

УДК 621.926:34.16

Н.В. МОРКУН, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО H_2 - УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА H_∞ - НОРМУ

Решается задача синтеза робастного регулятора для управления сложными динамическими объектами с использованием смешанного H_2/H_∞ - метода формирования контура с ограничением на размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы в заданной области с привлечением аппарата линейных матричных неравенств

Ключевые слова: синтез, H_∞ -теория управления, контроллер, робастное управление

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Из-за целого ряда различных причин рассчитанная система в реальности может оказаться неработоспособной, поэтому необходимо заранее выявить все характеристики, отражающие ее практическую работоспособность. Значительные массивы информации в одном случае и информационная неопределенность в другом требуют для анализа использования всего известного арсенала методов. Проблемно-ориентированные информационные пространства разного уровня и назначения являются одним из элементов создаваемой платформы развития робастных методов построения ИСУ.

Применение робастных методов происходит в условиях неполноты начальных данных, нечеткости информации, неопределенности и противоречивости целей и критериев. Значительная начальная информационная энтропия создает преграды, которые не позволяют адекватно функционировать системам, построенным по традиционным, классическим методам управления.

Математические модели являются главной составляющей формализованной задачи и вместе с ограничениями составляют тот базис, который в результате отображения на множество данных позволяет сделать вывод о ее корректности или необходимости дополнительной подготовки начальной информации.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время в теории управления широко используется аппарат линейных матричных неравенств (ЛМН) [1-4]. Он хорошо подходит для синтеза регулятора в обратной связи, когда различные требования к замкнутой системе можно задавать в виде ЛМН. В концепции из работы [2] процедура синтеза регулятора сводится к минимизации какого-либо критерия оптимальности на заданной ЛМН-области.

Так в работах [2], [3] рассматривается задача синтеза H_∞ - оптимального регулятора с расположением полюсов замкнутой системы в ограниченной выпуклой области на комплексной плоскости, которая сводится к решению ЛМН. В русскоязычной литературе данный метод более подробно описан в [4].

Вопросы чувствительности к возмущениям и шумам, а также точностные характеристики при таком подходе считаются менее сложными и не рассматриваются, однако, они требуют дополнительного решения.

Цель исследований. Целью является синтез системы робастного управления сложными динамическими объектами и оценка производительности и надежности с помощью инструментария Robust Control Toolbox™ в MATLAB.

Изложение материала и результаты. С инженерной точки зрения под синтезом системы управления можно понимать построение системы управления, обеспечивающей выполнение всех предъявляемых к ней технических требований. Проектируемая система управления должна обеспечивать приемлемое качество переходных процессов, необходимую точность и робастность к неопределенности в модели объекта управления [4].

Требования к проектируемой системе могут формулироваться как во временной, так и в частотной областях [5]. Расположение и вид корней характеристического полинома (полюсов передаточной функции замкнутой системы) определяют характер переходного процесса. Поэтому требования к запасу устойчивости и быстродействию, не рассматривая кривые переходного процесса, можно сформулировать накладывая ограничения на корни характеристического полинома.

Таким образом, формируя ограничения на расположение и вид корней характеристическо-

го полинома, можно задавать ограничения во временной области на вид переходного процесса и, очевидно, на максимальные значения регулируемой величины, значения перерегулирования, времени переходного процесса и др.

Требования к расположению полюсов передаточной функции замкнутой системы в некоторой заданной области на комплексной плоскости позволяет задавать ограничения на:

быстродействие, которое может быть оценено по степени устойчивости (абсолютной величине действительной части ближайшего к мнимой оси корня);

запас устойчивости, который может быть оценен по колебательности (максимальному отношению мнимой части корня к его действительной части) или параметру затухания (коэффициенту демпфирования);

максимальную угловую частоту собственных колебаний системы (максимальную абсолютную величину мнимой части корня).

Задача робастной стабилизации состоит в нахождении максимальной величины неопределенности (величины робастного запаса устойчивости), при которой один регулятор обеспечивает устойчивость замкнутой системы для всего семейства возмущенных объектов с ограниченными по H_∞ - норме возмущениями. В H_∞ - методе формирования контура задача робастной стабилизации решается не для исходного, а для нового обобщенного объекта, образованного с помощью формирующих функций (префильтра и постфильтра). Обобщенный объект представляет собой последовательное соединение многомерных передаточных функций двух формирующих функций и исходного номинального объекта управления. Требуемые характеристики качества и робастности замкнутой системы обеспечиваются благодаря выбору соответствующих формирующих функций, а решение задачи робастной стабилизации гарантирует устойчивость замкнутой системы.

Важно отметить, что в данном методе не требуется информация о фазовой характеристике номинального объекта. Кроме того, значение величины запаса робастной устойчивости является единственным индикатором, характеризующим степень достижения задаваемых требований к замкнутой системе.

Анализ функций чувствительности дает количественную информацию о том, насколько чувствительна номинальная модель к неопределенности параметров объекта управления и внешним возмущениям.

Смешанная чувствительность - это название, данное в задаче формирования передаточных функций, в которой функция чувствительности $S_0=(1+GK)^{-1}$ формируется наряду с одной или более замкнутыми передаточными функциями, такими как KS или T_0 [6].

Функции чувствительности, параметры которых следует подобрать, зависят от поставленных целей управления. Главной целью управления системой является подавление возмущения d на входе. Для решения этой проблемы имеет смысл использовать замкнутые передаточные функции S и KS . Используются две такие схемы: с возмущающим сигналом на входе объекта управления (рис. 1) и с опорным сигналом на входе объекта управления (рис. 2).

При управлении по схеме S/KS внешний вход является входом для сигнала задания r . Сигналы ошибки $Z_\infty=Z_e=W_e e=W_e Sw$ и $Z_2=Z_u=W_u u=W_u KS w$.

Рассмотрим также следующие методы:

S/T (функция чувствительности S формируется по H_∞ норме, а T по H_2 - норме) (рис. 3);

$S/KS/KS$ (одна из функций чувствительности KS формируются по H_∞ норме, а вторая по H_2 - норме) (рис. 4);

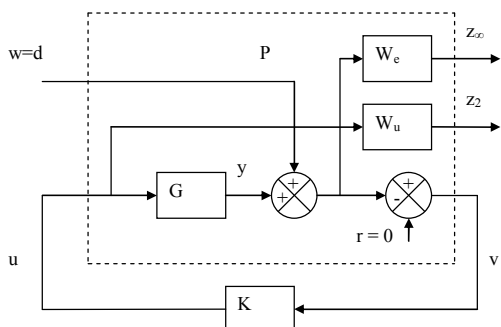


Рис. 1. Оптимизация по S/KS схеме смешанной чувствительности в стандартной форме (отслеживание)

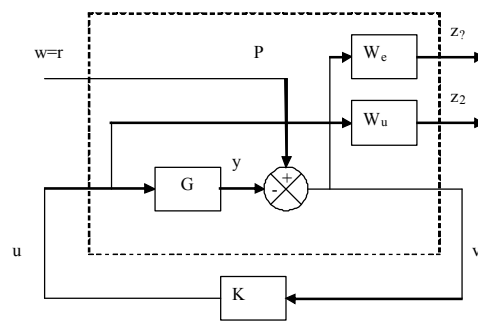


Рис. 2. Оптимизация по схеме S/KS смешанной чувствительности в стандартной форме (регулирование)

$S/KS/T$ (функции чувствительности S и $K S$ формируются по H_∞ норме, а T по H_2 - норме) (рис. 5);

$S/T/KS$ (функция чувствительности S и комплементарная функция чувствительности T формируются по H_∞ норме, а $K S$ по H_2 - норме) (рис. 6).

Основной проблемой оптимизации по схеме смешанной чувствительности является нахождение стабилизирующего контроллера, который минимизирует

$$\left\| \begin{bmatrix} W_e S \\ W_y T \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (1)$$

Введение передаточной функции T желательно для решения проблемы отслеживания и поглощения возмущения, а также для обеспечения робастной стабильности в отношении мультипликативных возмущений на выходе объекта управления.

Задача оптимизации по S/T схеме смешанной чувствительности в стандартной конфигурации управления представлена на рис. 3.

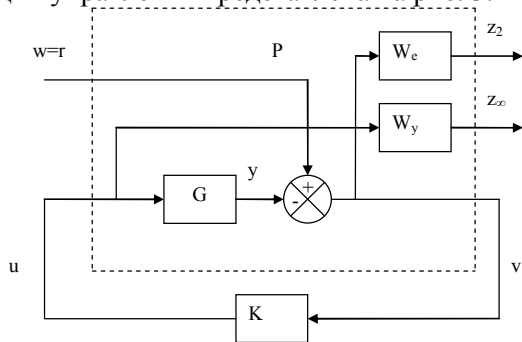


Рис. 3. Оптимизация по S/T схеме смешанной чувствительности в стандартной форме

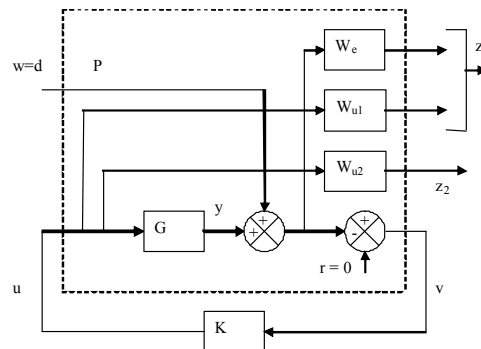


Рис. 4. Оптимизация по $S/KS - KS$ схеме смешанной чувствительности

Все упомянутые выше конфигурации используются при решении задач оптимизации H_∞ смешанной чувствительности.

Известно, что качество управления лучше регулируются посредством H_2 нормы. С этой целью на выход контроллера u добавлена характеристика H_2 . Задачей этой конфигурации (рис. 4) является минимизация

$$\left\| \begin{bmatrix} W_e S \\ W_{u1} K S \end{bmatrix} \right\|_\infty \text{ и } \left\| [W_{u2} K S] \right\|_2 \quad (2)$$

Формирующая функция W_{u2} используется для нахождения компромисса между управлением и подавлением возмущений.

Рассмотрим оптимизацию по схемам $S/KS-T$ (рис. 5) и $S/T-KS$ (рис. 6) смешанной чувствительности.

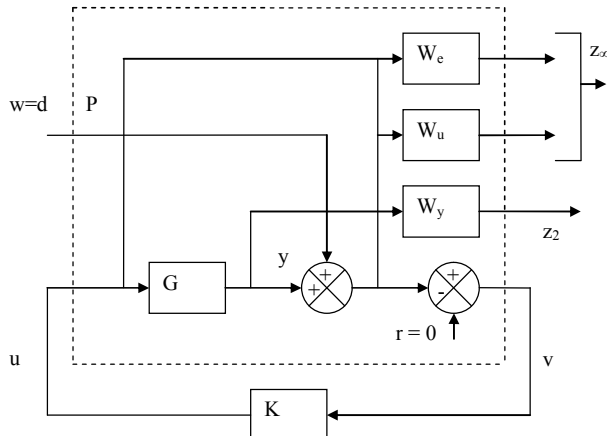


Рис. 5. Оптимизация по $S/KS - T$ схеме смешанной чувствительности

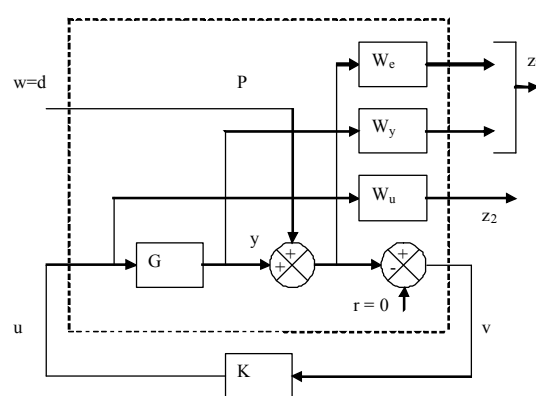


Рис. 6. Оптимизация по $S/T - KS$ схеме смешанной чувствительности

В первом случае целью является достижение минимума передаточных функций выходной

чувствительности и сигналов управления по H_∞ норме, а комплементарной передаточную функции на выходе - по H_2 норме.

Во втором случае формирующая функция KS и чувствительность T относятся к Z_2 и Z_∞ выходам соответственно. При этом H_∞ оптимизация больше отвечает за робастность системы, а H_2 - за производительность.

После сравнения результатов моделирования и экспериментальных исследований наиболее удобной для практической реализации признана схема, изображенная на рис. 4.

Для усовершенствования эксплуатационных характеристик (минимизации статической погрешности) объекта управления был рассмотрен следующий вид весовой функции

$$W_e = \frac{s/M_e + \omega_e}{S + A_e \omega_e} \tag{3}$$

Здесь следует отметить, что при низких частотах $|w_e(j\omega)|^{-1} A_e \leq 1$, при больших частотах $M_e \geq 1$ и асимптота пересекает 1 при частоте ω_e , что примерно соответствует необходимой ширине полосы.

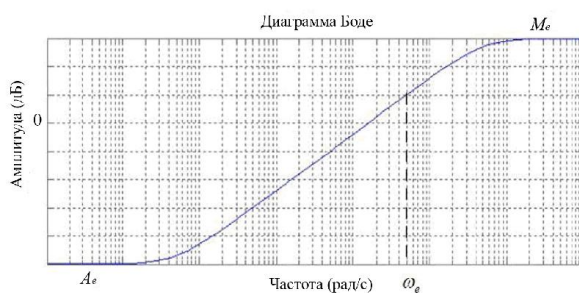


Рис. 7. Инвертирование весовых характеристик

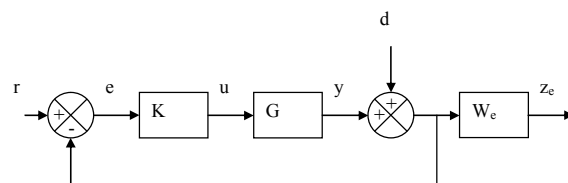


Рис. 8. Система с обратной связью и весовой функцией чувствительности на выходе

Подобрав подходящую весовую функцию W_e , можно оптимизировать частотную характеристику S и эксплуатационные характеристики контроллера при условии, что выполняется неравенство

$$|W_e(e^{j\omega T_s})S(e^{j\omega T_s})| < 1 \tag{4}$$

На практике исполнительный механизм всегда имеет ограничения амплитуды и скорости. Следовательно, очень важно использовать для представления этих ограничений подходящую весовую функцию. В случае KS чувствительности рассматривается та же функция, что и при оптимизации эксплуатационных характеристик. Рассмотрим передаточную функцию KS между d и контрольными сигналами. KS целесообразно использовать для того, чтобы ограничить диапазон регулирования контроллера и таким образом контролировать используемую энергию, а также для обеспечения робастности.

$$W_u = \frac{s/M_u + \omega_u}{S + A_u \cdot \omega_u} \tag{5}$$

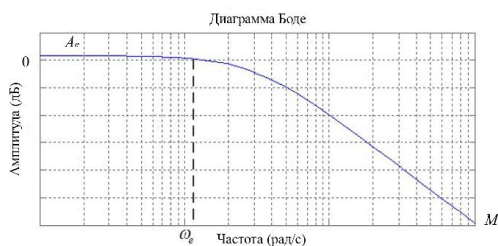


Рис. 9. Инвертирование весовой функции контрольного сигнала

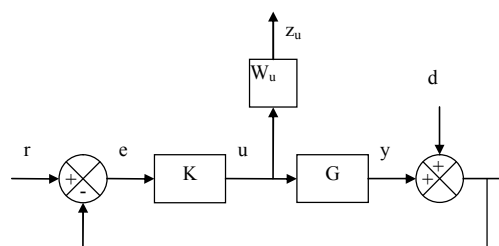


Рис. 10. Система с обратной связью и комплементарной весовой функцией чувствительности на выходе

Систему по схеме комплементарной чувствительности T удобно использовать для отслеживания и снижения шумовых возмущений. Вид ее весовой функции - как и в двух предыдущих случаях

$$W_y = \frac{s/M_y + \omega_y}{S + A_y \omega_y} \tag{6}$$

Это выражение является фильтром верхних частот как и KS .

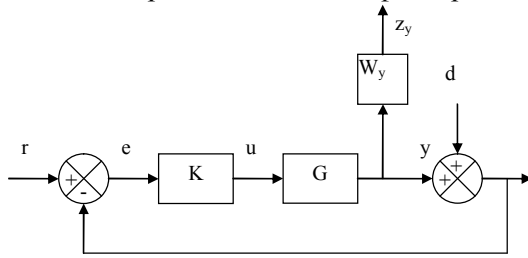


Рис. 11. Стандартная конфигурация комплементарной функции чувствительности T и весовой функции

Чтобы минимизировать ошибку r или погасить влияние помехи w лучше использовать функцию малой чувствительности S , а для того, чтобы объект сохранял контролируемую робастную стабильность больше подходит комплементарная функция T . Следовательно, возникает неизбежный конфликт

между функциями S и T . Компромиссное решение - использование контроллера для разделения частотных областей S и T , но на практике такой подход является трудно реализуемым.

Для многокритериальной задачи наиболее подходящим является контроллер смешанной чувствительности.

Для оценки качества управления замкнутой системой использован программный комплекс Matlab.

Зависимости, приведенные на рис. 12, свидетельствуют о том, что имеет место фильтрация сигнала управления на высоких частотах, так как передаточные функции, связанные с сигналами KS и S имеют общее значение на частоте 1370 рад/с (рис. 13).

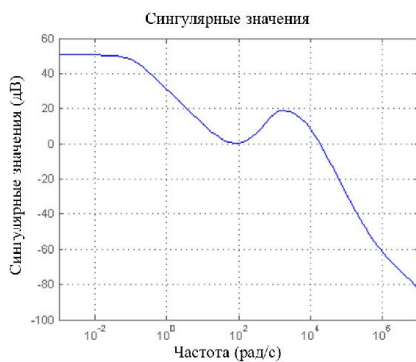


Рис. 12. Сингулярные значения

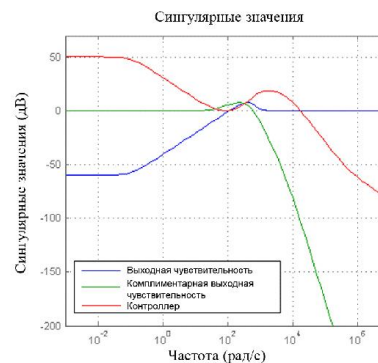


Рис. 13. Сингулярной участок, выходная и комплементарная выходная чувствительности

Полюса и нули замкнутой системы, управляемой многокритериальным контроллером, расположены в левой половине плоскости, что приводит к определённой неустойчивости системы. Все нули, кроме $z=5 \cdot 10^5$ и полюса системы представлены на рис. 14.

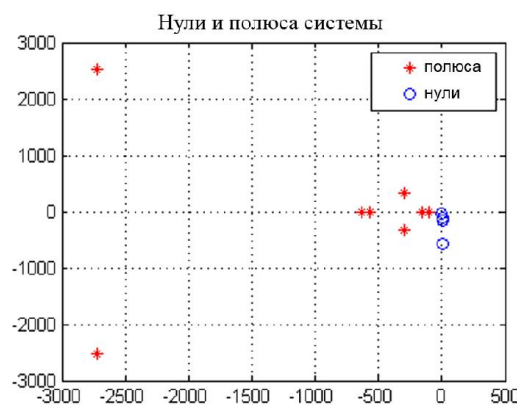


Рис. 14. Нули и полюса замкнутой системы

Выводы. Выполнен синтез робастного стабилизирующего регулятора для оптимизации управления динамическими объектами обогатительного производства. Построение контроллеров системы управления предложено проводить на основе H_2/H_∞ - метода формирования контура управления с последовательными формирующими функциями, позволяющего обеспечить гарантированные «робастность», устойчивость и требуемое качество управления технологическими процессами, а также оптимальный выбор основных интервалов робастной стабилизации

этих систем.

Список литературы

1. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: Физ-матлит. 2007.
2. Chilali M., Gahinet P. H_∞ design with pole placement constraints: an LMI approach // IEEE Trans. AC.- 1996. - V. 41. - No. 3. Pp. 358-367.
3. Chilali M., Gahinet P., Apkarian P. Robust pole placement in LMI regions // IEEE Trans. AC. - 1999. - V. 44. - No. 12. Pp. 2257-2270.
4. Бойченко В.А., Курдюков А.П., Тимин В.Н., Чайковский М.М. Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры // Управление большими системами. - 2007. - Выпуск 19. - С. 23-126.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука. 1972.
6. Madoyan A. 2009. Design and comparison of mixed H_2/H_∞ controller for AMB system. Lappeenranta University of Technology, Finland, Lappeenranta.

Рукопись поступила в редакцию 12.07.13

УДК 669.017: 621.77

Н.Н. БЕРЕЖНОЙ, д-р техн. наук, проф., Д.Ю. КЛЮЕВ, канд. техн. наук, доц,
С.О. МАЦЫШИН, аспирант, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ГАРМОНИЗАЦИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ УКРАИНЫ НА НЕКОТОРЫЕ МАРКИ СТАЛИ ГОРЯЧЕКАТАНОГО АРМАТУРНОГО ПРОКАТА С МЕЖДУНАРОДНЫМИ АНАЛОГАМИ

Рассмотрено предложение замены низколегированных спокойных сталей полуспокойными, соответствующими международным стандартам для производства арматуры, используемой для ответственных сварных и железобетонных конструкций.

Ключевые слова: низколегированные спокойные стали, полуспокойные стали, международные стандарты, арматура.

Постановка проблемы. В соответствии с Программой пересмотра действующих в Украине стандартов бывшего СССР, одной из основных задач технических комитетов по стандартизации является пересмотр межгосударственных стандартов, разработанных до 1992 г., и соответствие их Соглашению о технических барьерах в торговле ВТО (Agreement on Technical Barriers to Trade).

Одним из наиболее распространенных видов металлопродукции, который выпускается металлургическими предприятиями Украины, является горячекатаный арматурный прокат класса А400 (АIII) для производства железобетонных конструкций. При этом, наиболее распространенными марками низколегированных сталей на украинских предприятиях, являются кремнемарганцовистые стали 35ГС и 25Г2С согласно ГОСТ 5781 (табл. 1).

Таблица 1

Нормативные требования стандартов к химическому составу, механическим и служебным свойствам основных марок арматурной стали

Страна	Стандарт	Обозначение арматуры	Химический состав, %					Углеродный эквивалент $C_{эв}$, % не более)
			C	Mn	Si	S	P	
Украина	ГОСТ 5781	A400 (A-III)	0,30-0,37	0,8-1,2	0,6-0,9	0,045	0,045	0,62
	ГОСТ 10884	At-V, At-VI	0,20-0,29	1,2-1,6	0,6-0,9	0,045	0,045	0,62
США	ASTM A706	415/550	0,3	1,5	0,5	0,045	0,035	0,55
Великобритания	BS 4449	425-460	0,4	-	-	0,050	0,050	0,51
Япония	JISG 3112	SD 40	0,29	1,8	0,55	0,050	0,050	0,55
Германия	DIN 488	BSt 420	0,37	-	-	0,050	0,050	0,65

При производстве этих сталей наблюдаются: повышенные затраты легирующих материалов (силикомарганца, ферросилиция и т.д.), повышенные затраты труда на подготовку составов с изложницами и разливку металла; необходимость использования утепляющих, но засоряющих окружающую среду, теплоизоляционных материалов и утепляющих смесей; низкий выход годного.