

УДК 629.5.051.05

Е.Н. Поселенов, А.В. Преображенский

ОБЛАСТИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВТОРУЛЕВОГО С ПД-РЕГУЛЯТОРОМ

На математических моделях, управляемых на курсе судов, рассматриваются области параметров авторулевого с пропорционально-дифференциальным регулятором, в которых качество управления соответствует предъявляемым требованиям. Математические модели с не перекрывающимися областями работоспособности авторулевого, имитирующие существенные изменения характеристик речных судов под влиянием внешней среды, предлагаются в качестве тестовых для испытаний алгоритмов управления движением судна заданным курсом.

Ключевые слова: авторулевой, математические модели, ПД-регулятор, области управляемости.

Для лабораторных испытаний новых, более эффективных алгоритмов автоматического управления движением речного судна по заданной траектории, и совершенствования тренажеров судоводителя необходим набор математических моделей, отражающих разнообразие характеристик управляемости водоизмещающих судов в различных условиях движения. Значительное влияние внешней среды на управляемость судна подтверждается наблюдаемой в ряде случаев неработоспособностью авторулевого с пропорционально-дифференциальным (ПД) регулятором фиксированной настройки. Например, при выходе судна на мелкую воду амплитуда колебаний курса возрастает до недопустимых значений и приходится переходить на ручное управление. Изменение размеров и расположения области значений параметров ПД-регулятора: коэффициентов « K_p » и « K_d » при пропорциональной и дифференциальной составляющих управляющего воздействия, в которой обеспечивается удовлетворительное качество регулирования (области «работоспособности» регулятора, или «управляемости» объекта ПД-регулятором) можно рассматривать как признак существенного изменения характеристик управляемости объекта. Целью данной работы является поиск моделей управляемых на курсе судов, для которых области управляемости ПД-регулятором малы по размеру и взаимно не перекрываются. Такие модели, имитирующие экстремальные изменения динамики объекта с сохранением его управляемости, могут использоваться в качестве тестовых для оценки эффективности алгоритмов управления.

В работе исследуется вид областей управляемости ПД-регулятором модификаций базовой модели судна с различными значениями коэффициентов уравнений модели. Известен ряд моделей управляемых на курсе судов, отличающихся количеством нелинейностей в уравнениях и методикой расчета коэффициентов по конструктивным параметрам судна и рулевого устройства. При исследовании управляемости расчетных математических моделей, параметрической идентификации модели судна и сравнении натуральных осциллограмм скорости рысканья судна и его моделей, рассчитанных по разным методикам, преимуществ какого-либо одного типа моделей не было обнаружено [1, 2]. Подбором коэффициентов уравнений модели и введением постоянной поправки к углу перекладки руля для конкретного участка пути судна удавалось добиться весьма точного совпадения движений модели и объекта. Значения коэффициентов уравнений модели, подобранные для различных участков пути, изменялись в широких пределах, в отдельных случаях изменялся знак некоторых коэффициентов, так что значительную разницу параметров моделей объектов «судно» и «судно-среда» следует считать нормальным явлением. Степень совпадения движений модели и объекта была практически одинакова при использовании моделей разных типов. Поэтому при исследовании областей управляемости в качестве базовой модели объекта управления (ОУ) была использована наиболее простая модель Р.Я. Першица [3] с одной нелинейностью:

$$\frac{d\beta}{dt} = -q_2\beta - r_2\omega - s_2U - h|\beta|\beta, \quad \frac{d\omega}{dt} = -q_3\beta - r_3\omega - s_3U, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость судна в горизонтальной плоскости (скорость рысканья); β – угол дрейфа; U – угол перекладки руля; φ – курсовой угол; t – безразмерное время (его единица равна времени прохождения судном расстояния, равного длине корпуса судна).

При моделировании системы регулирования (рис. 1) предполагалось, что рулевой привод (РП) имеет зону нечувствительности $\pm 0,2^\circ$, руль перекачивается со скоростью $3^\circ/\text{с}$ в диапазоне $\pm 30^\circ$, характеристика датчика курса (ДК) имеет зону нечувствительности $\pm 0,2^\circ$, а характеристика датчика угловой скорости ω (ДУС) – зону нечувствительности $\pm 0,02^\circ/\text{с}$. Единица безразмерного времени принималась равной 15 с. Рассматривался процесс выхода на заданный курс при начальном отклонении от курса 3° . Авторулевой считался работоспособным, если амплитуда колебаний курса в установившемся режиме не превышала 1° .

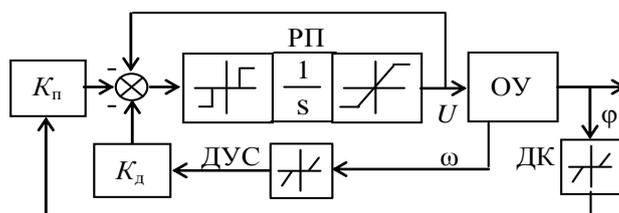


Рис. 1. Структурная схема модели авторулевого

Рассматривались модификации базовой модели с коэффициентами уравнений, указанными в безразмерных единицах (табл. 1), где U_k – критический угол перекладки руля, ограничивающий зону неоднозначности «диаграммы управляемости» – статической характеристики $\omega(U)$, ω_0 – установившееся значение ω при $U = 0$.

Таблица 1

	q_2	r_2	s_2	h	q_3	r_3	s_3	ω_0	U_k
Диапазон значений	0,16 1,5	-0,5 -0,75	-0,11 -0,27	1 5	-2,5 -13	3 7,2	-1,2 -3	0 1,2	0 0,43
Модель 1	0,22	-0,6	-0,11	1,07	-5,4	3,2	-1,2	1,2	0,43
Модель 2	0,22	-0,67	-0,13	1,7	-4,83	4,31	-1,87	0,34	0,1
Модель 3	0,476	-0,68	-0,12	2,27	-5,5	4,55	-1,26	0,2	0,04
Модель 4	-1	-0,32	-0,16	21,4	-1,9	1,25	-0,18	0,1	0,1
Модель 5	-3,84	0,095	-0,34	240	-0,75	0,09	-0,22	0,1	0,09
Модель 6	-0,66	0,435	-0,5	3,2	-2	1,5	-0,4	0,02	0
Модель 7	-0,66	0,435	-1	3,2	-2	1,5	-0,4	0,02	0

Параметры моделей 1...3 рассчитаны теоретически. Наиболее сложными в управлении считаются неустойчивые на прямом курсе суда с повышенным значением параметров ω_0 и U_k . Поэтому работоспособность ПД - регулятора проверялась, в первую очередь, на моделях с большим разбросом значений параметра ω_0 . Чтобы определить теоретически допустимый разброс значений ω_0 , был проведен расчет коэффициентов уравнений моделей виртуальных судов. Рассматривались модели, получаемые при всех возможных комбинациях следующих значений конструктивных параметров: $L/B = 6$ и 8 , $T/L = 0,03$ и $0,06$, $\delta = 0,55, 0,65, 0,75, 0,85$, $\sigma = 0,94, 0,96, 0,98$, $K_R = 0,05$ (всего 48 моделей), где L , B и T – длина, ширина и осадка судна, δ и σ – коэффициенты полноты корпуса и площади диаметрали, K_R – коэффициент эффективности руля. Диапазон значений коэффициентов уравнений модели, полученных в результате расчета, указан в первой строке табл. 1. Модель 1 представляет виртуальное судно с максимальным среди рассмотренных моделей значением параметра ω_0 , модель 2 соответствует судну типа «УИ Пятилетка», считающемуся достаточно сложным в управлении, модель 3 взята из справочника [3] как пример хорошо управляемой.

Область управляемости модели 2 показана на рис. 2, а. Она ограничена линиями 1 и 3. При малых значениях параметра K_n (значения $K_n < 2$ не рассматривались) амплитуда автоколебаний курса A_φ превышает 1° . Если значение K_n выходит за пределы области, ограниченной линией 1, угол перекладки руля достигает ограничения и колебания курса неограниченно возрастают. Примеры осциллограмм переходных процессов модели 2 при настройке параметров регулятора вблизи границ 3 и 1 области управляемости приведены на рис. 3, а, б.

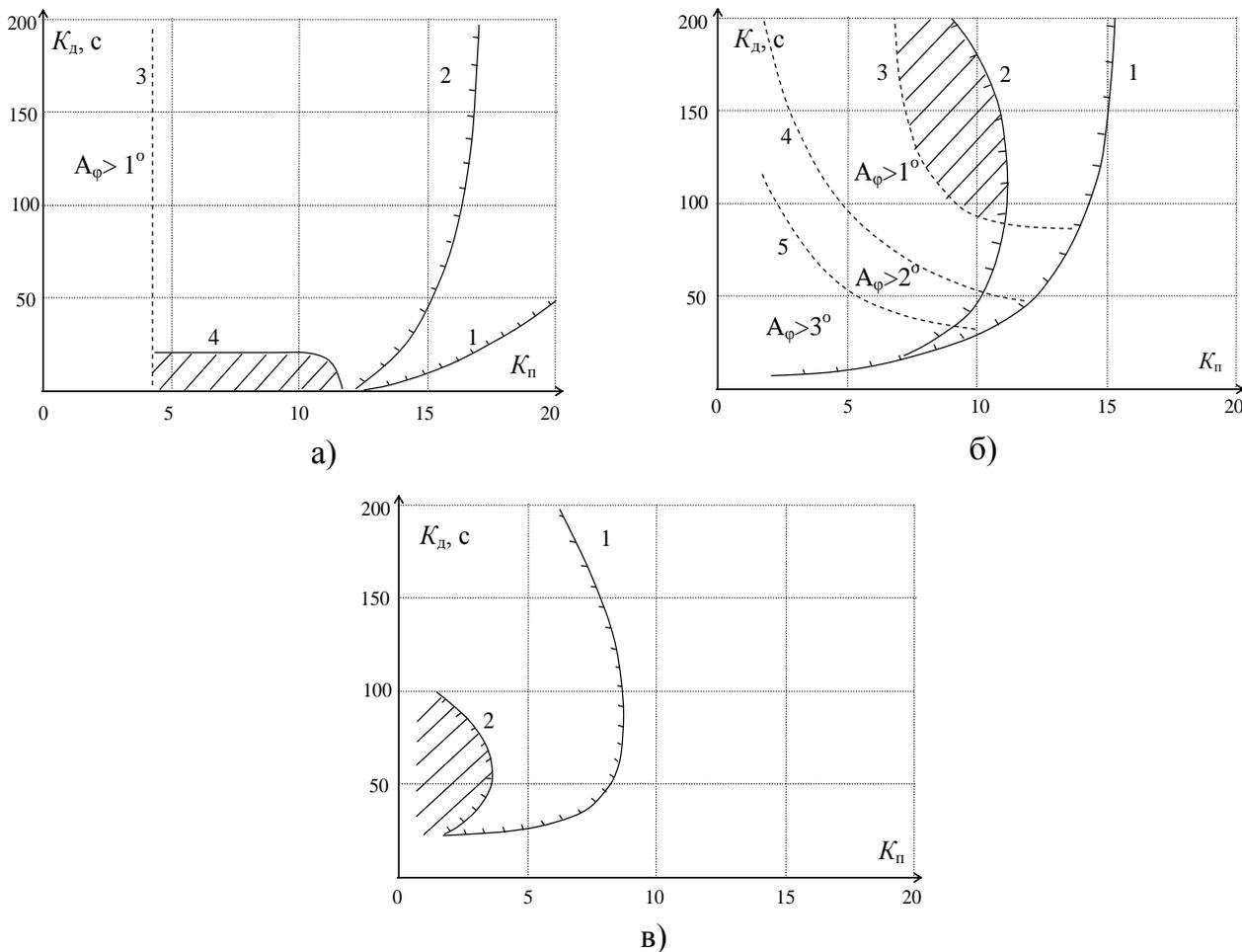


Рис. 2. Области управляемости (1–5) моделей 2, 4, 7

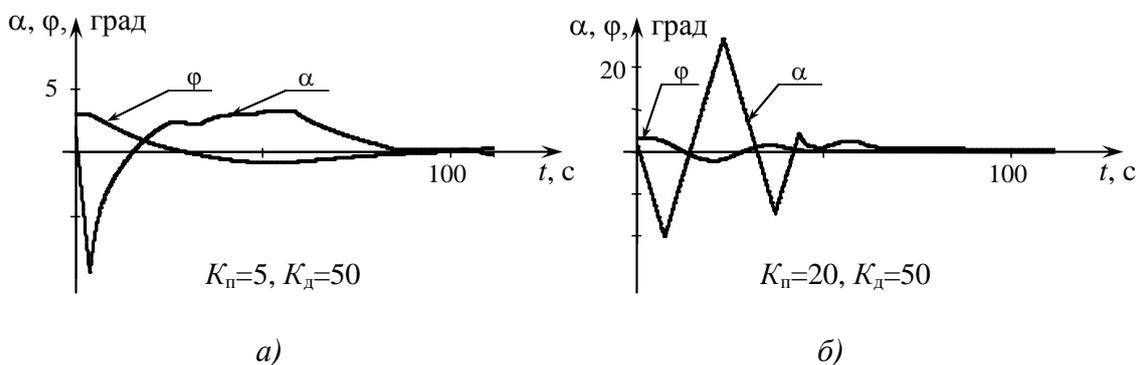


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов модели 2

Области управляемости моделей 1 и 3, несмотря на большую разницу значений параметров ω_0 и U_k , почти такие же, как у модели 2.

Модели 4–6 взяты из работы [4], где приведены результаты параметрической иденти-

фикации характеристик управляемости судна типа «Волгонефть» по натурным данным. У этих моделей диаграмма управляемости особенно сильно отличается по виду от диаграмм управляемости расчетных моделей (рис. 4), и, кроме того, наблюдается необычное соотношение коэффициентов s_3 и s_2 . Эти коэффициенты одного порядка, в то время как у расчетных моделей $s_2 \approx 0,1 s_3$. Увеличение коэффициента s_2 означает усиление влияния на угловую скорость ω , угла дрейфа по сравнению с управляющим воздействием, что может ухудшить управляемость.

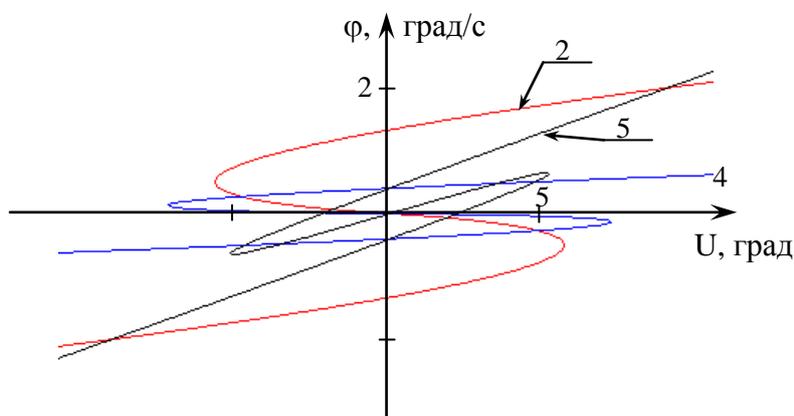


Рис. 4. Статические характеристики (2, 4, 5) моделей 2, 4, 5

У модели 4 область управляемости ограничена линиями 1 и 3 (рис. 2, б). Линии 4 и 5 – границы областей с различными амплитудами автоколебаний курса.

У моделей 5 и 6 верхняя по параметру K_n граница области управляемости проходит приблизительно так же, как линия 1 у модели 4.

Модель 7 – это модель 6 с увеличенным в два раза коэффициентом s_2 . Область управляемости модели 7, показанная на рис. 2, в, ограничена линией 1.

Для снижения частоты переключений руля, вызванных рысканьем судна по курсу вследствие случайных внешних возмущающих воздействий на корпус судна, в контур управления авторулевого устанавливают фильтр низкой частоты. Его полоса пропускания задается с учетом характеристик возмущающих воздействий. При введении в канал измерения угловой скорости ω фильтра Баттерворта пятого порядка с полосой пропускания 1 рад/с, границы управляемости моделей 2, 4 и 7 сместились из положения 1 в положение 2. В результате области управляемости моделей 4 и 7 (заштрихованы на рис. 2, б, в) значительно уменьшились. У модели 2 параметры автоколебаний курса в области управляемости практически не изменились, но переход к стационарному режиму стал происходить с колебаниями, усиливающимися при увеличении параметра K_n (рис. 5, а, б). Чтобы уменьшить эти колебания до приемлемой величины, параметры регулятора необходимо устанавливать в заштрихованной области, ограниченной линией 4 (рис. 2, а).

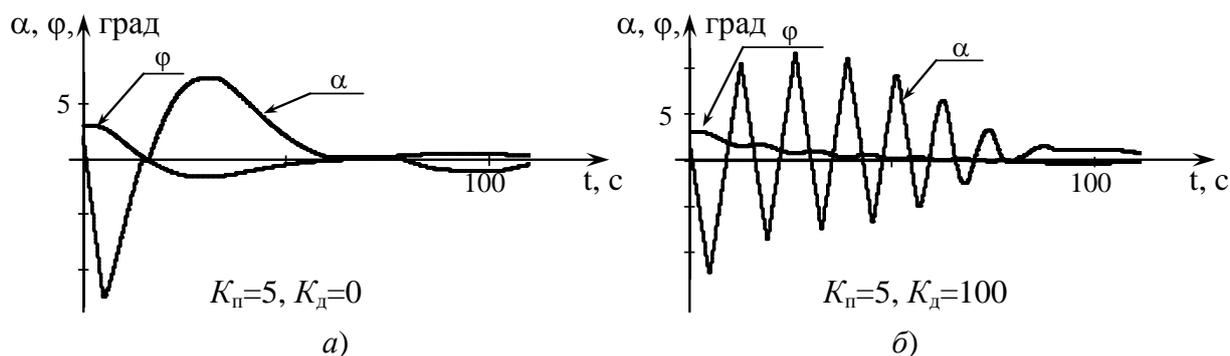


Рис. 5. Осциллограммы переходных процессов модели 2 с фильтром

Таким образом, модели 2, 4, 7 обладают взаимно не перекрывающимися областями управляемости ПД - регулятором. Эти модели имитируют существенные изменения динамики объекта, являющиеся причиной наблюдаемой на практике неработоспособности авторулевого с ПД - регулятором фиксированной настройки даже в спокойных по внешним признакам условиях движения. Модели 2, 4, 7 целесообразно использовать при разработке и испытаниях новых, интеллектуальных алгоритмов управления курсом судна, конкурирующих по качеству управления с опытным судоводителем.

Библиографический список

1. **Гурылев, М.В.** Оценка управляемости судов на математических моделях / М.В. Гурылев, А.В. Преображенский // Моделирование и оптимизация сложных систем: межвуз. серия / ВГАВТ. 2002. Вып. 1. С. 74–79.
2. **Гурылев, М.В.** Идентификация математических моделей управляемых на курсе речных судов / М.В. Гурылев, А.В. Преображенский // Моделирование и оптимизация сложных систем: межвуз. серия / ВГАВТ. Вып. 1. 2002. С. 113–119.
3. Справочник по теории корабля / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.
4. **Чиркова, М.М.** Чередование областей различных статико-динамических особенностей объекта с изменением его чувствительности к управляющему воздействию // Моделирование и оптимизация сложных систем: межвуз. сб. научн. тр. / ВГАВТ.– Н. Новгород. 1997. Вып. 273. Ч. 1. С. 188–208.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

E.N. Poselenov, A.V. Preobrazhensky

THE REGIONS OF CAPACITY FOR WORK OF AUTOMATIC PILOT WITH PD-REGULATOR

A controllability region of mathematical ship models on a plane of PD-regulator parameters is considerate. The mathematical models with non-covering regions that imitate the essential change of river ships controllability by environment influence are suggested for testing of steering algorithms.

Key words: autopilot, mathematical models, PD - regulator, controllability regions.