

9. Sevrjukov A. S., P. V. Golubev, and S. A. Lutkov. "Informacionnaja podderzhka i algoritm sinteza dinamicheskoj sistemy upravlenija metodom nelinejnogo programmirovaniya." *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Informacionnye tehnologii i sistemy (Upravlenie, jekonomika, transport)*. SPb.: ООО «Andreevskij izdatelskij dom», 2005: 134–139.

10. Cannon, M. "Efficient nonlinear model predictive control algorithms." *Annual Reviews in Control* 28.2 (2004): 229–237. DOI:10.1016/j.arcontrol.2004.05.001.

11. Diveev, A. I. "A numerical method for network operator for synthesis of a control system with uncertain initial values." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 51.2 (2012): 228–243.

12. Djakonov, V. P., and V. V. Kruglov. *Matematicheskie pakety rasshirenija MATLAB: Specialny spravocnik*. SPb.: Piter, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
saharov@rambler.ru

Чертков Александр Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
chertkov51@mail.ru

Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант.
Научный руководитель:
Сахаров Владимир Васильевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_osnivr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov Vladimir Vasilevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
saharov@rambler.ru

Chertkov Alexandr Alexandrovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
chertkov51@mail.ru

Saburov Sergey Valerevich — Postgraduate.
Supervisor:
Saharov Vladimir Vasilevich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kfspguvk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2016 г.

УДК 681.51

А. А. Дыда,
Е. Б. Осокина,
П. А. Дыда

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

В настоящей работе представлен подход к построению и оптимизации линейных регуляторов системы управления курсом судна, гарантирующих её робастные свойства с заданным качеством переходных процессов. Для оценки переходных процессов в системе управления используется показатель степени устойчивости. Особенностью математической модели судна является интервальная неопределённость её параметров, связанная с режимом его движения. Теоретической основой для построения системы управления, малочувствительной к вариациям параметров судна, является теорема В. Л. Харитонова. Показано, что оптимизация робастных регуляторов по критерию степени устойчивости сводится к стандартной задаче нелинейного программирования. Предложена методика параметрической оптимизации робастных регуляторов в системе управления линейным динамическим объектом. Приводятся результаты математического моделирования синтезированной робастной системы управления курсом судна.

Ключевые слова: управление судном, модель Номото 1-го порядка, робастность, степень устойчивости, интервальные параметры.

Введение

При построении систем автоматического управления, в частности — систем управления курсом судна, предъявляются определённые требования к качеству переходных процессов. Как правило, синтез регуляторов подобных систем основан на применении упрощённых математических моделей, описываемых линейными стационарными дифференциальными уравнениями [1]. Однако в различных режимах эксплуатации судна параметры, характеризующие его поворотливость и инерционные свойства, изменяются в достаточно широких пределах [2]. Поэтому более адекватной представляется модель, в которой параметры являются интервальными значениями [3], [4]. В работе ставится задача параметрического синтеза традиционно используемых линейных регуляторов, обеспечивающих заданное качество процессов управления при произвольных значениях параметров судна в допустимой области [5]. Для оценки качества переходных процессов в системе используется показатель степени устойчивости [1], [6], [7].

Модель судна и робастная устойчивость системы

Для иллюстрации подхода, предлагаемого в настоящей работе, рассмотрим простую математическую модель судна, известную как модель Номото 1-го порядка [7], [8]. Для определённости выберем типовой ПИД-регулятор. В этом случае математическая модель системы управления описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T\ddot{x} + [1 + Tk_c k_d]\dot{x} + k_c k_p x = 0, \quad (1)$$

где $x(t)$ — курс судна; T и k_c — параметры судна, имеющие интервальный характер; k_d , k_p , k_i — параметры регулятора.

Предположим, что степень устойчивости системы управления [9] – [11] равна α . Введём дополнительную переменную $y(t)$ в соответствии с выражением

$$x = ye^{-\alpha t}. \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в модель (1), получаем следующее дифференциальное уравнение для функции $y(t)$:

$$T\ddot{y} + (1 + k_c k_d - 3T\alpha)\dot{y} + (k_c k_p - 2\alpha[1 + k_c k_d] + 3T\alpha^2)y + ([1 + k_c k_d]\alpha^2 + k_c k_i - k_c k_p \alpha - T\alpha^3)y = 0. \quad (3)$$

При робастной устойчивости уравнения (3) по переменной $y(t)$ очевидно, что для процессов $x(t)$ гарантируется степень устойчивости α . Введём обозначения для коэффициентов дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= T; \\ \alpha_1 &= 1 + k_c k_d - 3T\alpha; \\ \alpha_2 &= k_c k_p - 2\alpha[1 + k_c k_d] + 3T\alpha^2; \\ \alpha_3 &= [1 + k_c k_d]\alpha^2 + k_c k_i - k_c k_p \alpha - T\alpha^3. \end{aligned}$$

Для выяснения условий робастной устойчивости дифференциального уравнения (3) воспользуемся *теоремой Харитоновой*. В общем случае теорема Харитоновой требует проверки устойчивости четырёх характеристических полиномов с коэффициентами, принимающими граничные значения. В рассматриваемом нами случае достаточно проверки устойчивости одного полинома $P_1(s)$:

$$P_1(s) = \overline{a_0}s^3 + \underline{a_1}s^2 + \underline{a_2}s + \overline{a_3},$$

где верхнее и нижнее подчёркивание соответствует максимальному и минимальному значению коэффициента. Для принятых интервальных параметров вычислим необходимые значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} \bar{a}_0 &= T_{\max}; \\ \bar{a}_1 &= ([1 + k_c k_d] - 3T\alpha)_{\min} = 1 + k_{c\min} k_d - 3\alpha T_{\max}; \\ \bar{a}_2 &= (k_c k_p - 2\alpha[1 + k_c k_d] + 3T\alpha^2)_{\min} = k_{c\min} k_p - 2\alpha k_{c\max} k_d - 2\alpha + 3T_{\min} \alpha^2; \\ \bar{a}_3 &= ([1 + k_c k_d]\alpha^2 + k_c k_i - k_c k_p \alpha - T\alpha^3)_{\max} = \alpha^2 + k_{c\max} k_d \alpha^2 - T_{\min} \alpha^3 + k_i k_{c\max} - k_p \alpha k_{c\min}. \end{aligned}$$

Согласно критерию Гурвица, полином $P_1(s)$ будет робастно устойчивым, если соответствующие определители являются положительными. Составим матрицу Гурвица и запишем определители Гурвица для принятых выше интервальных параметров:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 1 + k_{c\min} k_d - 3\alpha T_{\max}; \\ \Delta_2 &= ([1 + k_{c\min} k_d - 3\alpha T_{\max}] \cdot [k_{c\min} k_p - 2\alpha k_{c\max} k_d - 2\alpha + 3T_{\min} \alpha^2]) - \\ &\quad - (T_{\max} [\alpha^2 + k_{c\max} k_d \alpha^2 - T_{\min} \alpha^3 + k_i k_{c\max} - k_p \alpha k_{c\min}]); \\ \Delta_3 &= \Delta_2 (\alpha^2 + k_{c\max} k_d \alpha^2 - T_{\min} \alpha^3 + k_i k_{c\max} - k_p \alpha k_{c\min}). \end{aligned}$$

В качестве примера примем интервальные параметры математической модели судна типа «Архангельск»:

$$\begin{aligned} T &= [16; 25]; \\ k_c &= [0,036; 0,0545]. \end{aligned}$$

Задавшись для определённости степенью устойчивости $\alpha = 0,008(\text{с}^{-1})$ и параметрами регулятора $k_p = 0,9$; $k_i = 0,003$; $k_d = 0,7$, получаем следующие значения определителей Гурвица:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 0,425 > 0; \\ \Delta_2 &= 0,008 > 0; \\ \Delta_3 &= 0,0000006 > 0. \end{aligned}$$

Следовательно, уравнение (3) для переменной $y(t)$ является робастно устойчивым, что определяет, в свою очередь, робастную устойчивость уравнения (1) с выбранным показателем качества α .

Параметрический синтез и оптимизация робастного регулятора

Нами были получены достаточные условия робастной устойчивости системы управления курсом судна, основанные на интервальной модели Номото 1-го порядка. Задача синтеза заключается в нахождении параметров выбранного регулятора. Анализ показывает, что эта задача сводится к стандартной задаче нелинейного программирования. При решении задачи максимизации степени устойчивости в качестве критерия оптимальности F следует выбрать сам параметр α :

$$F = \alpha \rightarrow \max.$$

При постановке задачи обеспечения требуемой устойчивости α_d , критерий оптимальности F следует выбрать в виде

$$F = (\alpha - \alpha_d)^2 \rightarrow \min.$$

Требование неотрицательности определителей, задаваемых теоремой Харитонова, представляет собой набор ограничений, в общем случае описываемых нелинейными соотношениями. В настоящее время существует достаточно много программных сред, в которых такая задача может быть решена численными методами. Для решения поставленной задачи могут быть использованы вычислительные среды с функцией численной оптимизации, которая позволяет предложить следующую методику параметрического синтеза робастных регуляторов на основе интервальных моделей.

1. На лист электронной таблицы заносятся граничные значения интервальных параметров выбранной модели управляемого объекта.

2. Задаются начальные значения параметров регулятора выбранного типа, которые далее будут оптимизироваться.

3. В целевую ячейку вносится выражение, определяющее оптимизируемую функцию.
4. Указываются изменяемые переменные, представляющие собой параметры регулятора и степень устойчивости.
5. Вносятся ограничения, выражающие требования положительности определителей матрицы Гурвица, составленной из коэффициентов полиномов Харитонова.
6. Выполняется численная оптимизация.

Для приведённой модели результаты оптимального параметрического синтеза по предложенной выше методике, представлены в таблице.

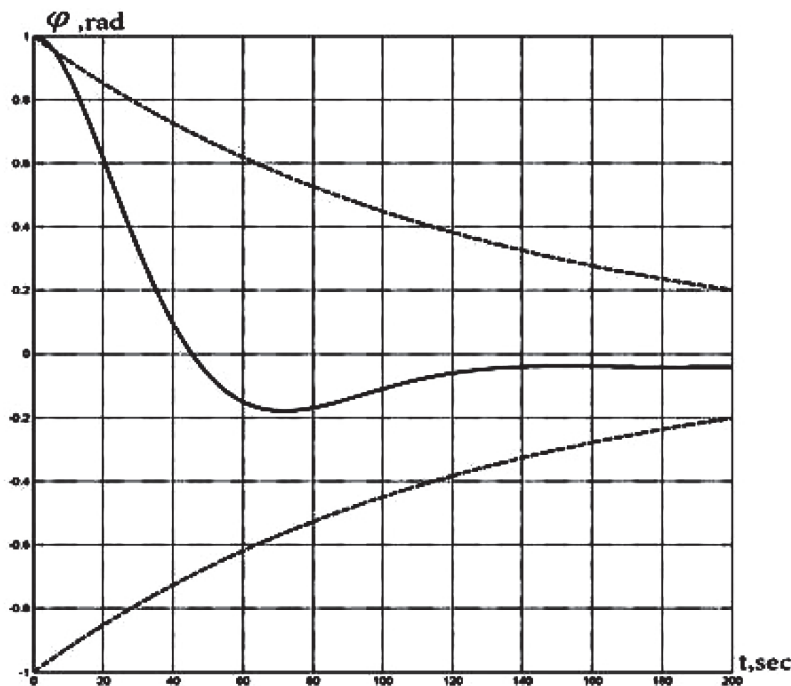
Результаты синтеза

Параметры судна				Синтезированные параметры ПИД-регулятора			Оптимизированная степень устойчивости, [с ⁻¹]
Коэффициент поворотливости, [с ⁻¹]		Постоянная времени, [с]		K_d	K_p	K_i	α
K_{\min}	K_{\max}	T_{\min}	T_{\max}				
0,036	0,054	16	25	0,7	0,5	0,0003	0,008

При необходимости могут быть введены дополнительные ограничения, исходя из возможностей практической реализации, например — для коэффициентов передачи регуляторов.

Математическое моделирование

Для оценки результатов синтеза было проведено моделирование систем управления при различных сочетаниях граничных значений интервальных параметров, которое подтвердило, что регулятор с выбранным коэффициентом передачи обеспечивает максимальную гарантированную степень устойчивости α . На рисунке приведен пример переходного процесса при параметрах модели $T = T_{\min}$; $k = k_{\max}$. Пунктиром на рисунке обозначена область процессов, соответствующая оптимизированному значению α .



Процесс $x(t)$ в системе управления с ПИД-регулятором при $T_{\min} = 16$ с; $k_{\max} = 0,0545$ с⁻¹; $\alpha = 0,008$

Моделирование также показывает, что при других возможных сочетаниях параметров модели процессы остаются в указанной области.

Выводы

Таким образом, в работе, на основе систематического применения теоремы Харитоновой, развивается подход к синтезу традиционных линейных регуляторов, которые обеспечивают требуемое качество процессов в системе управления курсом судна. Особенность предложенного подхода к параметрическому синтезу регуляторов заключается в том, что введение дополнительной переменной позволяет получить вспомогательное дифференциальное уравнение, робастная устойчивость которого гарантирует желаемое качество переходных процессов в исходной системе управления. Кроме того, показано, задача параметрического синтеза линейных робастных регуляторов при надлежащем выборе критерия оптимальности фактически представляет собой традиционную задачу нелинейного программирования с ограничениями, задаваемыми определителями Гурвица. Результаты численного моделирования синтезированных регуляторов подтвердили справедливость полученных соотношений и предложенной методики синтеза.

Очевидно, что этот подход может быть распространён на линейные модели судна более высокого порядка и в целом на произвольные линейные динамические объекты. Возможности современных вычислительных сред позволяют существенно упростить решение рассмотренной задачи параметрического синтеза линейных регуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бесекерский В. А.* Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов / 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Профессия, 2004. — 747 с.
2. *Оськин Д. А.* Анализ математических моделей морских судов для задач управления движением / Д. А. Оськин, В. В. Глазунов, С. А. Воробьёва // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. — № 1. — С. 96–99.
3. *Осокина Е. Б.* Интервальный подход к моделированию динамики морских подвижных объектов / Е. Б. Осокина // Вестник Морского государственного университета. — 2015. — № 60. — С. 71–73.
4. *Оськин Д. А.* Перспективы применения адаптивных регуляторов в современных системах управления движением морских судов / Д. А. Оськин, В. В. Глазунов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. — № 1. — С. 99–102.
5. *Осокина Е. Б.* Построение робастных систем управления курсом судна по критерию степени устойчивости / Е. Б. Осокина // FEBRAT-15: сб. материалов XI междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы транспорта Дальнего Востока». — Владивосток: Морской гос. ун-т, 2015. — С. 155–157.
6. *Оськин Д. А.* Синтез робастных регуляторов на основе степени устойчивости системы управления курсом судна / Д. А. Оськин, Е. Б. Осокина, Е. А. Константинова, А. А. Дыда // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 2. — С. 106–109.
7. *Осокина Е. Б.* Адаптивная идентификация параметров судна на основе простых моделей / Е. Б. Осокина, Д. А. Оськин, А. А. Дыда // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 24–31.
8. *Amerongen J.* Adaptive Steering of Ship: PhD thesis / J. van Amerongen. — Delft University of Technology, 2005. — 156 p.
9. *Шубладзе А. М.* Исследование оптимальных по степени устойчивости решений при ПИД управлении: в 2 ч. / А. М. Шубладзе, В. Е. Попадьюк, А. А. Якушева, С. И. Кузнецов // Управление большими системами: сб. тр. — 2008. — № 22. — Ч. 1. — С. 86–100.
10. *Пушкарев М. И.* Синтез робастного регулятора по критерию максимальной степени устойчивости на основе интервальных коэффициентов характеристического полинома / М. И. Пушкарев, С. А. Гайворонский // Решетниковские чтения. — 2011. — Т. 2. — № 15. — С. 496–497.
11. *Пушкарев М. И.* Параметрический синтез робастного регулятора, обеспечивающего квазимоксимальную степень устойчивости интервальной системы / М. И. Пушкарев, С. А. Гайворонский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2012. — № 2-1 (26). — С. 162–165.

PARAMETER OPTIMIZATION OF ROBUST REGULATOR FOR SHIP CONTROL SYSTEM

The paper presents an approach to design and optimization of linear regulators in ship course control system which guaranties its robust properties with prescribed quality of transitional processes. To evaluate system

transients, a degree of stability is used. A feature of ship mathematical model consists in interval uncertainty of its parameters correlated with ship movement regime. Theoretical basis for control system design which provides low sensibility with respect to ship parameter variations is Kharitonov's theorem. It is show that robust regulator parameters optimization with stability degree criterion is reduced to a standard problem of nonlinear programming. A methodology of robust regulator parameters optimization is proposed. Mathematical modeling results designed robust control system is given.

Keywords: ship control, Nomoto's models, robustness, stability degree, interval parameters.

REFERENCES

1. Besekerskij, V. A., and E. P. Popov. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya*. SPb.: Izd-vo «Professija», 2004.
2. Os'kin, D. A., V. V. Glazunov, and S. A. Vorob'jova. "Sea ships mathematical models analysis for movement control problems." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2010): 96–99.
3. Osokina, E. B. "Intervalnyj podhod k modelirovaniyu dinamiki morskikh podvizhnyh obektov." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 60 (2015): 71–73.
4. Os'kin, D. A., and V. V. Glazunov. "Perspectives of adaptive regulators applications in modern control systems of sea ships movement." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 1 (2010): 99–102.
5. Osokina, E. B. "Postroenie robnostnyh sistem upravlenija kursom sudna po kriteriju stepeni ustojchivosti." *FEBRAT-15: sbornik materialov odinnadcatoj mezhdunarodnoj nauch. prakt. konf. "Problemy transporta Dalnego Vostoka"*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2015: 155–157.
6. Os'kin, D. A., E. B. Osokina, E. A. Konstantinova, and A. A. Dyda. "Robust regulators synthesis based on stability degree of ship course control system." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 2 (2015): 106–109.
7. Osokina, E. B., A. A. Dyda, and D. A. Oskin. "Simple models based on adaptive identification of ship parameters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 24–31.
8. Shubladze, A. M., V. E. Popad'ko, A. A. Yakusheva, and S. I. Kuznecov. "PID controllers' stability degree optimization." *Large-scale Systems Control* 22 (2008):86–100.
9. Amerongen, J. Adaptive Steering of Ship: PhD thesis. Delft University of Technology, 2005.
10. Pushkarev, M. I., and S. A. Gajvoronskij. "Sintez robnostnogo reguljatora po kriteriju maksimalnoj stepeni ustojchivosti na osnove intervalnyh koeficientov harakteristicheskogo polinoma." *Reshetnikovskie chtenija* 2.15 (2011): 496–497.
11. Pushkarev, M. I., and S. A. Gajvoronskij. "Parametricheskij sintez robnostnogo reguljatora, obespechivajushhego kvazimaksimalnuju stepen ustojchivosti intervalnoj sistemy." *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radioelektroniki* 2-1(26) (2012): 162–165.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дыда Александр Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «МГУ имени
адмирала Г. И. Невельского»
adyda@mail.ru

Осокина Елена Борисовна — доцент.
ФГБОУ ВО «МГУ имени
адмирала Г. И. Невельского»
Olena1961@yandex.ru

Дыда Павел Александрович — аспирант.
Научный руководитель:

Оськин Дмитрий Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «МГУ имени
адмирала Г. И. Невельского»
p.dyda@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dyda Alexander Alexandrovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Maritime State University name
after admiral G. I. Nevelskoy
adyda@mail.ru

Osokina Elena Borisovna — associate professor.
Maritime State University name
after admiral G. I. Nevelskoy
Olena61@yandex.ru

Dyda Paul Alexandrovich — postgraduate.
Supervisor:

Oskin Dmitry Alexandrovich —
PhD, associate professor.
Maritime State University name
after admiral G. I. Nevelskoy
p.dyda@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2015 г.