

## СЕКЦИЯ: КОМПЬЮТЕРНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.01

### МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОГО СУДНА

© А.А. Андреев, Ю.О. Шклярова

Ключевые слова: математическое моделирование, компьютерное моделирование, движение управляемого судна, циркуляция корабля.

В работе рассмотрена математическая модель движения управляемого судна, разработана программа, реализующая полученную модель, и исследовано влияние значений угла перекладки руля, скорости и угла ветра, а также случайно заданных углов рысканья на изменение характеристик движения корабля: циркуляции корабля, угла дрейфа, угловой скорости корабля, угла курса корабля.

#### ВВЕДЕНИЕ

Современное океанское судно – один из самых сложных технических объектов, когда-либо созданных человеком. Сложность его устройства объясняется, прежде всего, тем широким кругом задач, которые судно призвано решать, условиями, в которых оно выполняет свое предназначение. Судно преодолевает сопротивление одной из самых грозных стихий – океана, вот почему управление им – серьезное и ответственное дело [2, с. 9]. Задача управления кораблем достаточно сложна, даже если представить его как точку, движущуюся в заданном направлении с определенной скоростью. А если посмотреть на корабль поближе, то эта «точка» имеет массу в десятки тысяч тонн, у нее тысячи механизмов и деталей, сотни километров кабелей и многое другое. В этом случае задача управления из очень сложной превратится в глобальную [3, с. 36].

Модель нужна для того, чтобы глубоко и всесторонне изучить моделируемый объект – корабль, но не сам по себе, как конструкцию, устройство, а как динамическую систему, определенным образом взаимодействующую с внешней средой – морем, океаном. Если хорошо узнать поведение корабля в различных ситуациях, то это знание можно изложить на машинном языке в виде программы [3, с. 51].

Именно вопросам, связанным с моделированием движения управляемого судна, и посвящена данная работа.

#### ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Движение корабля по криволинейной траектории характеризуется (рис.1):

- а) углом дрейфа  $\beta_0$ , т.е. углом между диаметральной плоскостью корабля и мгновенным направлением линейной скорости центра тяжести;
- б) линейной скоростью центра тяжести корабля  $v$ ;
- в) угловой скоростью вращения корабля  $\omega$ ;
- д) углом курса  $\psi$ , т.е. углом между диаметральной плоскостью корабля и неподвижной осью  $x_1$  (как правило, ось  $x_1$  выбирается с таким расчетом, чтобы она

совпадала с диаметральной плоскостью корабля в начальный момент маневренного периода);

е) углом скорости  $\varphi$ , т.е. углом между осью  $x_1$  и направлением линейной скорости центра тяжести корабля  $v$ ;

ф) координатами центра тяжести корабля  $x_1$  и  $y_1$ ;

г) радиусом кривизны траектории центра тяжести корабля  $R$ .

Кинематическая связь между указанными величинами устанавливается следующими зависимостями:

$$\omega = \frac{d\psi}{dt} = \frac{v}{R} + \frac{d\beta_0}{dt};$$

$$\varphi = \psi - \beta_0;$$

$$\frac{dx_1'}{dt} = v \cos \varphi;$$

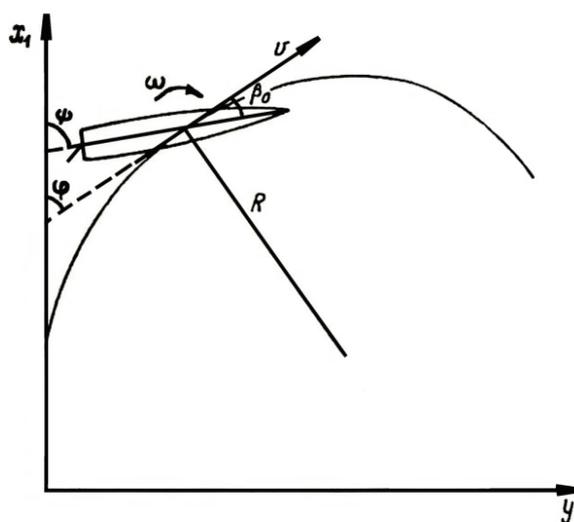


Рис. 1. Движение корабля по криволинейной траектории [1, с. 532]

$$\frac{dy_1'}{dt} = v \sin \varphi \quad [1, \text{с. 532-533}].$$

Для решения задачи о движении корабля в горизонтальной плоскости необходимо знать силы и моменты, действующие на корпус корабля и руль. Эти силы и моменты зависят от элементов движения корабля, а именно: линейных и угловых ускорений, угла дрейфа, линейной и угловой скорости и подразделяются на силы и моменты инерционной и неинерционной природы [1, с. 541].

В работе рассмотрена модель движения корабля, основанная на следующих допущениях:

1) вертикальные перемещения корабля в процессе движения считаются пренебрежимо малыми; движение корабля полагается происходящим в плоскости ватерлинии;

2) считается, что наклонения корабля в плоскости шпангоута малы и не оказывают влияния на величину гидродинамических сил;

3) при вычислении инерционных сил, действующих на корабль, считается, что корабль симметричен не только относительно диаметральной плоскости, но и плоскости мидель-шпангоута, и что центр тяжести корабля располагается в плоскости мидель-шпангоута;

4) влияние изменения посадки корабля в процессе совершения маневра так же как и влияние изменения числа Фруда не учитываются;

5) при определении действующих на корабль гидродинамических сил и моментов неинерционной природы предполагается, что при неустановившемся движении в каждый момент времени они равны силам и моментам, действующим на корабль, совершающий стационарное движение с теми же основными элементами [1, с. 560];

6) определение неинерционных гидродинамических сил и моментов, действующих на корпус корабля, основано на модельных экспериментах, то есть мы имеем физическое моделирование реального объекта с использованием макетов, и только уже на основании этого физического моделирования осуществляется математическое моделирование, при этом эффект масштаба может являться дополнительным источником модельных погрешностей;

7) на промежутке  $dt$  скорость хода корабля считается постоянной;

8) не учитываются проекции упора винтов на оси координат;

9) предполагается, что руль корабля переключается мгновенно (время переключки рулей реальных кораблей, как правило, не превышает 8–15 секунд [1, с. 569]).

Уравнения движения корабля, описывающие изменение характеристик движения во времени, следующие:

$$\begin{cases} \rho V(1+k_{22})v \frac{d\beta_0}{dt} \cos \beta_0 - \rho V(1+k_{11})v \cos \beta_0 \omega + \\ + (c_1 \beta_0 + c_2 \beta_0^2) \frac{\rho}{2} v^2 S_d - \mu \left[ \alpha_p - \chi_{II} (\beta_0 + \frac{dL}{v} \omega) \right] \frac{\rho}{2} v^2 \varphi_1^2 S_{II} = 0, \\ - I(1+k_{66}) \frac{d\omega}{dt} + q_{II} \frac{\rho}{2} v^2 S_d L \beta_0 - q_d \frac{\rho}{2} v S_d L^2 \omega + \\ + \mu l \left[ \alpha_p - \chi_{II} (\beta_0 + \frac{dL}{v} \omega) \right] \frac{\rho}{2} v^2 \varphi_1^2 S_{II} = 0, \\ \frac{d\psi}{dt} = \omega, \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} - \frac{d\beta_0}{dt}, \\ R = \frac{v}{(\omega - \frac{d\beta_0}{dt})}, \\ v = \frac{v_0 * (R/L)^2}{((R/L)^2 + 1,9)}, \\ \frac{dx_1'}{dt} = v \cos \varphi, \\ \frac{dy_1'}{dt} = v \sin \varphi. \end{cases}$$

для которых начальные условия имеют вид

$$\beta_0|_{t=0} = \omega|_{t=0} = \psi|_{t=0} = \varphi|_{t=0} = x|_{t=0} = y|_{t=0} = 0,$$

$$v|_{t=0} = v_0.$$

В отличие от модели Я.И. Войткунского [1], в данных уравнениях частично учитывается изменение скорости путем расчета ее значения на каждом шаге по истечении промежутка времени  $dt$ , а также исключается допущение, что угол дрейфа не превосходит 10–15 градусов и  $\cos \beta_0 = 1$ .

Исходные данные расчетов

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Как определяется	Значение
Объемное водоизмещение корабля	$V$	$\text{м}^3$	задано	4440
Длина корабля по ватерлинии	$L$	$\text{м}$	задано	99
Ширина корабля по ватерлинии	$B$	$\text{м}$	задано	15,7
Средняя осадка корабля	$T$	$\text{м}$	задано	5,1
Коэффициент полноты мидель-шпангоута	$\beta$		задано	0,955
Отстояние оси баллера руля от миделя	$l$	$\text{м}$	задано	46,5
Начальная скорость хода судна	$v_0$	$\text{м/с}$	задано	8
Момент инерции массы корабля	$I$	$\text{т}^*\text{м}^*\text{с}^2$	$I = 0,06\rho VL$	221900
Коэффициент присоединенной массы	$k_{11}$		по графику [1, с. 66, рис. 17]	0,46
Коэффициент присоединенной массы	$k_{22}$		по графику [1, с. 67, рис. 17]	0,61
Коэффициент присоединенного момента инерции	$k_{66}$		по графику [1, с. 69, рис. 18]	0,54
Угловой коэффициент подъемной силы руля	$\mu$		согласно расчетам в работе [1]	1,85
Относительное отстояние руля от миделя	$\varepsilon$		$\varepsilon = \frac{l}{L}$	0,47
Приведенный коэффициент полноты диаметральной плоскости	$\sigma_d$		согласно расчетам в работе [1]	0,953
Коэффициент нормальной силы	$c_1$		при помощи номограммы [1, с. 552, рис. 21]	0,10
Коэффициент нормальной силы	$c_2$		при помощи номограммы [1, с. 553, рис. 22]	1,6
Коэффициент позиционного момента	$q_{II}$		при помощи номограммы [1, с. 554, рис. 23]	0,81
Коэффициент демпфирующего момента	$q_d$		при помощи графику [1, с. 555, рис. 24]	0,637
Коэффициент влияния корпуса	$\varphi_1$		согласно расчетам в работе [1]	0,9
Приведенная площадь руля	$S_{II}$	$\text{м}^2$	согласно расчетам в работе [1]	10
Приведенный коэффициент влияния корпуса	$\chi_{II}$		согласно расчетам в работе [1]	0,3
Приведенная площадь диаметральной плоскости корабля	$S_d$	$\text{м}^2$	$S = LT\sigma_d$	481

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Описанная модель движения управляемого корабля была реализована в среде *Turbo Delphi*. Для решения полученной системы дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

В таблице 1 приведены исходные данные, использованные для расчетов по модели, основанные на формулах и заданных значениях работы [1].

В ходе вычислительного эксперимента было проведено исследование изменения характеристик движения корабля в следующих случаях:

- 1) при различных углах перекладки руля,
- 2) при случайно заданных углах рысканья,
- 3) при различных значениях скорости ветра,
- 4) при различных значениях угла ветра.

**1. Исследование изменения характеристик движения корабля при различных углах перекладки руля.** Графики изменения характеристик движения корабля в случае изменения угла перекладки руля от 10 до 80 градусов с шагом равным 10 градусов приведены ниже. На графиках угол перекладки руля  $\alpha_p$  обозначен как  $u$ .

Анализ результатов вычислений показывает, что чем больше угол перекладки руля, тем больше отклонение от заданного курса – угол курса и циркуляция корабля (рис. 2), но тем быстрее корабль выходит на

установившуюся циркуляцию (рис. 2) – элементы движения (изменение угловой скорости, угол дрейфа) принимают установившийся характер (рис. 3).

**2. Исследование изменения характеристик движения корабля при случайно заданных углах рысканья.** Рассмотрим движение корабля на волнении. Возмущения, обусловленные волной, вызывают рысканье корабля, т.е. отклонение диаметральной плоскости корабля от первоначального направления движения (курса), не вызванное перекладкой руля.

Рысканье корабля на волнении характеризуется углом рысканья. Угол рысканья отличается от угла дрейфа корабля, так как при рыскании происходит периодическое смещение центра тяжести корабля в направлении, поперечном по отношению к курсу. Обработка записей рысканья кораблей на волнении показывает, что между углом рысканья и углом дрейфа в каждый момент времени существует приближенное соотношение:  $\beta_0 = r\gamma_p$ , где  $\gamma_p$  – угол рысканья,  $r$  – коэффициент, среднее значение которого равно 0,6 [1, с. 615].

Ниже приведены графики изменения характеристик движения корабля в случае задания угла рысканья случайным образом в диапазоне от –10 до 10 градусов. Угол рысканья изменяется каждые 60 секунд, а угол перекладки руля принимается равным округленному значению возникающего при этом угла дрейфа.

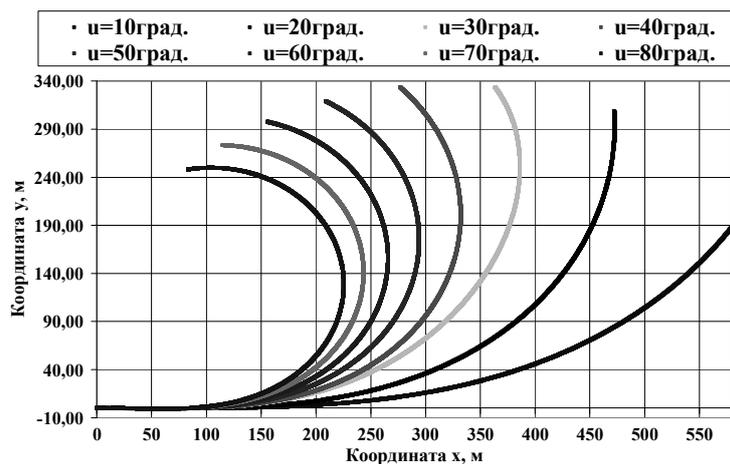


Рис. 2. Циркуляция корабля при различных углах перекадки руля

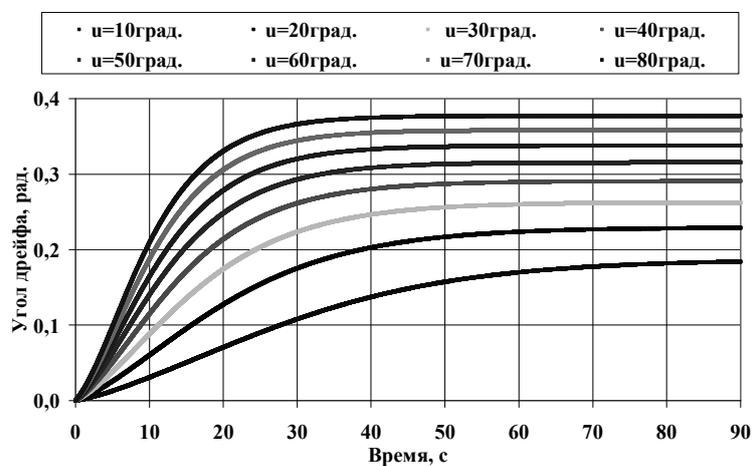


Рис. 3. Изменение угла дрейфа с течением времени при различных углах перекадки руля

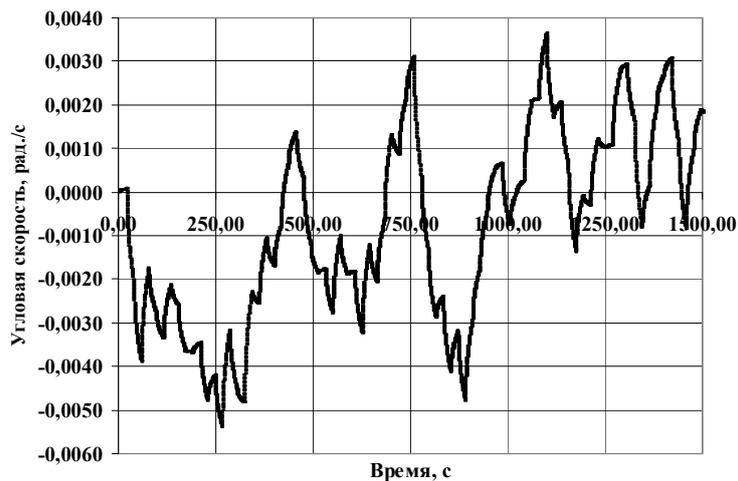


Рис. 4. Изменение угловой скорости с течением времени при случайно заданных углах рысканья

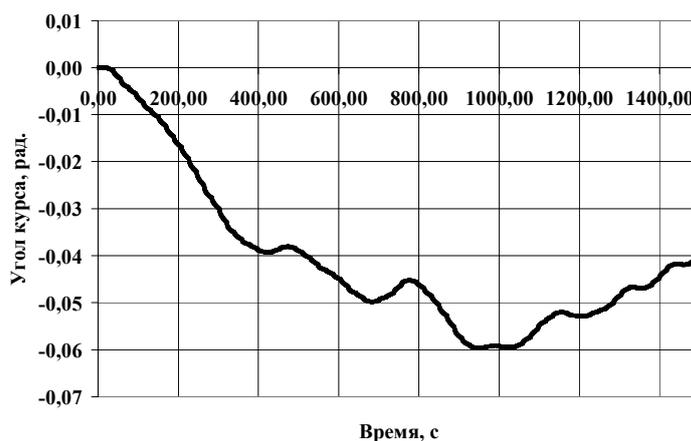


Рис. 5. Изменение угла курса с течением времени при случайно заданных углах рысканья

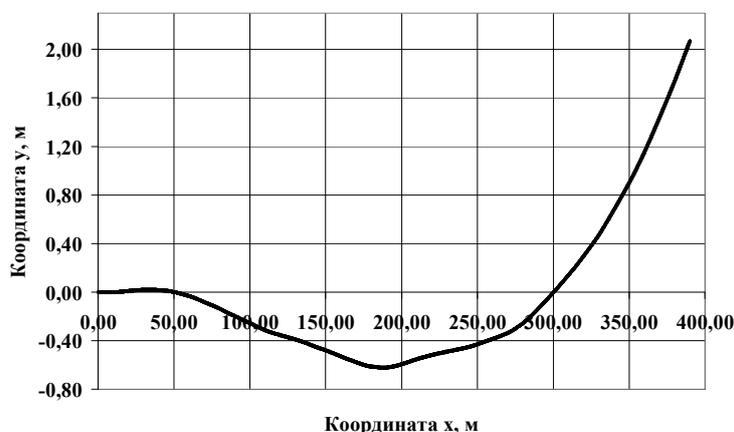


Рис. 6. Циркуляция корабля при случайно заданных углах рысканья

Анализ результатов вычислений показывает, что при движении в условиях реального морского волнения на корабль в горизонтальной плоскости периодически действуют силы и моменты, которые являются причиной отклонения диаметральной плоскости корабля от первоначального направления движения. Поскольку морское волнение, как правило, носит нерегулярный и случайный характер, возмущения элементов движения корабля, обусловленные волнением, так же являются случайными.

**3. Исследование изменения характеристик движения корабля при различных значениях скорости ветра.** Рассмотрим движение корабля при действии ветра. При решении задачи о влиянии ветра на движение корабля необходимо отличать истинный ветер от относительного (кажущегося). Под истинным понимается ветер в координатах связанных с землей, в то время как кажущийся ветер берется в координатах, связанных с кораблем.

Между скоростями и направлениями истинного и кажущегося ветра существуют следующие соотношения:

$$v_u^2 = v_k^2 + v_0^2 - 2v_k v_0 \cos(\gamma_k + \beta_0),$$

$$\gamma_u = \gamma_k + \beta_0 + \arccos \frac{v_u^2 + v_k^2 - v_0^2}{2v_u v_k}.$$

Здесь  $v_u$  — скорость истинного ветра;  $v_k$  — скорость кажущегося ветра,  $v_0$  — скорость хода корабля,  $\beta_0$  — угол дрейфа корабля,  $\gamma_k$  — угол кажущегося ветра, отсчитываемый от диаметральной плоскости корабля,  $\gamma_u$  — угол истинного ветра, отсчитываемый от направления движения.

Ниже приведены графики изменения характеристик движения корабля в случае изменения скорости истинного ветра от 1 до 8 м/с с шагом равным 1 м/с, что согласно шкале Бофорта соответствует изменению погоды от «штиля» до «свежего ветра». Угол истинного ветра принят равным 10 градусам. Угол перекадки руля считается равным округленному значению угла дрейфа, возникающего в момент действия ветра. На графиках скорость истинного ветра обозначена как  $v$ .

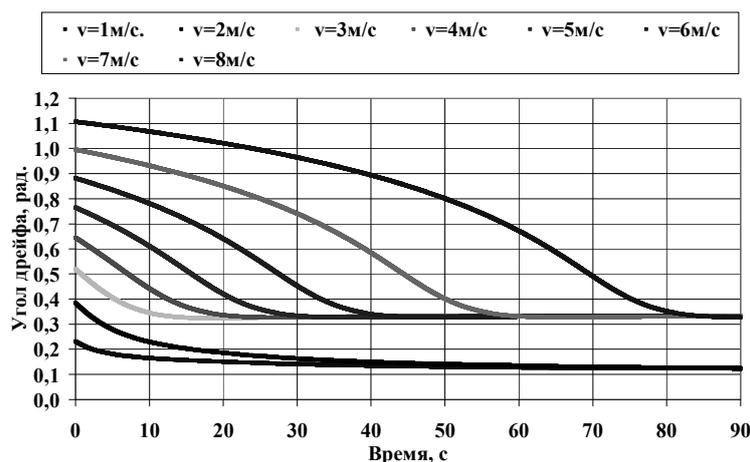


Рис. 7. Изменение угла дрейфа с течением времени при различных значениях скорости ветра

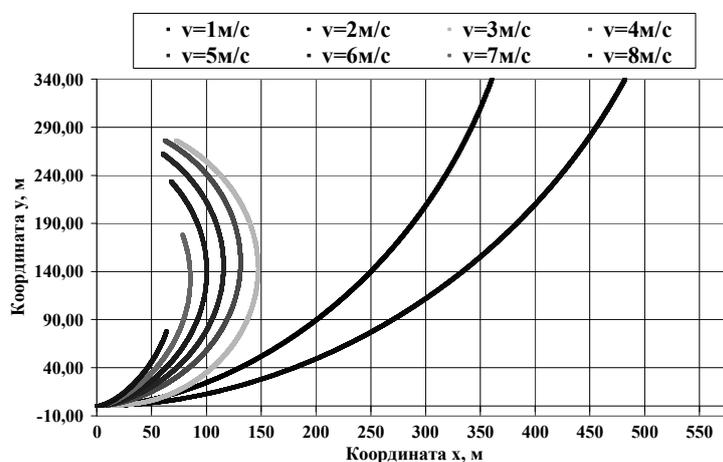


Рис. 8. Циркуляция корабля при различных значениях скорости ветра

Анализ результатов вычислений показывает, что при действии ветра наблюдаются следующие изменения характеристик движения корабля:

- 1) угловая скорость сначала постепенно возрастает, а затем принимает установившийся характер;
- 2) угол дрейфа первоначально резко возрастает, затем постепенно уменьшается и выходит на установившееся значение (рис. 7);
- 3) угол курса постепенно увеличивается;
- 4) корабль постепенно выходит на установившуюся циркуляцию (рис. 8).

Чем больше скорость ветра, тем значительнее изменения всех характеристик.

#### 4. Исследование изменения характеристик движения корабля при различных значениях угла ветра.

Ниже приведены графики изменения характеристик движения корабля в случае изменения угла истинного ветра от 10 до 80 градусов с шагом равным 10 градусов. Значение скорости истинного ветра принято равным 1 м/с. Угол перекладки руля принимается равным округленному значению угла дрейфа, возникающего в момент действия ветра. На графиках угол истинного ветра обозначен как  $\alpha$ .

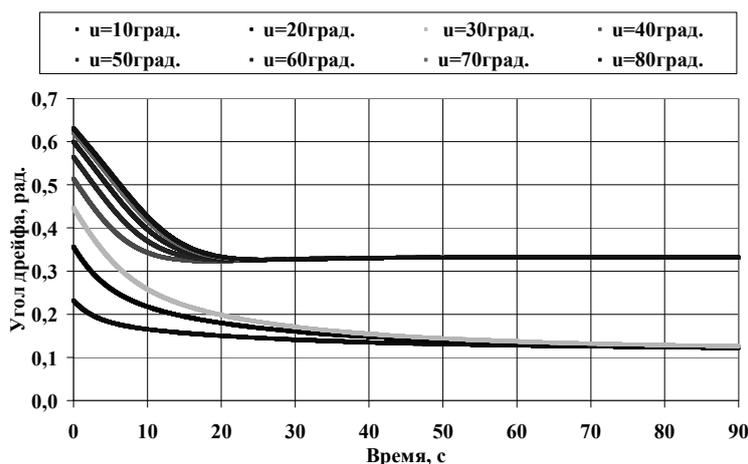


Рис. 9. Изменение угла дрейфа с течением времени при различных значениях угла ветра

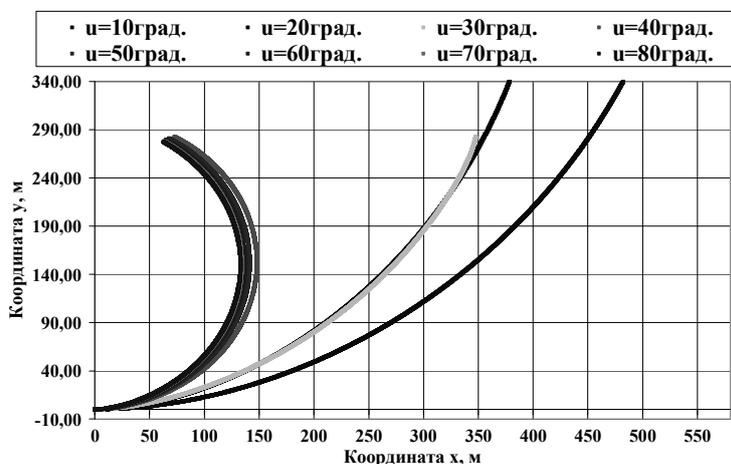


Рис. 10. Циркуляция корабля при различных значениях угла ветра

Анализ полученных результатов показывает, что при действии ветра на корабль под разными углами наблюдаются следующие изменения характеристик движения корабля:

- 1) угловая скорость сначала постепенно возрастает, а затем принимает установившийся характер;
- 2) угол дрейфа сначала резко возрастает, затем постепенно уменьшается и выходит на установившееся значение (рис. 9);
- 3) угол курса постепенно увеличивается;
- 4) корабль постепенно выходит на установившуюся циркуляцию (рис. 10).

Чем больше угол ветра, тем значительнее изменения всех характеристик. Следует также отметить, что для некоторых близких углов наблюдаются близкие установившиеся значения характеристик движения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе видоизменена математическая модель движения управляемого судна, предложенная Я.И. Войткунским [1], а именно не использованы допущения о малом значении угла перекладки руля и постоянстве скорости движения. Разработана программа в среде *Turbo Delphi*, реализующая полученную модель, и проведен ряд вычислительных

экспериментов. Исследовано влияние значений угла перекладки руля, скорости и угла ветра, а также случайно заданных углов рысканья на изменение характеристик движения корабля: циркуляции корабля, угла дрейфа, угловой скорости корабля, угла курса корабля.

Следует отметить, что преимуществами метода компьютерного моделирования в случае применения его для моделирования движения судна являются:

- 1) рассмотрение всего судна в целом с отслеживанием взаимного влияния его структурных систем друг на друга,
- 2) моделирование динамики судна в заданных условиях внешних возмущений,
- 3) возможность полноценной замены дорогостоящих испытаний на подробную компьютерную модель с низкой себестоимостью и высокой производительностью,
- 4) возможность моделирования таких условий движения, которые принципиально невозможно смоделировать в обычных условиях (например, аварийные ситуации),
- 5) возможность быстрого изменения любых технических, физических и геометрических параметров модели (алгоритма управления и т. п.) и моментального отслеживания влияния этих изменений на динамику движения судна,

б) повышение уровня оптимизации конструктивных элементов судна и многое другое.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А.* Справочник по теории корабля. Ходкость и управляемость. Л.: Судпромгиз, 1960. 688 с.
2. *Кринецкий И.И.* Автоматы несут вахту. Л.: Судостроение, 1985. 120 с.
3. *Ляликов А.П., Саруханов В.А.* Корабли, автоматы, роботы. Л.: Судостроение, 1985. 104 с.

Поступила в редакцию 12 ноября 2008 г.

УДК 519.95

## ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

© А.А. Демина, А.А. Арзамасцев

Ключевые слова: генетический алгоритм, задачи оптимизации, моделирование.

Представлены определение генетического алгоритма, области применения, общая схема алгоритма, его преимущества и недостатки.

Генетический алгоритм – это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем последовательного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

Генетические алгоритмы могут быть использованы для решения ряда задач. Это:

- Оптимизация функций.
- Оптимизация запросов в базах данных.
- Разнообразные задачи на графах (задача коммивояжера, раскраска, нахождение паросочетаний).
- Настройка и обучение искусственной нейронной сети.
- Задачи компоновки.
- Составление расписаний.
- Игровые стратегии.
- Аппроксимация функций.
- Искусственная жизнь.
- Биоинформатика (свертывание белков).

Общая схема алгоритма:

1. Создание начальной популяции.
2. Вычисление функций приспособленности для особой популяции (оценивание).
3. Выбор индивидов из текущей популяции (селекция).

Andreyev A.A., Shklyarova Y.O. Dynamics model of an operated vessel. The mathematical model of movement of an operated vessel is investigated. The programme is developed to represent the received model. The authors investigated the influence of values of rudder angle, speed and wind angle, and casually ordered yaw angles on change of characteristics of movement of the ship: circulation of a ship, drift angle, angular rate of a ship, heading angle of a ship.

Key words: mathematical modelling, computer modelling, movement of an operated vessel, ship circulation.

4. Скрещивание и мутация.
5. Вычисление функций приспособленности для всех особей.
6. Формирование нового поколения.
7. Если не выполняются условия остановки, то перейти к пункту 3.

Критерием остановки может служить заданное количество поколений или схождение популяции. Схождение популяции означает, что достигнуто решение близкое к оптимальному.

Генетические алгоритмы обладают рядом преимуществ:

- 1) не требуют информации о дифференцируемости и непрерывности функции;
- 2) стойки к попаданию в локальные оптимумы;
- 3) могут быть использованы в задачах с изменяющейся средой.

В то же время существует ряд трудностей в практическом использовании генетических алгоритмов (например, изолированные функции, дополнительный шум). На данный момент ведутся поиски генетических стратегий, способных устранить эти недостатки.

Поступила в редакцию 12 ноября 2008 г.

Arzamastsev A.A., Demina A.A. Genetic algorithms. The definition of genetic algorithm, application spheres, general scheme of the algorithm, its advantages and disadvantages

Key words: genetic algorithm, optimization tasks, modelling.