
Марігодов В.К., Мозолевська Т.В., Ісаєва Т.О.

ЕКСПЕРТНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАТЬ СТУДЕНТІВ НА ОСНОВІ ЕНТРОПІЙНОГО КРИТЕРІЮ

У статті розглядається визначення щільності частоти подій та побудова гістограми розподілу диференціальної ентропії, що характеризує масив експертної інформації. Диференційна ентропія є універсальним критерієм, оскільки вона дає змогу одержати узагальнену характеристику показників якості та успішності студентів у процесі проведення модульного і семестрового контролю знань.

***Ключові слова:** масив експертної інформації, експертна оцінка, щільність частоти подій, диференційна ентропія, гістограма процесу, полігон частот.*

Marigodov V., Mozolevska T., Isaieva T.

EXPERT EVALUATION OF STUDENTS' KNOWLEDGE ON THE BASIS OF ENTROPY CRITERION

This article concerns the determination of density events frequency and histogram construction of distribution of differential entropy that characterizes the array of expert information. Differential entropy is an universal criterion as it gives an opportunity to get the general description of indexes of quality and success of students in the process of realization of module and semester control of knowledge.

***Keywords:** array of expert information, expert estimation, density of frequency of events, differential entropy, histogram of process, rang of frequencies.*

УДК 629.3.025.2

Сущенко О.А.

РОБАСТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье представлены основные принципы робастной параметрической оптимизации и робастного структурного синтеза систем стабилизации информационно-измерительных устройств, эксплуатируемых на морских подвижных объектах. Исследована возможность задания основных внешних возмущений для систем исследуемого типа. Представлены результаты моделирования синтезированной системы. Решена актуальная проблема сохранения точности процессов управления в сложных условиях реальной эксплуатации систем стабилизации.

***Ключевые слова:** робастная оптимизация, морской подвижный объект, математическая модель, внешние возмущения.*

Постановка проблемы. Современный этап проектирования водных транспортных средств характеризуется необходимостью совершенствования систем навигации и управления морскими подвижными объектами. При этом имеет место проблема сохранения высоких точностных характеристик в условиях воздействия внешних возмущений, обусловленных, прежде всего, морским нерегулярным волнением. Пути решения этой проблемы лежат в использовании робастных гироскопических систем, способных

обеспечить стабилизацию информационно-измерительных навигационных устройств в условиях как внутренних параметрических, так и внешних координатных возмущений. Следует отметить, что в настоящее время для прецизионных автономных систем навигации, эксплуатируемых на морских подвижных объектах, является актуальным использование платформенных систем стабилизации навигационных измерителей.

Одним из современных подходов к определению критериев качества робастной оптимизации является использование H_∞ -нормы функции комплементарной чувствительности замкнутой системы. Повысить эффективность робастной оптимизации можно за счет использования смешанной H_2/H_∞ -оптимизации. Известно, что H_2 -норма функции чувствительности замкнутой системы является характеристикой ее точности [1].

Усовершенствование робастных систем гироскопической стабилизации информационно-измерительных устройств осуществляется в двух направлениях, включая модернизацию существующих и проектирование перспективных систем.

Модернизацию в условиях неопределенности целесообразно осуществлять при помощи робастной параметрической оптимизации, а проектирование новых систем требует использования робастного структурного синтеза. В представленной статье рассматриваются подходы к решению обеих задач.

Анализ последних исследований и публикаций. Основные положения синтеза робастных систем, в том числе робастного структурного синтеза, представлены во многих работах, например [1, 2]. Вопросы проектирования робастных систем управления движением летательных аппаратов широкого класса на основании смешанного H_2/H_∞ подхода, который одновременно учитывает требования к точности и робастности синтезированной системы, рассмотрены в работе [3]. Разработка же соответствующих процедур робастной оптимизации для высокоточных автономных систем стабилизации и определения курса морского назначения все еще остается актуальной проблемой.

Целью статьи является изложение принципов робастной оптимизации систем стабилизации информационно-измерительных устройств морского назначения.

Математическое обеспечение процедуры робастной параметрической оптимизации. К основным этапам робастной параметрической оптимизации систем стабилизации информационно-измерительных устройств относятся следующие шаги:

1. Постановка задачи оптимального робастного синтеза.
2. Создание полного математического описания системы, максимально учитывающего все нелинейности, присущие реальным системам.
3. Создание линеаризованной математической модели в пространстве состояний.
4. Анализ требований, которые предъявляются к системам, и формирование соответствующих целевой и штрафной функций.
5. Создание методики задания внешних возмущений с учетом специфики движения объекта, на котором эксплуатируется проектируемая система.
6. Выбор метода оптимизации.
7. Создание алгоритма синтеза робастной системы
8. Моделирование и анализ полученных результатов.

В настоящее время известны многочисленные подходы к выполнению робастной оптимизации. В случае параметрической робастной оптимизации наиболее целесообразным является смешанный H_2/H_∞ -подход. Одним из современных подходов к структурной робастной оптимизации является H_∞ -синтез.

В обоих случаях выполнение робастной оптимизации поддерживается автоматизированными средствами оптимального проектирования, а именно: вычислительной системой MATLAB. В ее состав входят расширенные пакеты, предназначенные для проектирования робастных систем. Это программное обеспечение в основном ориентировано на использование моделей в пространстве состояний.

Следует отметить, что проектирование робастных систем выполняется в несколько стадий. Сначала осуществляется параметрический или структурный синтез робастной системы при помощи линеаризованных моделей в пространстве состояний. Далее выполняется проверка синтезированной системы на выполнение предъявляемых к ней требований. При этом необходимо использовать полные модели системы, максимально учитывающие нелинейности, присущие реальным системам, а также модели возмущений, характерных для условий реальной эксплуатации систем исследуемого типа (нерегулярного морского волнения). В случае невыполнения предъявляемых к системам технических требований начальные условия и весовые коэффициенты критерия оптимизации изменяются, после чего процедура оптимизации повторяется.

Особенностью систем исследуемого типа является наличие нескольких режимов, а именно: предварительного приведения к горизонту, точного приведения к горизонту и гироскопического компаса. Эти режимы различаются составом датчиков и особенностями управления.

Основные характеристики нелинейных моделей гироскопической системы стабилизации могут быть рассмотрены на примере модели в режиме предварительного приведения к горизонту. Основной функцией системы в этом режиме является стабилизация платформы на основании информации, поступающей от акселерометров. Полная математическая модель в этом режиме должна включать модель платформы, в том числе описание ее динамики и кинематики, и модели акселерометров [4]:

– уравнения динамики платформы –

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_{xp} &= [-(J_z - J_y)\omega_{yp}\omega_{zp} - (f_x + k_7)\omega_{xp} - k_1\delta_{xp} - k_5(-\delta_{xp} + k_3\beta) + M_0\text{sign}\omega_{x0}] / J_x; \\ \dot{\omega}_{yp} &= [-(J_x - J_z)\omega_{xp}\omega_{zp} - (f_y + k_8)\omega_{yp} - k_2\delta_{yp} - k_6(-\delta_{yp} + k_4\alpha) + M_0\text{sign}\omega_{y0}] / J_y; \\ \dot{\omega}_{zp} &= [-(J_y - J_x)\omega_{xp}\omega_{yp} - (f_y + k_9)\omega_{zp} + M_0\text{sign}\omega_{z0}] / J_z;\end{aligned}\quad (1)$$

– уравнения акселерометров –

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_{xp} &= (-\delta_{xp} + k_4\beta) / T_A; \\ \dot{\delta}_{yp} &= (-\delta_{yp} + k_5\alpha) / T_A,\end{aligned}\quad (2)$$

– уравнения кинематики платформы –

$$\begin{aligned}\dot{\alpha} &= (\omega_{xp} \sin \gamma + \omega_{yp} \cos \gamma) / \cos \beta; \\ \dot{\beta} &= \omega_{xp} \cos \gamma - \omega_{yp} \sin \gamma;\end{aligned}\quad (3)$$

$$\dot{\gamma} = \omega_{zp} + \text{tg}\beta(\omega_{xp} \sin \gamma + \omega_{yp} \cos \gamma);$$

где $\omega_{xp}, \omega_{yp}, \omega_{zp}$ – угловые скорости платформы относительно ее собственных осей; J_x, J_y, J_z – моменты инерции платформы с установленными на ней навигационными измерителями; f_x, f_y, f_z – моменты вязкого трения; M_0 – момент сухого трения; $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}$ – проекции внешней угловой скорости; δ_{xp}, δ_{yp} – сигналы акселерометров, T_A – постоянная времени маятникового акселерометра; α, β, γ – углы поворота платформы; $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9$ – коэффициенты законов управления.

Для получения математической модели в пространстве состояний необходимо выполнить линеаризацию кинематических соотношений с учетом малости углов поворота платформы и пренебречь разницей осевых моментов платформы. С учетом соотношений (1) – (3) линеаризованная модель системы гироскопической стабилизации, представленная четверкой матриц в пространстве состояний, принимает вид

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{f_x+k_7}{J_x} & 0 & 0 & -\frac{k_1-k_5/T_A}{J_x} & 0 & -\frac{k_3k_5/T_A}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f_x+k_8}{J_y} & 0 & 0 & -\frac{k_2-k_6/T_A}{J_y} & 0 & -\frac{k_4k_6/T_A}{J_x} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{f_x+k_9}{J_z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} & 0 & \frac{k_3}{T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} & 0 & \frac{k_4}{T_A} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{H_x}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H_y}{J_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_z}{J_z} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где H_x, H_y, H_z – кинетические моменты платформы.

При создании стохастических моделей гироскопической системы стабилизации информационно-измерительных устройств, эксплуатируемых на морских подвижных объектах, необходимо учитывать, что наибольшее влияние на процесс управления их движением имеют возмущения, обусловленные нерегулярным морским волнением.

Для математического описания возмущений, обусловленных морским нерегулярным волнением, необходимо использовать выражения для спектральной плотности возмущений, основанные, например, на использовании спектров Неймана, Бретшнейдера, Дербишайра. Но в этих спектрах отсутствуют низкие частоты, в то время как полоса пропускания частот морских судов находится именно в этой области. Поэтому для системы исследуемого типа целесообразно использовать спектр Рахманина и Фирсова. Передаточная функция для формирующего фильтра, определенного на основании известных уравнений для спектральной плотности с учетом угла углового склона, может быть представлена в виде [5]

$$W_f(j\omega) = 2\sqrt{\frac{D_r \mu(\mu^2 + \lambda^2)}{\pi}} \frac{j\omega}{g} \frac{\sqrt{\mu^2 + \lambda^2}}{(j\omega)^2 + 2\lambda j\omega + \mu^2 + \lambda^2}, \quad (4)$$

тут D_r – дисперсия ординат волн; μ, λ – параметры морского волнения; g – ускорение свободного падения.

Проектирование системы стабилизации информационно-измерительных устройств требует решения двух основных проблем. Во-первых, необходимо создавать законы

управления для навигационных контуров. Во-вторых, необходимо проектировать регуляторы, устанавливаемые в каналах стабилизации.

Первая задача с учетом большого опыта в создании систем такого типа может быть решена при помощи робастной параметрической оптимизации, когда структура законов управления известна, а выполнение оптимизации позволяет определить коэффициенты законов управления. Вторая задача состоит в создании робастных регуляторов каналов стабилизации при помощи структурного синтеза.

Параметрическая робастная оптимизация. Параметрическую оптимизацию целесообразно проводить с использованием комплексного критерия на основании H_2 , H_∞ норм функций чувствительности системы, которые позволяют учитывать показатели качества (точности) и устойчивости к возмущениям (робастности) [3]. Влияние каждой составляющей в комплексном критерии оптимизации регулируется с помощью весовых коэффициентов, которые зависят от особенностей системы

$$J_{H_2/H_\infty} = \lambda_2^{\text{nom d}} \|\Phi_s(K, j\omega)\|_2^{\text{nom d}} + \lambda_2^{\text{nom s}} \|\Phi_s(K, j\omega)\|_2^{\text{nom s}} + \lambda_\infty^{\text{nom}} \|\Phi_c(K, j\omega)\|_\infty^{\text{nom}} + PF, \quad (5)$$

где $\|\cdot\|_2^{\text{nom d}}$, $\|\cdot\|_2^{\text{nom s}}$, – H_2 -нормы функций чувствительности номинальной и возмущенной внешними координатными возмущениями системы (детерминированный и стохастический случаи); $\|\cdot\|_\infty^{\text{nom}}$ – H_∞ -норма комплементарной функции чувствительности номинальной системы; $\lambda_2^{\text{nom d}}$, $\lambda_2^{\text{nom s}}$, $\lambda_\infty^{\text{nom}}$ – весовые коэффициенты соответствующих норм; PF – штрафная функция, обеспечивающая выполнение условий устойчивости системы в процессе оптимизации; K – вектор коэффициентов законов управления. При этом постановка задачи робастной оптимизации принимает вид

$$K^* = \arg \inf_{K \in D} J_{H_2/H_\infty}(K),$$

где J_{H_2/H_∞} определяется выражением (5).

Результаты моделирования синтезированной системы для режима предварительного приведения к горизонту с учетом возмущений, задаваемых при помощи выражения (4), представлены на рис. 1. В результате робастной параметрической оптимизации получен вектор коэффициентов оптимальных законов управления: $k_1 = k_2 = 5$, $k_3 = k_4 = 4$, $k_5 = k_6 = 0,2$, $k_7 = k_8 = k_9 = 1,5$.

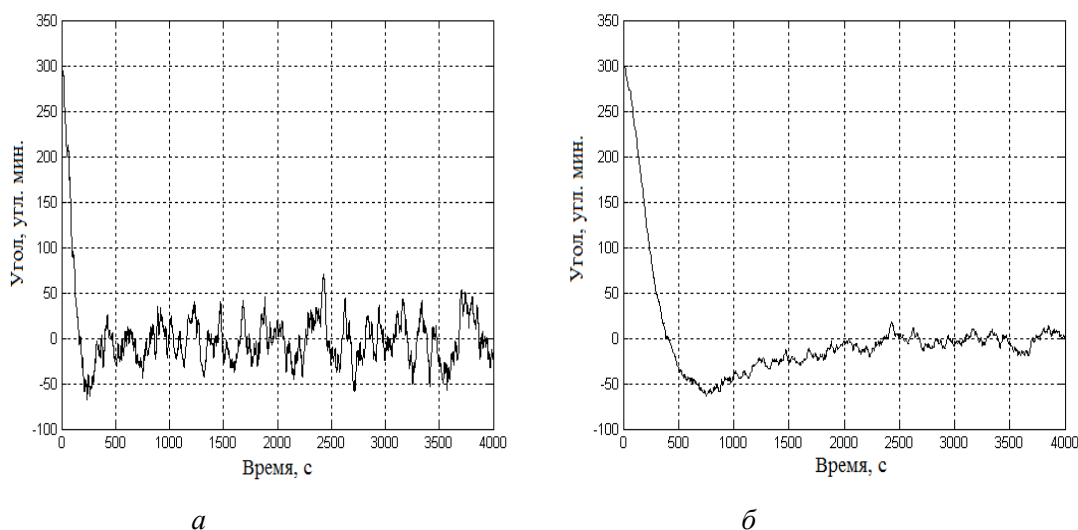


Рис. 1. Переходные процессы по углу дифферента в режиме предварительного горизонтирования для исходной (а) и оптимизированной (б) системы

Структурная робастная оптимизация. Робастная структурная оптимизация основывается на решении двух уравнений Риккати, проверке некоторых условий и минимизации H_∞ -нормы функции смешанной чувствительности системы, в состав которой входят объект управления и регулятор [1]. Современный подход к робастной структурной оптимизации заключается в обеспечении желаемых частотных характеристик проектируемой системы за счет формирования расширенного объекта при помощи весовых передаточных функций. Критерий оптимизации представляет собой H_∞ -норму смешанной функции чувствительности [1, 2]

$$J_{H_\infty} = \left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 R \\ W_3 T \end{bmatrix} \right\|_\infty,$$

где W_1, W_2, W_3 – весовые передаточные функции, S, R, T – функции чувствительности по командному сигналу и управлению и комплементарная функция чувствительности.

Структура синтезированного регулятора представляется четверкой матриц

$$A = \begin{bmatrix} 0,1871 & -0,1805 & 0,2126 & 0,372 & -0,0496 & 0,295 & -0,384 \\ -0,29 & 0,196 & 0,433 & 0,168 & 0,078 & -0,065 & -0,56 \\ 1,865 & -1,004 & -0,613 & -0,201 & -0,591 & -1,547 & 0,029 \\ -0,126 & 0,329 & 0,019 & 0,067 & 0,888 & 0,698 & -0,153 \\ -9,389 & 3,538 & -0,405 & -0,678 & 4,466 & 8,172 & -1,434 \\ 2,805 & -1,213 & -0,02 & 0,527 & -1,43 & -1,649 & 0,581 \\ -4,814 & 1,71 & 0,142 & -0,464 & 2,332 & 4,278 & -0,434 \end{bmatrix};$$

$$B^T = [0,115 \quad -3,957 \quad 26,01 \quad -6,504 \quad -132,2 \quad 35,04 \quad -67,35];$$

$$C = [0,0234 \quad -0,012 \quad 0,0036 \quad 0,0025 \quad -0,012 \quad -0,0219 \quad 0,0061]; D = [-0,375]$$

Результаты робастной структурной оптимизации представлены на рис. 2.

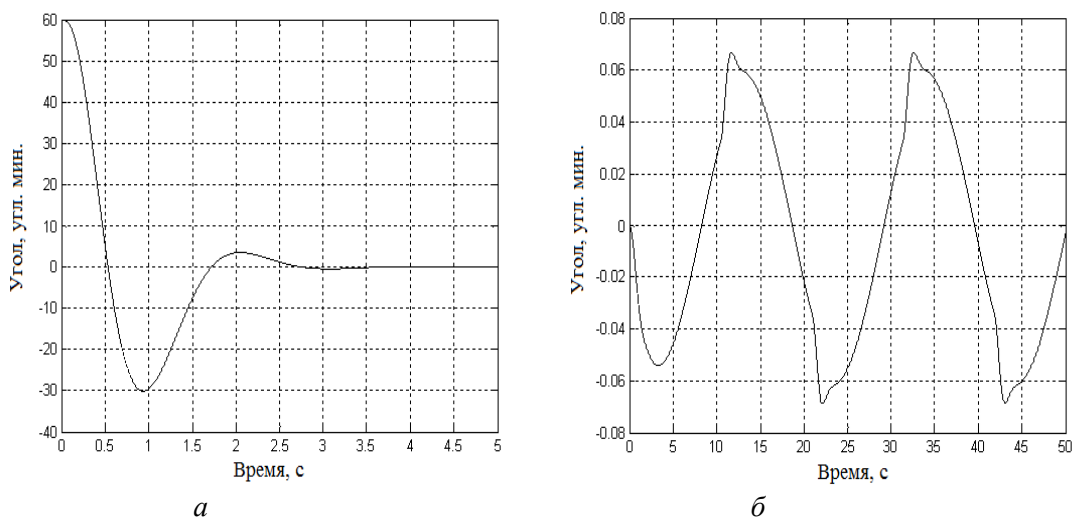


Рис.2. Результаты моделирования робастного регулятора: переходной процесс по дифференту (а); динамическая ошибка (б)

Представленные результаты моделирования свидетельствуют о достаточно высоком быстродействии и точности стабилизации синтезированной системы, а также приемлемой динамической ошибке.

Выводы. Представлены основные принципы робастной параметрической оптимизации систем стабилизации информационно-измерительных устройств, предназначенных для эксплуатации на морских подвижных объектах. Охарактеризованы основные типы математических моделей, необходимых для робастной оптимизации. Эффективность предложенных подходов подтверждается результатами моделирования синтезированной системы. В перспективе представленные подходы могут распространяться на подвижные объекты других классов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control, New York: John Wiley, 1997. – 564 p.
2. Gu D., Petkov P., Konstantinov M. Robust Control Design with MATLAB, London: Springer-Verlag, 2005. – 576 p.
3. Tunik A. A., Rye H., Lee H.C. Parametric Optimization Procedure for Robust Flight Control System Design / KSAS International Journal. – 2001. – vol.2. – no.2. – P. 95 – 107.
4. Сущенко О.А. Математична модель системи визначення курсу в режимі попереднього горизонтування / Вісник НАУ. – 2005. – №3. – С. 22–25.
5. Петров Ю.П. Оптимизация управляемых систем, испытывающих воздействие ветра морского волнения. – Л.: Судостроение, 1973. – 214 с.

Сущенко О.А.

РОБАСТНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ МОРСЬКИХ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті представлено основні принципи робастної параметричної оптимізації і робастного структурного синтезу систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, експлуатованих на морських рухомих об'єктах. Досліджено можливість задання основних зовнішніх збурень для систем досліджуваного типу. Представлено результати моделювання синтезованої системи. Розв'язано актуальну проблему збереження точності процесів управління в складних умовах реальної експлуатації систем стабілізації.

Ключові слова: робастна оптимізація, морський рухомий об'єкт, математична модель, зовнішні збурення.

Sushchenko O.

ROBUST OPTIMIZATION OF SYSTEMS FOR STABILIZATION OF MARINE VEHICLE INFORMATION-MEASURING DEVICES

In this paper the basic principles of the robust parametric optimization and robust structural synthesis of systems for stabilization of the information-measuring devices operated at the marine vehicles are represented. The possibility to give the basic external disturbances for the systems of the studied type is researched. The results of the synthesized system simulation are presented. The actual problem of control processes accuracy keeping in the difficult conditions of stabilization systems real exploitation is solved.

Keywords: robust optimization, marine vehicle, mathematical model, external disturbances.