

**Н.В Жукова, Г.В. Пониткова**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

Кафедра автоматики и телекоммуникаций

E-mail: [zhnatka@mail.ru](mailto:zhnatka@mail.ru), [gponitkova@yandex.ru](mailto:gponitkova@yandex.ru)

## СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛИ ПО ДАЛЬНОСТИ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

### *Аннотация*

*Жукова Н.В., Пониткова Г.В. Синтез робастного регулятора системы автоматического сопровождения цели по дальности для радиолокационной станции. В статье решается задача синтеза робастного регулятора для системы автоматического сопровождения цели по дальности с использованием  $H_\infty$ -метода. Требования к системе формулируются в виде частотных ограничений на сингулярные числа передаточной функции замкнутой системы. Приведены результаты моделирования САУ с робастным регулятором.*

**Ключевые слова:** теория  $H_\infty$  - оптимизации, система автоматического сопровождения цели по дальности, переменные состояния, робастный регулятор, передаточная функция.

### **Общая постановка проблемы.**

Главной задачей систем автоматического сопровождения цели по дальности является точное отслеживание изменения дальности до объекта и быстрый переход системы в состояние динамического равновесия. Поэтому к САУ предъявляются жесткие требования по быстродействию и точности. Эффективно решить эту задачу авторами предлагается с помощью методов робастного управления ( $H_\infty$ -метода). Развитие известных методов построения робастных законов управления, различные модификации существующих алгоритмов свидетельствуют о том, что задача в полном объеме еще не решена. Поэтому расширение сферы применения данного направления ТАУ является актуальным.

### **Решение задачи и результаты исследований.**

Одним из необходимых и достаточных условий существования  $H_\infty$ - контроллера является представление математической модели объекта в пространстве состояний. В [1] приведена структурная схема системы автоматического сопровождения цели по дальности (АСД). Система содержит одно интегрирующее звено, т.е. является астатической 1-го порядка астатизма. В такой системе устраняется лишь ошибка по положению. Для устранения установившейся скоростной ошибки в систему введено еще одно интегрирующее звено. Таким образом, математическое описание объекта в канонической форме управляемости имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u$$

$$y = [k_1 \quad k_2] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

Главной задачей синтеза робастных систем управления является поиск закона управления, который сохранял бы выходные переменные системы и сигналы ошибки в заданных допустимых пределах несмотря на наличие неопределённостей в контуре

управления. Неопределённости могут принимать любые формы, однако наиболее существенными являются шумы, нелинейности и неточности в знании передаточной функции объекта управления. Отклонения передаточной функции объекта от номинальной вызываются как изменениями его параметров, так и неучтенной динамикой, и действием различного рода возмущений.

При синтезе робастного регулятора для рассматриваемого объекта авторами были проанализированы различные модификации существующих алгоритмов управления. Удобным с точки зрения единообразной процедуры синтеза и обоснований при формировании частотных ограничений, является методика, описанная в [2], которая и была взята за основу. Структурная схема системы с робастным регулятором представлена на рис.1.

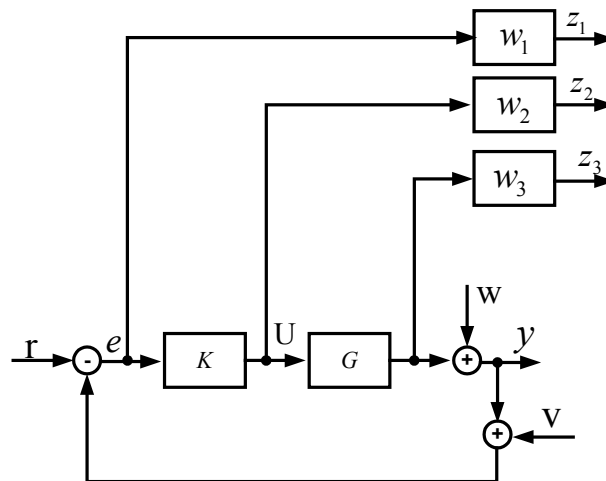


Рисунок 1- Структурная схема системы с робастным регулятором ( $G$  – объект,  $K$  – робастный регулятор,  $r$  – задание,  $w$  – возмущение, приложенное к объекту,  $v$  – помеха измерения,  $e$  – ошибка регулирования,  $U$  – управляющее воздействие,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  – функции, зависящие от частоты)

Рассмотрим схему (рис.1). Задача синтеза робастной системы в частотной области связана с определением такого регулятора, при котором чувствительность замкнутой САУ была бы меньше некоторого допустимого значения, а минимизация чувствительности требует выбора такого регулятора, чтобы эта чувствительность была равна или достаточно близка к минимальному значению.

В дальнейшем ищется такой регулятор, чтобы минимизировать норму  $\|z_1 z_2 z_3\|_\infty$  [2]. При этом для парирования возмущений необходимо иметь малую ошибку  $e$  в диапазоне низких частот, а для обеспечения устойчивости и подавления высокочастотных помех желательно иметь малое значение  $y$  в высокочастотном диапазоне. Для этого нужно ошибку  $e$  в диапазоне низких частот «взвешивать» с большим весом, чем при высоких частотах, т.е. амплитуда частотной характеристики  $w_1$  должна уменьшаться с ростом частоты. Напротив, амплитуда частотной характеристики  $w_3$  должна увеличиваться при увеличении частоты. Что касается частотной характеристики  $w_2$ , то она может оказаться полезной для ограничения мощности управления, а также как параметр, настраиваемый для регулирования быстродействия. Кроме того, в некоторых случаях введение  $w_2$  необходимо, чтобы рассматриваемая задача имела решение [2]. При этом можно ограничиться простейшим выбором  $w_2 = \varepsilon I$ , где  $\varepsilon$  – малая величина,  $I$  – единичная матрица. Так как сингулярная

величина чувствительности  $S(j\omega)$  определяет ослабление возмущений, то требуемое ослабление возмущений может быть задано как

$$\sigma_1(S(j\omega)) \leq |w_1^{-1}(j\omega)|, \text{ где } S(j\omega) = [1 + G(j\omega)K(j\omega)]^{-1}.$$

Границы для остальных функций чувствительности задаются в виде:

$$\sigma_1(R(j\omega)) \leq |w_2^{-1}(j\omega)|,$$

где  $R(j\omega) = K(j\omega)[1 + G(j\omega)K(j\omega)]^{-1}$  - функция чувствительности управления;

$$\sigma_1(T(j\omega)) \leq |w_3^{-1}(j\omega)|,$$

где  $T(j\omega) = G(j\omega)K(j\omega)[1 + G(j\omega)K(j\omega)]^{-1}$  - передаточная функция замкнутой САУ.

При этом должно выполняться условие:

$$\sigma_1(w_1^{-1}(j\omega)) + \sigma_1(w_3^{-1}(j\omega)) > 1.$$

Выбор весовых матриц является неоднозначной задачей, требующей достаточного опыта, полученного путем проб и ошибок. Обычно характеристика  $w_2$  принимается равной небольшой постоянной величине, при ее отсутствии задача не решается. Характеристика  $w_3$  принимается в виде:

$$w_3 = \frac{K_f s^2}{100},$$

где  $K_f$  - настраиваемый параметр.

$$\text{Характеристика } w_1 = \frac{K_f b(as^2 + 2z_1\omega_0\sqrt{as} + \omega_0^2)}{bs^2 + 2z_2\omega_0\sqrt{bs} + \omega_0^2},$$

где  $a, b$  - настраиваемые параметры.

Такое выражение для частотной характеристики можно рассматривать как достаточно общее. После задания весовых матриц существующая система расширяется так, что она включает в себя уравнения этих матриц как дополнительные фазовые координаты.

Все требования к системе по ослаблению возмущений и обеспечению запаса устойчивости сводятся к единственному требованию к норме

$$\|T_{yu}\|_{\infty} \leq 1, \text{ где } T_{yu} = \begin{vmatrix} w_1 S \\ w_2 R \\ w_3 T \end{vmatrix} - \text{функция стоимости смешанной чувствительности.}$$

Для решения задачи минимизации нормы  $T_{yu}$  применяется метод двух уравнений Лурье – Риккати [3,4], сочетающий в себе классическую ТАУ и метод пространства состояний (ПС), а именно: постановка задачи производится в частотной области, а ее решение осуществляется с использованием метода ПС. В рамках подхода «два-Риккати» искомый оптимальный регулятор в форме наблюдателя определяется на основе решения двух многомерных уравнений Лурье – Риккати для восстановления состояния и оптимального управления в смысле минимума  $T_{yu}$  - нормы замкнутой системы. Такой регулятор обеспечивает устойчивость, минимальную чувствительность к возмущениям и изменению параметров объекта [3,4].

Решение уравнений Риккати получено с помощью встроенной функции `hinfort`, осуществляющей так называемые  $\gamma$  - итерации для расчета оптимального регулятора. При этом используются соотношения:

$$\left\| \gamma T_{yu}(\gamma a) \right\| < 1,$$

где  $\gamma a$  - индекс выходных каналов функции стоимости, которые умножаются на  $\gamma$ . Очевидно, что чем больше  $\gamma$ , тем меньше  $\|T_{yu}\|_{\infty}$ , так что ищется максимальное значение  $\gamma$ , при котором решение задачи существует (начальное значение  $\gamma = 1$ ).

Для нашей системы результаты поиска наилучшего решения таковы:

< H-Infinity Optimal Control Synthesis >>

No Gamma D11<=1 P-Exist P>=0 S-Exist S>=0 lam(PS)<1 C.L.

No	Gamma	D11<=1	P-Exist	P>=0	S-Exist	S>=0	lam(PS)<1	C.L.
1	1.0000e+000	FAIL	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
2	5.0000e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
3	2.5000e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
4	3.7500e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
5	3.1250e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
6	3.4375e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
7	3.5938e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
8	3.6719e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST
9	3.6328e-001	OK	OK	OK	OK	OK	OK	STAB
10	3.6523e-001	OK	OK	FAIL	OK	OK	OK	UNST

Iteration no. 9 is your best answer under the tolerance: 0.0100 . Таким образом, наилучшее значение  $\gamma = 0,36328$ .

Структурная схема (рис.1) с синтезированным робастным регулятором была промоделирована с помощью пакета прикладных программ Matlab – Simulink (рис.2).

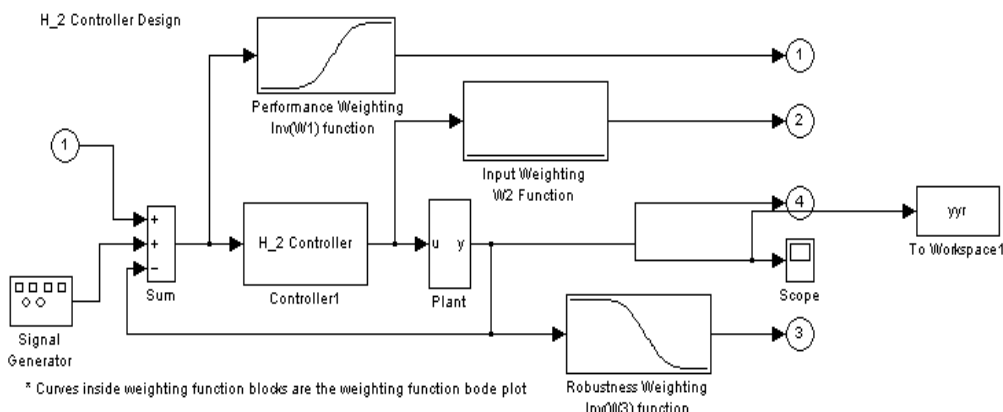


Рисунок 2 - Модель АСД в Simulink

Изменение дальности задано кривой (рис.3).

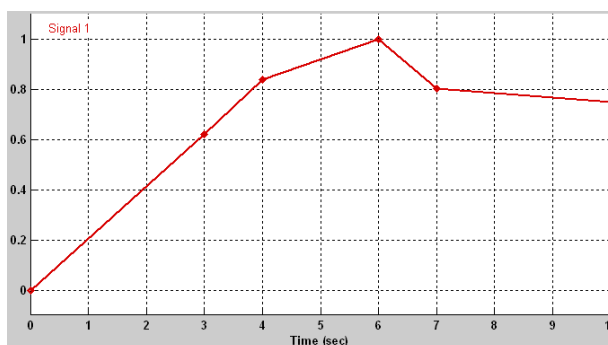


Рисунок 3 - Задающее воздействие для системы АСД

Переходная характеристика по дальности представлена на рис. 4.

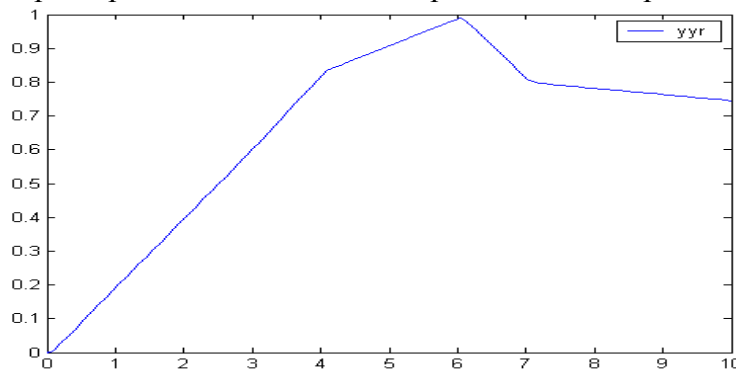


Рисунок 4 - Переходная характеристика дальности системы АСД

Из рис. 4 следует, что система обрабатывает задающее воздействие по дальности с большой точностью и быстродействием.

Результаты моделирования при изменении параметров системы: коэффициента усиления преобразователя и временного дискриминатора [1], приведены на рис.5.

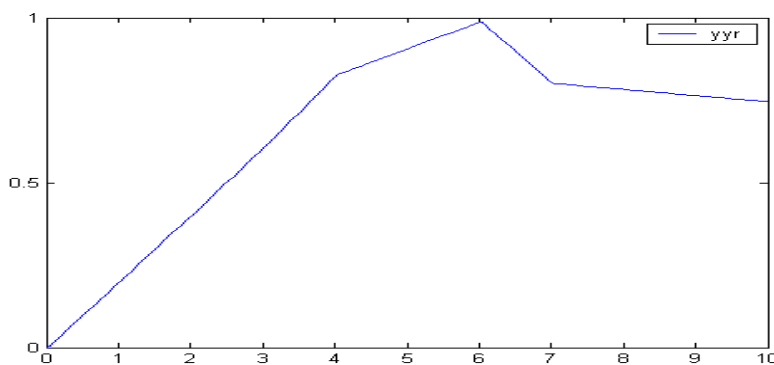


Рисунок 5 - Переходная характеристика дальности системы АСД при изменении коэффициента усиления на 40%

Результаты компенсации возмущающих воздействий, приведены на рис.6. Допустимый уровень шума для РЛС – 10дб.

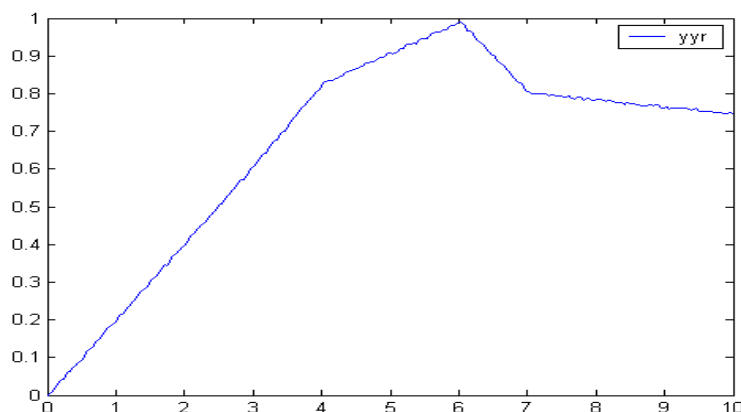


Рисунок 6 - Переходная характеристика дальности системы АСД при действии шума N=10дб

Анализируя результаты моделирования можно сделать вывод, что система является грубой, нечувствительной к изменению параметров объекта и остается устойчивой при действии возмущений.

#### **Выводы.**

1. Получена модель объекта управления в ПС.
2. Рассмотрено применение теории управления  $H_\infty$  для синтеза системы автоматического сопровождения цели по дальности радиолокационной станции.
3. Сформированы требования к замкнутой системе в виде частотных ограничений на сингулярные числа передаточной функции замкнутой САУ.
4. Проведено моделирование динамики САУ при изменении параметров объекта и наличия возмущений. Система является робастной.

#### **Литература**

1. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. Киев: Выща школа, 1988
2. В. М. Перельмутер Пакеты расширения MATLAB. Control System Toolbox, Robust System Toolbox – М.: СОЛОН – ПРЕСС, 2008. – 224с.
3. Robust Control Toolbox, User's guide, The MathWorks, 2001
4. Курдюков А.П., Семенов А.В., Павлов Б.В. Применение  $H_\infty$  - теории в задачах проектирования // Приборы и системы управления. – 1994. -№11.

#### **Abstract**

**Zhukova N.V., Ponitkova G.V. Synthesis of robust control system for automatic target tracking in range for a radar station.** The problem of synthesis of controller for automatic target tracing in range with the use  $H_\infty$  - method is solved. System requirements formulated in terms of frequency limitations on the singular number of the transfer function of the closed-loop system. The results of simulation of a system with a robust controller are reduced.

**Keywords:**  $H_\infty$  - method, automatic target tracking in range, the state variables, robust control, transfer function.

#### **Анотація**

**Жукова Н.В., Поніткова Г.В. Синтез робастного регулятора системи автоматичного супроводу цілі по дальності для радіолокаційної станції.** Вирішена задача синтезу регулятора для системи автоматичного супроводу цілі по дальності з використанням  $H_\infty$  - методу управління. Вимоги до системи формуються у вигляді частотних обмежень на сингулярні числа передатної функції замкнутої системи. Наведені результати моделювання САУ з робастним регулятором.

**Ключові слова:**  $H_\infty$  - метод, система автоматичного супроводу цілі по дальності, змінні стану, робастний регулятор, передаточна функція.

Здано в редакцію:  
30.03.2010р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Зорі А.А.