

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ РЕЧНОГО СУДНА В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Аноприенко А.Я., Демин М.А., Кривошеев С.В.

Кафедра ЭВМ ДонГТУ

kryvosh@cs.dgtu.donetsk.ua

Abstract

Anoprienko A., Kryvosheyev S. The research of inland ship course-keeping qualities in MATLAB/SIMULINK environment. The paper presents structure of mathematical models for simulation of rudder force. The approaches to calculate characteristics of ship rudder and motor are formulated and main simulation results are described.

Введение

Системы моделирования различных физических, химических и прочих процессов обеспечивают проведение всесторонних экспериментов. Проведение полномасштабных исследований возможно при наличии удобного интерфейса между пользователем и средой моделирования.

Одними из наиболее важных способов применения сред моделирования являются: включение их в состав программного обеспечения тренажеров, различных исследовательских комплексов, использование в контуре управления сложными объектами. Тренажеры применяются в различных отраслях промышленности (химической, транспортной и т.д.) для обучения персонала управлению различными объектами и наблюдением за технологическими процессами. Среда моделирования, включенная в контур управления, кроме решения задач, аналогичных задачам, решаемым в тренажерах, обеспечивает также автоматическое управление объектом. Если объект является подвижным, то решается задача автономного движения в заданной окружающей среде.

Одной из актуальных проблем в области автоматического управления является автоматизация судовождения. Одним из решений этой проблемы являются интегрированные навигационные системы (ИНС), в том числе и для судов внутреннего и смешанного плавания [1, 2].

Специфика условий плавания по внутренним водным путям предъявляет высокие требования к маневренным характеристикам судна. Судно практически постоянно (за исключением движения по крупным озерам и водохранилищам) совершает сложные маневры, которым свойственен неустойчивый характер при визуальном методе управления. Поэтому для обеспечения должного уровня безопасности судовождения под управлением ИНС необходимо применять математические модели управляемого движения судна. Применение математических моделей, которые адекватно, с высокой степенью точности, отражают процессы управления реальным судном в различных условиях плавания, имеет важное значение в судоводительских тренажерах для выработки у обучающихся высокого уровня профессиональной подготовки [3]. На эти математические модели накладывается также требование минимизации затрат машинного времени при расчете численными методами.

Для исследования объектов применяются различные средства моделирования, которые включают в себя математические пакеты, языки моделирования и т.п.

Наиболее удобными являются среды моделирования, которые обеспечивают интерактивный интерфейс с пользователем и обладают развитым языком моделирования. Кроме того, при использовании блочно-ориентированного подхода к моделированию, возможна декомпозиция исследуемого объекта на максимально компактные подсистемы, что существенно расширяет возможности по детализации модели и, соответственно, позволяет повысить степень адекватности моделирования. Одним из распространенных математических пакетов, который обладает указанными свойствами, является система MATLAB с интерактивной средой для исследования динамических систем Simulink.

1. Структура модели движительно-рулевого комплекса судна

Управляемость судна обеспечивают средства, именуемые движительно-рулевыми комплексами (ДРК). Любой тип ДРК при своей работе создает как полезный упор, обеспечивающий продольное перемещение судна, так и боковую силу, обеспечивающую управление судном. Наиболее полный учет всех факторов, влияющих на режимы работы ДРК при маневре, и следовательно, на поведение судна, обеспечивает в конечном счете высокий уровень безопасности плавания.

У ДРК, состоящих из обычных судовых рулей и гребных винтов (открытых или в насадках), суммарные продольная T_{Dl} и боковая Y_{Rl} силы [4] каждого комплекса выражаются формулами:

$$\left. \begin{aligned} T_{Dl} &= T_{Dl} - X_{Rl}; \\ Y_{Rl} &= Y_{Dl} - Y_{Sl}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где T_{Dl} – полезная тяга движителя, X_{Rl} , Y_{Dl} – продольная и боковая составляющие силы давления воды на перо руля, Y_{Sl} – стабилизирующая сила.

Основная часть полезной тяги T_{Dl} возникает на лопастях гребного винта и называется силой упора, или просто упором движителя T_p . Одна из составляющих силы T_{Dl} создается непосредственно на участках поверхности корпуса судна вблизи движителя и представляет собой равнодействующую ΔT_k дополнительных гидродинамических поверхностных сил, создаваемых на корпусе работающим движителем. Силу ΔT_k именуют также силой засасывания. Таким образом, в скалярной форме равенство может быть записано следующим образом:

$$T_{Dl} = T_p - \Delta T_k. \quad (2)$$

Отношение силы засасывания к упору движителя носит название коэффициента засасывания t_k :

$$t_k = \frac{\Delta T_k}{T_p}. \quad (3)$$

Тогда из формул (2) и (3) следует соотношение

$$T_{Dl} = T_p (1 - t_k). \quad (4)$$

Рассмотрим выражения для определения множителей правой части уравнения (4). Упор винта T_{Di} [5] вычисляется по формуле

$$T_{Di} = K_D \frac{\rho}{2} (v_e^2 + n_e^2 H_S D_S) D_S^2, \quad (5)$$

где v_e – скорость перемещения винта в свободной воде, K_D – коэффициент упора движителя (открытого гребного винта или комплекса винт – неподвижная насадка), ρ – плотность воды, n_e – частота вращения гребного винта, H_S – шаг винта, D_S – диаметр винта.

Коэффициент упора выражается в функции [5] от модифицированной поступи

$$\lambda_e = \frac{n H_S}{\sqrt{v_e^2 + (n H_S)^2}} \quad (6)$$

и находится по формулам:

для открытого гребного винта

$$K_D = 2.60(\lambda_e - 0.725); \quad (7)$$

для комплекса винт – неподвижная насадка

$$K_D = 3.60(\lambda_e - 0.790). \quad (8)$$

Скорость перемещения винта в свободной воде v_e рассчитывается по формуле

$$v_e = v(1 - c_f W_f), \quad (9)$$

где v – скорость движения судна; c_f – поправочный коэффициент для комплексов винт – неподвижная насадка, учитывающий изменение коэффициента попутного потока трения в месте расположения насадки (для винтов, расположенных – по бортам равен 0.6; – в диаметральной плоскости 0.7; для открытых гребных винтов равен 1); W_f – коэффициент попутного потока.

Для определения коэффициента попутного потока W_f и коэффициента засасывания t_k судов внутреннего плавания рекомендуют пользоваться следующими зависимостями [6]:

$$W_f = 0.11 + \frac{0.16}{x} \delta^x \sqrt{\frac{V}{D_S}}, \quad (10)$$

$$t_k = A_p W_f (1 + B_p W_f), \quad (11)$$

где δ – коэффициент полноты водоизмещения; V – объемное водоизмещение судна; x – коэффициент, характеризующий местоположение винтов ($x=1$ для винтов в диаметральной плоскости судна и $x=2$ – для бортовых винтов), A_p , B_p – поправочные

коэффициенты, характеризующие местоположение винтов ($A_p=0,60$ и $B_p=0,67$ для винтов в диаметральной плоскости судна; $A_p=0,80$ и $B_p=0,25$ – для бортовых винтов).

При анализе управляемости судна важно учитывать боковую составляющую силы давления воды на перо руля Y_{Dr} , которая, с учетом влияния корпуса и винта, определяется по формуле:

$$Y_{Dr} = \mu_r \frac{\rho}{2} A_r v_c^2 \alpha_r, \quad (12)$$

где μ_r – угловой коэффициент наклона кривой подъемной силы; A_r – площадь пера руля; α_r – площадь пера руля.

Значение μ_r может быть определено по формуле [6]

$$\mu_r = \frac{2\pi\lambda_r^3}{\lambda_r^3 + 2.2}, \quad (13)$$

где λ_r – относительное удлинение руля.

Значение λ_r определяется с помощью следующей зависимости:

$$\lambda_r = \frac{h_r^2}{A_r}, \quad (14)$$

где h_r – высота судового руля.

Продольная составляющая силы давления воды на перо руля X_{Rr} в гидродинамике определяют по формуле

$$X_{Rr} = c_{Xr} \frac{\rho}{2} A_r v_c^2 \approx (0,01 + 1,5\alpha_r^2) \frac{\rho}{2} A_r v_c^2, \quad (15)$$

Стабилизирующая сила вычисляется по следующей зависимости:

$$Y_s = \chi_s \beta_s \frac{\rho}{2} \pi \frac{D_s^2}{4} v_c^2, \quad (16)$$

где χ_s, β_s – коэффициенты, учитывающее спрямление потока воды.

2. Исследование динамики судна

Для моделирования динамики движения судна была использована интерактивная среда для имитации динамических систем MATLAB/SIMULINK [4, 8].

В качестве исходной модели использовалась модель, рассмотренная в [4]. Структура модели была дополнена блоками, обеспечивающими интерфейс с пользователем и возможность динамически изменять параметры угла перекадки руля и обороты вращения винта (рис. 1). Данная схема отражает основные элементы структуры математической модели судна. Кроме этого, были расширены библиотеки для расчета коэффициентов уравнений динамики судна и визуализации результатов

моделирования.

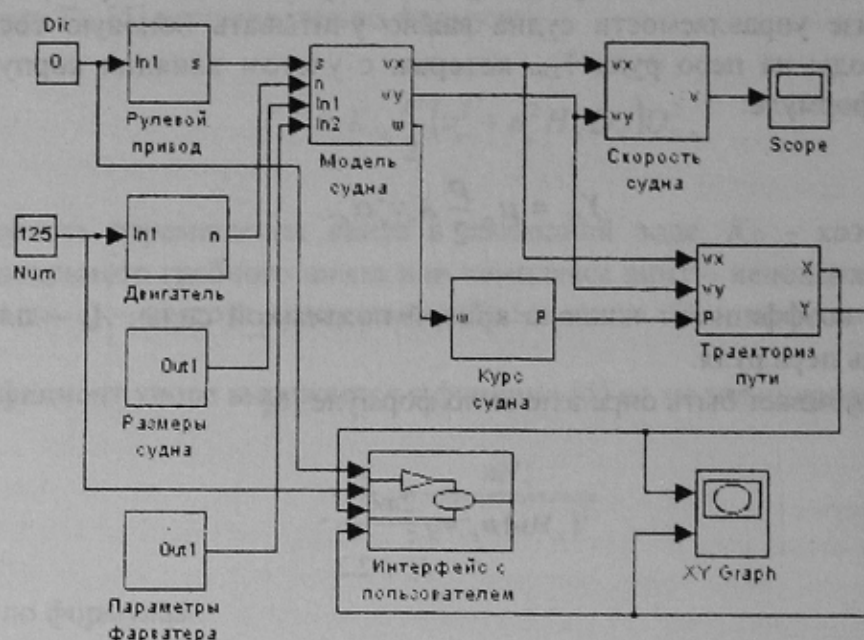


Рис. 1 – Укрупненная блок-схема модели для исследования динамики движения судна

Разработанная модель может быть использована для исследования параметров циркуляционного движения судна при различных углах перекадки пера руля. Изменение параметров руля и двигателя производилось с помощью интерфейса, вид которого представлен на рис. 2.

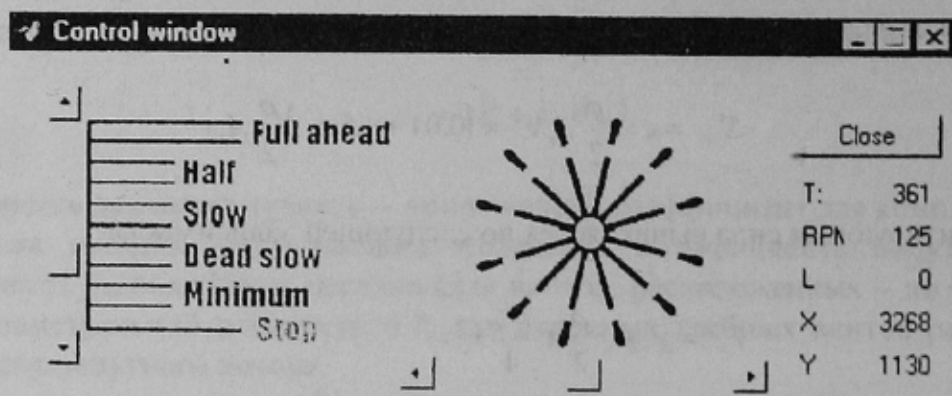


Рис. 2 – Интерфейс пользователя модели

Приведенная математическая модель является частью модели, используемой для планирования траектории движения судна и управления движением судна по ней [4, 7].

Для исследования зависимости параметров циркуляционного движения от угла перекадки руля, водоизмещения и режимов работы двигателя были проведены модельные эксперименты. При этом в качестве прототипа для идентификации модели были взяты суда смешанного плавания серии «Славутич», проектов №1557 и №1588.

Исследования модели проводились для судов в следующих конфигурациях: в балласте и в грузу. Значения водоизмещения, осадки, максимального числа оборотов винта для исследуемых судов приведены в табл.1. Работа двигателя имитировалась в

следующих режимах: передний полный ход, передний полный маневренный ход, передний средний ход, передний малый ход.

Таблица 1. Характеристики исследуемых судов

Тип судна	Водоизмещение, т	Осадка, м	Скорость, м/с	Количество оборотов винта, об/мин
«Славутич» в балласте	3029	2,30	5,25	410
«Славутич» в грузу	3044	2,45	4,89	
№1557 в балласте	3135	3,35	4,63	330
№1557 в грузу	4406	3,67	4,22	
№1588 в балласте	5485	4,95	5,14	252
№1588 в грузу	8140	5,50	4,63	

В табл.2 приведены параметры циркуляции для исследуемых судов, полученных в результате натурных и модельных экспериментов, для угла перекадки пера 35 градусов на правый борт.

На рис. 2 представлены график циркуляционного движения судна серии «Славутич», полученный в результате моделирования (угол перекадки равен 35 градусов на правый борт, судно в балласте).

Таблица 2. Параметры циркуляции исследуемых судов

Тип судна	Диаметр циркуляции (реальный/модельный), м	Период циркуляции (реальный/ модельный), с
«Славутич» в балласте в грузу	153,7/162,4	270/259
	129,6/135,2	238/223
№1557 в балласте в грузу	210/226,6	290/305
	170/186,1	190/208
№1588 в грузу	370,4/392,5	274/292

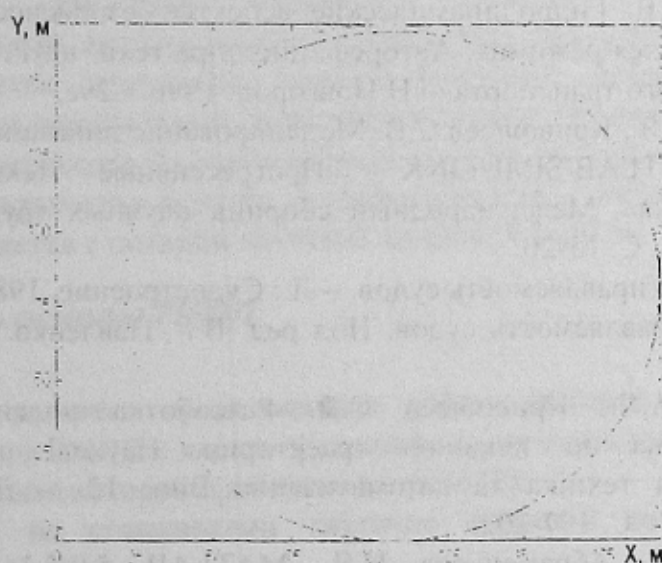


Рис. 2 – График циркуляционного движения судна типа «Славутич»

Таким образом, использование разработанной модели позволяет получить результаты, отличающиеся не более чем на 6,5 % от данных, полученных по итогам ходовых испытаний, что свидетельствует о достаточной адекватности моделирования управляемости речных судов.

Заклучение

Разработанная система позволяет провести всестороннее исследование динамики движения судна, допуская возможность гибкого изменения параметров моделирования динамического объекта. Результаты решения системы дифференциальных уравнений, которые составляют математическую модель динамики судна, позволяют планировать траекторию движения управляемого объекта.

Возможно дальнейшее уточнение моделей за счет снижения погрешности между модельными и натурными данными путем учета нелинейного характера динамики судна и его элементов (движительно-рулевого комплекса, гидрометеорологических условий и пр.).

Рассмотренная математическая модель и ее реализация являются элементом среды моделирования интегрированной навигационной системы судов внутреннего и смешанного плавания, разрабатываемой в рамках договора о научном сотрудничестве с Институтом системной динамики и управления (ISR) Штуттгартского университета (Германия).

Литература

1. Кривошеев С.В. Модель динамики речного судна и ее реализация в среде SIMULINK. Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія "Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем". Вип. 10: - Донецьк: ДонДТУ. - С.177-182.
2. R. Zimmermann, T. Gern, E.D. Gilles: Advanced River Navigation with Inland ECDIS. First European Inland Waterway Navigation Conference, Balatonfüred, Hungary, 1999. WWW: http://balu.isr.uni-stuttgart.de/eiwn_paper.pdf
3. Палагушкин Б.В. Гидродинамические аспекты безопасности движения судов на неустановившихся режимах. Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.22.16/ Волжская гос. академия водного транспорта. - Н.Новгород. 1996. - 29с.
4. Аноприенко А.Я., Кривошеев С.В. Моделирование динамики речного судна на базе системы MATLAB/SIMULINK. «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Международный сборник научных трудов. Вып. 9 - Донецк: ДонГТУ, 2000. - С. 13-20
5. Васильев А.В. Управляемость судов. - Л.: Судостроение, 1989. - 328 с.
6. Ходкость и управляемость судов. Под ред. В.Г. Павленко. М.: Транспорт. 1991. - 396 с.
7. Аноприенко А.Я., Кривошеев С.В. Разработка подсистемы моделирования движения судна по заданной траектории. Наукові праці ДонДТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Вип. 12. - Донецьк. ДонДТУ. ТОВ "Лебідь", 1999. - С. 197-202.
8. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MATLAB 5.0/5.3. Система символьной математики. М.: Нолидж. 1999. - 640 с.