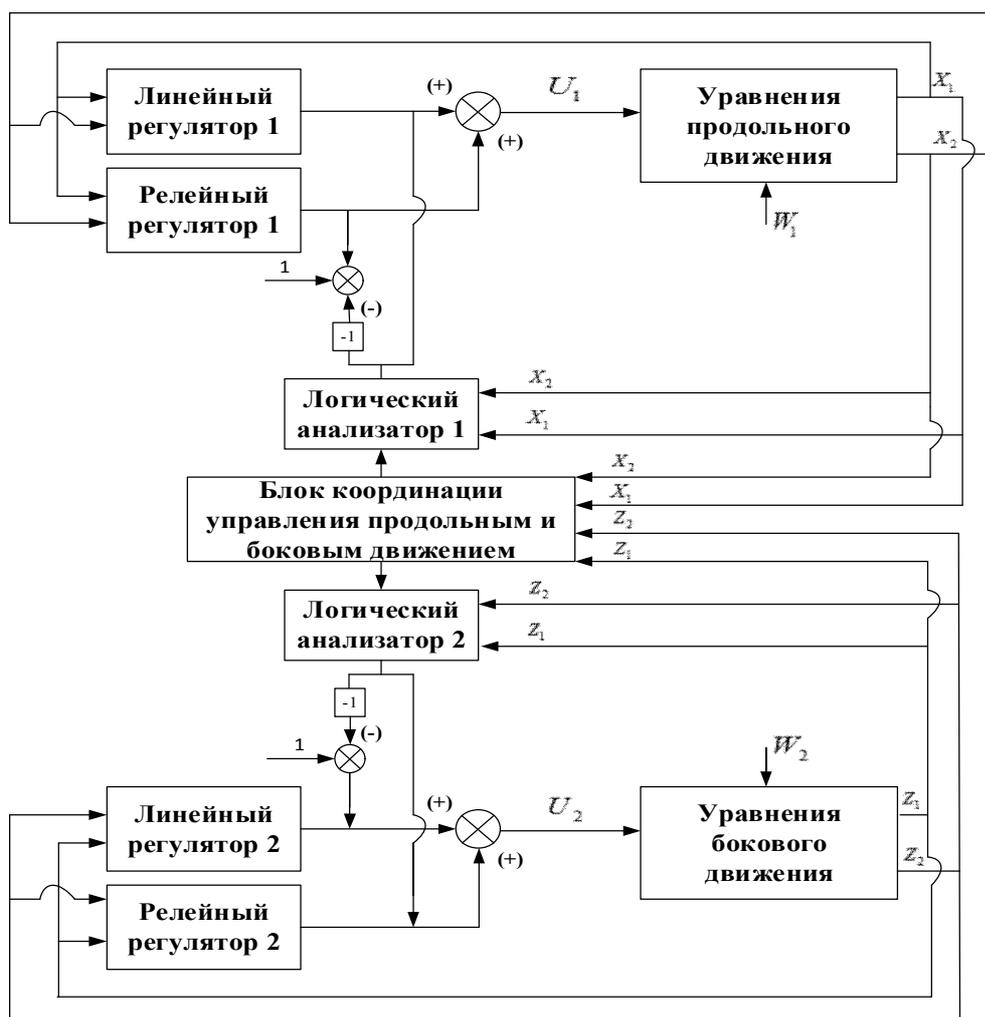


Рис.8. Блок – схема системы автоматического причаливания

В ней есть два логических анализатора, переключающие релейный регулятор на линейный в нужных ситуациях, и логический координатор, изменяющий области использования линейных регуляторов по принципу «коромысла», т.е. одна область уменьшается, а другая – увеличивается, и наоборот.

В четвертой главе с помощью моделирования на ЭВМ произведено дальнейшее уточнение параметров системы координированного управления при следующих условиях.

Начальная дистанция причаливания $x_{10} = -50\text{м}$, а начальное боковое расстояние до берега (пристани) $z_{10} = 10\text{м}$, что соответствует в дальнейшем соблюдению коэффициента пропорциональности $K_0 = -5$. Начальная скорость судна $V_0 = 6\text{м/сек}$. На судно действуют внешние возмущения: в канале продольного движения $w_1 = -1 - 0.6\sin t$, в канале бокового движения $w_2 = -0.6\sin t$. Эти цифры соответствуют по шкале Бофорта погоде с волнением в 4 балла. Также учитывались ограничения рулевого привода - отклонение по положению не более 30° , по угловой скорости – не более 8град/сек, а также ограничения по удельной тяге и по скорости её изменения.

В результате моделирования оказалось, что терминальная точность возрастает в 2 раза по сравнению с некоординированным управлением. При этом линейное отклонение Δz , в конце причаливается не превышает 0.2м, а скорость – не более 0.2м/сек. График траектории движения судна с учетом возмущений и при использовании полностью сформированной двухканальной системы автоматического координированного управления показан на рис. 9.

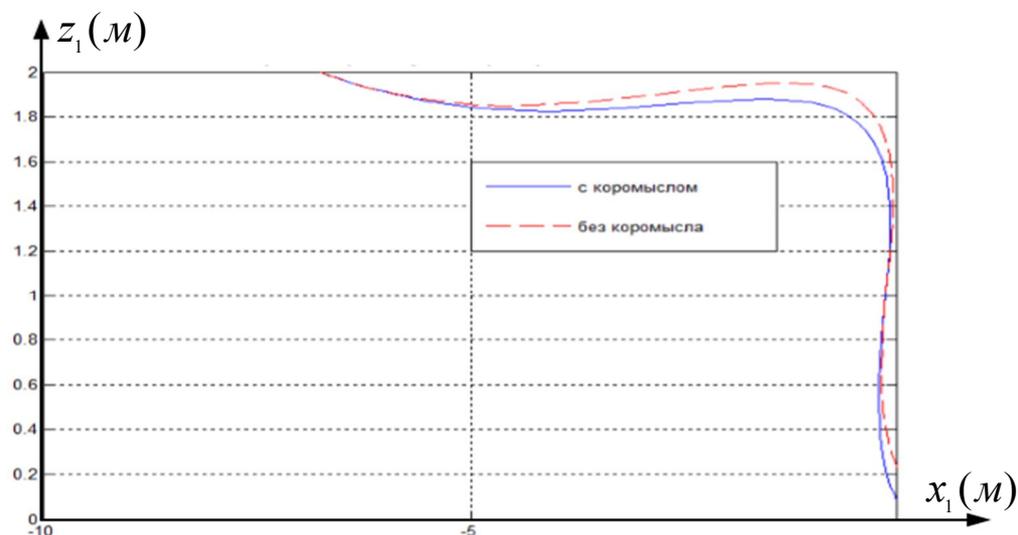


Рис.9. Результаты моделирования координированного управления с помощью «коромысла» при учете возмущений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты:

1. Предложен алгоритм комплексированного управления в каждом из каналов бокового и продольного движения, учитывающий знаки отклонений по положению и скорости. Если эти знаки не совпадают, то действует линейный регулятор, в противном случае – релейный регулятор при отработке больших рассогласований, что резко повышает быстродействие системы.

2. Найден способ балансировки работы каналов бокового и продольного движения судна путем уменьшения области использования линейного регулятора в одном канале (если он отстает) при одновременном её увеличении в другом.

При этом сигнал тревоги для последующей координации управления формируется с помощью функции риска, вычисленной в виде правой части уравнения Беллмана.

3. Основным научным результатом является структура двухканальной системы автоматического причаливания, содержащей два линейных и два релейных регулятора и выполняющей операции переключения регуляторов в

каждом канале и координацию управления боковым и продольным движением судна.

4. Моделирование на ЭВМ процессов автоматического причаливания показало, что предложенный подход позволяет сократить время причаливания и терминальные ошибки в условиях меняющихся внешних возмущений более, чем в 2 раза. Реализация этого подхода возможна при наличии на борту судна спутниковой навигационной системы.

5. Полученные результаты использованы при проведении учебного процесса на кафедре 301 МАИ по дисциплине «Современные методы теории управления» в рамках магистерской подготовки по направлению «Управление и информационные технологии в технических системах», что подтверждается актом о внедрении.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. Лебедев Г.Н., Ву Суан Хыонг «Задача синтеза алгоритма максимального по быстродействию автоматического причаливания речного судна в заданной точке». Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 63, февраля 2013 года.

2. Лебедев Г.Н., Ву Суан Хыонг, Горбачев Ю.В. «Комплексированное управлением воздушных и речных судов с помощью линейного и релейного регулирования с целью достижения максимального быстродействия их причаливания в заданной терминальной точке». Авиакосмическое приборостроение, №2, февраля 2014 года, стр. 44-51.

3. Лебедев Г.Н., Ву Суан Хыонг «Логика комплексированного терминального управления летательным аппаратом с помощью линейного и релейного регуляторов». Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 70, ноября 2013 года.

4. Лебедев Г.Н., Ву Суан Хыонг, Ву Суан Дык «Интегрированное управление тягой двигателя и рулем воздушного судна при его

автоматическом причаливании». Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 72, января 2014 года.

5. Ву Суан Хыонг, Зайцев А.В., Зо Мин Тайк, Тин Пхон Чжо «Автоматический контроль безопасности сближения двух управляемых воздушных судов при пересечении их маршрутов». Научный вестник МГТУ ГА, Выпуск № 198, декабря 2013 года, стр. 51-59.

В других изданиях:

1. Ву Суан Хыонг «Постановка задачи максимального по быстродействию автоматического причаливания речного судна в заданной точке» //Труды XXI Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» 18-24 сентября, 2012 г.. Алушта. Сборник тезисов докладов, С. 7.

2. Ву Суан Хыонг, Ивашова Н.Д. «Об одной задаче комплексированного управления летательными аппаратами при достижении заданной терминальной точки» //Труды XXII Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» 18-24 сентября, 2013 г.. Алушта. Сборник тезисов докладов, С. 13.