

УДК 519.7: 629.5.03

И.В. ХУДЯКОВ

Херсонская государственная морская академия

А.В. РУДАКОВА

Херсонский национальный технический университет

Н.К. КЛЕВЦОВ

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ДИНАМИКИ СУДНА В ХОДОВЫХ РЕЖИМАХ

*Рассмотрены внешние факторы, влияющие на основные показатели работы пропульсивного комплекса. Получены аналитические зависимости, позволяющие имитировать изменение внешних условий движения судна в ходовых режимах, которые позволяют моделировать работу пропульсивного комплекса и оценивать эффективность систем управления движением судна.*

*Ключевые слова: управление движением судна, пропульсивный комплекс, регрессионные модели, динамика судна, ходовой режим.*

I.V. ХУДЯКОВ

Херсонська державна морська академія

Г.В. РУДАКОВА

Херсонський національний технічний університет

М.К. КЛЕВЦОВ

Київський національний університет будівництва та архітектури

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ УМОВ ПРИ АНАЛІЗІ ДИНАМІКИ СУДНА В ХОДОВИХ РЕЖИМАХ

*Розглянуто зовнішні фактори, що впливають на основні показники роботи пропульсивного комплексу. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють імітувати зміну зовнішніх умов руху судна в ходових режимах, які дозволяють моделювати роботу пропульсивного комплексу та оцінювати ефективність систем управління рухом судна.*

*Ключові слова: управління рухом судна, пропульсивний комплекс, регресійні моделі, динаміка судна, ходовий режим.*

I.V. KHUDIAKOV

Kherson State Maritime Academy

G.V. RUDAKOVA

Kherson National Technical University

M.K. KLEVTSOV

Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture

## MODELING OF THE EXTERNAL CONDITIONS INFLUENCE FOR THE ANALYSIS OF THE VESSEL DYNAMICS IN THE ANGLE REGIMES

*External factors affecting the main performance indicators of the propulsion complex are considered. Analytical dependencies allowing simulating changes in the external conditions of vessel motion in running modes that allow modeling the operation of the propulsion complex and assessing the effectiveness of the ship's motion control systems are obtained.*

*Keywords: Ship movement control, propulsion complex, regression models, ship dynamics, running mode.*

### Постановка проблеми

Основная задача анализа *динамики судна* - изучение движения судна под действием приложенных к нему внешних сил и моментов. Движение судна характеризуется мореходными качествами, такими как мореходность (способность судна противостоять воздействию морского волнения с колебаниями возможно меньшей частоты и амплитуды), управляемость (способность судна удерживать заданное направление движение или изменять его в соответствии с желанием судоводителя) и ходкость (способность судна перемещаться с заданной скоростью под действием энергии его пропульсивного комплекса, преодолевая сопротивление среды - воды и воздуха). При разработке или модернизации систем управления пропульсивным комплексом при движении судна необходимо учитывать действие внешних факторов неопределенного характера, оказывающих влияние на технико-эксплуатационные характеристики судна [1].

**Анализ последних исследований и публикаций**

Пропульсивный комплекс - это гидромеханическая система, включающая корпус судна и пропульсивную установку, в которой мощность, развиваемая главным двигателем, преобразуется в упор, сообщающий движение судну [2]. Пропульсивная установка комплекса в наиболее общем случае состоит из: одного или нескольких движителей (гребных винтов); одного или нескольких валопроводов; главных судовых передач; главных двигателей. Главные двигатели (ГД) составляют основу главной энергетической установки (ГЭУ), куда входят основные системы, вспомогательные механизмы, теплообменные аппараты и другие агрегаты обеспечения работы ГД. Главные судовые передачи предназначены для преобразования энергии ГД, а также объединения мощности (для нескольких ГД), передаваемых посредством валопровода к движителям. Упор, создаваемый движителем, в свою очередь передается на корпус судна.

Элементы пропульсивного комплекса характеризуются в работе следующими основными показателями [3]:

главный двигатель - мощностью  $N_e$ , крутящим моментом  $M_e$ , частотой вращения  $n$ ;

передача - частотой вращения ведущего (от главного двигателя)  $n$  и ведомого (гребного) валов  $n_p$ ;

гребной винт - упором винта  $P$ , вращающим моментом  $M_p$ , частотой вращения  $n_p$ ;

корпус судна - полным сопротивлением воды и воздуха движению судна  $R$ , скоростью судна  $v$ .

Судно при своем движении выводит массы воды из состояния покоя и воспринимает реакцию в виде гидродинамических сил, распределенных по наружной поверхности его обшивки. Поскольку судно симметрично относительно его диаметральной плоскости, то действие гидродинамических сил реакции воды может быть сведено к одной равнодействующей силе  $F$ , лежащей в диаметральной плоскости, и моменту  $M$ , действующему в той же плоскости (рис. 1). Горизонтальная составляющая  $R$  силы  $F$  является силой сопротивления среды - воды и воздуха; она уравнивается полезной тягой движителя  $P_e$ .

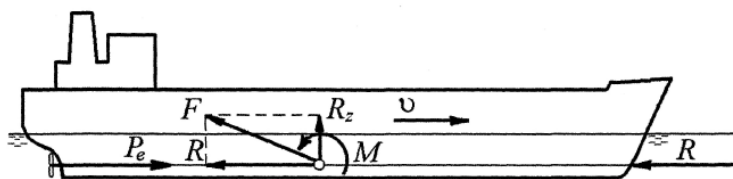


Рис. 1. Силы и моменты, действующие на судно в прямолинейном движении

При разработке эффективных систем управления движением судна необходимо учитывать изменение внешних условий, влияющих на работу пропульсивного комплекса, и использовать адаптивные методы управления механизмом подачи топлива в дизель [4].

**Формулирование цели исследования**

Целью исследований является получение аналитических зависимостей, позволяющих учитывать влияние внешних условий на основные показатели работы пропульсивного комплекса и анализировать динамику судна в ходовых режимах.

**Изложение основного материала исследования**

Гребной винт при своем вращении потребляет вырабатываемую двигателем мощность, которая более или менее эффективно преобразуется в упор  $P$  и поступательную скорость движения судна  $v$ . Между двигателем и винтом приходится вводить понижающий редуктор (передачу) [5]. Взаимодействие элементов движительного комплекса изучается путем совместного рассмотрения их характеристик (рис. 2).

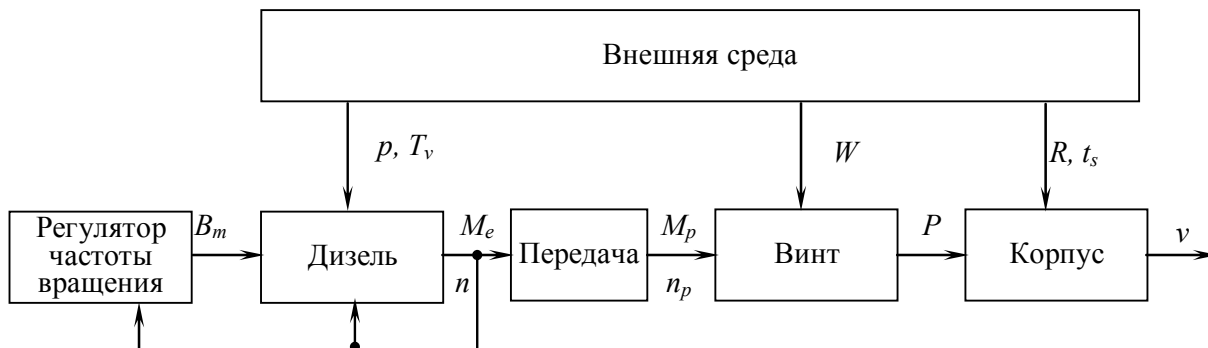


Рис. 2. Схема взаимодействия элементов пропульсивного комплекса

Техническое совершенство пропульсивного комплекса определяется его способностью преобразовывать мощность  $N_e$  (или вращающий момент  $M_e$ ) главного двигателя в движение судна со скоростью  $v$  и с наименьшими потерями в реальных условиях плавания.

На работу пропульсивного комплекса влияет значительное число факторов. Наиболее существенные из них [3]:

- геометрические характеристики, мореходные качества и эксплуатационные параметры судна;
- технические особенности корпуса судна;
- технические характеристики пропульсивной установки: типы и характеристики главной энергетической установки, передачи, движителей;
- текущее техническое состояние элементов пропульсивного комплекса: увеличение эксплуатационной шероховатости корпуса судна вследствие обрастания, возникновения вмятин и коррозии; изменения характеристик гребного винта под действием обрастания и эрозии его лопастей; увеличение трения в подшипниках валопровода за счет износа; изменение характеристик главного двигателя (дизеля) по причине износа деталей и ухудшения характеристик его систем;
- эксплуатационные факторы: реальная нагрузка судна (масса судна, посадка); гидрометеорологические условия плавания (ветер и волнение); влияние мелководья и ширины фарватера в речных условиях плавания и в каналах; скорость течения воды (против хода судна или попутное).

Взаимодействие элементов пропульсивного комплекса (главный двигатель – гребной винт – корпус судна) на всех эксплуатационных режимах может быть рассмотрено и проанализировано путем совместного решения дифференциальных уравнений равновесия сил, действующих на корпус судна, и моментов сил, действующих на гребные винты [3, 6].

Уравнение равновесия горизонтальных сил, действующих на корпус судна, имеет вид

$$M_c \frac{dv}{dt} = \sum P_e - R, \quad (1)$$

где  $M_c$  - масса судна с учетом присоединенной массы воды, кг;  $v$  - скорость судна, м/с;  $\sum P_e$  - суммарная тяга гребных винтов, Н;  $R$  - сопротивление движению судна, Н.

Уравнение моментов сил, действующих на гребные винты записывается как

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_f - M_g, \quad (2)$$

где  $J$  - приведенный к оси гребного винта суммарный момент инерции вращающихся масс главного двигателя, редуктора, валопровода и гребного винта;  $\omega = 2\pi n$  - угловая скорость вращения вала;  $M_e$  - вращающий момент главного двигателя;  $M_f$  - момент трения в подшипниках валопровода, редуктора и соединительной муфты;  $M_g$  - момент гидродинамических сил, действующих на лопасти винта.

Силы и моменты, входящие в уравнения (1) и (2) находятся в зависимости от состояния окружающей среды, то есть зависимости можно выразить в следующей форме

$$P_e = P_e(n_p, v, E), \quad R = R(v, E), \quad (3)$$

$$M_e = M_e(n, p_s, B_m, E), \quad M_p = M_p(n, v, E),$$

где  $E$  - обобщенный фактор воздействия окружающей среды;  $p_s$  - давление перед цилиндром двигателя;  $B_m$  - мгновенный расход топлива на дизель.

- На силы и моменты, действующие в пропульсивной системе, влияют следующие внешние факторы:
- тяговое усилие  $P$  и упор винта  $P_e$  зависят от состояния моря и характера движения судна;
  - сопротивление движения судна  $R$  - от состояния моря, осадки, глубины воды, движения судна, рыскания и силы ветра;
  - тяговый момент двигателя  $M_e$  - от давления, влажности и температуры воздуха;
  - момент сопротивления гребного винта  $M_g$  - от состояния моря и движения судна.

Обслуживающий персонал должен выбирать режим работы главного двигателя таким образом, чтобы избежать его тепловой и механической перегрузки в различных режимах плавания, когда изменяется сопротивление движению судна, что требует изменения буксировочной мощности. Характерные факторы, влияющие на сопротивление движению судна: его загрузка (погружение), гидрометеорологические условия, степень обрастания корпуса, глубина под килем [3].

1. Влияние волнения моря.

Сопротивление движению судна на волнующемся море возрастает с увеличением высоты волн и полноты корпуса и имеет относительно большое значение при небольших скоростях судна. Уменьшение скорости судна в штормовых условиях обуславливается как увеличением сопротивления, так и снижением пропульсивного коэффициента, что связано с ростом нагрузки на движитель. Все эти факторы увеличивают упор гребного винта (рис. 3, а).

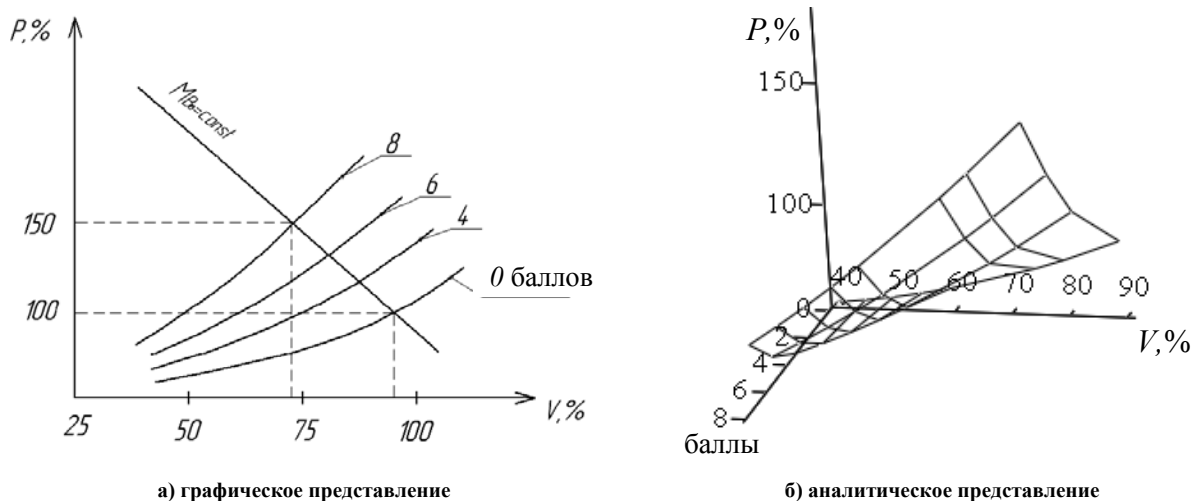


Рис. 3. Зависимость упора винта от скорости судна с учетом штормовой погоды

Для возможности проведения экспериментов путем компьютерного моделирования были получены аналитические зависимости упора винта от скорости судна с учетом штормовой погоды (рис. 3, б) вида

$$k_P(x_1, x_2) = 0,644 - 0,364x_1 - 1,137x_2 + 2x_1x_2 + 0,73(x_1)^2 + 1,113(x_2)^2, \tag{4}$$

где  $x_1$ ,  $x_2$  и  $k_P$  - нормированные значения скорости судна  $V$ , бальности волнения моря  $B_l$  и упора винта  $P$ . Формулы перехода между абсолютными и нормированными значениями имеют вид

$$x_1 = \frac{V}{100}, x_2 = \frac{B_l}{12}, \hat{P} = \frac{P}{100}. \tag{5}$$

2. Влияние атмосферных условий.

Номинальная мощность дизеля гарантируется при определенных атмосферных условиях: температуре воздуха  $t_o = 20^\circ C$ , атмосферном давлении  $P_a = 760$  мм.рт.ст. и относительной влажности воздуха  $\varphi = 50\%$ . Однако в условиях эксплуатации температура в машинном отделении колеблется от  $+15^\circ C$  до  $+45^\circ C$  при  $\varphi = 70..100\%$ . Изменение атмосферного давления существенное влияние не оказывает. Зависимости изменения мощности судовых дизельных установок от температуры и влажности показаны на рис. 4, а.

Получено аналитическую зависимость (см. рис.4, б) относительной мощности дизеля  $k_N = N_e / N_{e\,nom}$  от температуры и влажности окружающей среды вида

$$k_N = 1,04 - \frac{0,008 \cdot \varphi}{100} - 0,004 \cdot t_o. \tag{6}$$

Проведенная проверка значимости коэффициентов регрессионных уравнений позволила обосновать структуру моделей [7]. Анализ адекватности моделей (4), (6) влияния внешних факторов на параметры пропульсивного комплекса выявил отклонение расчетных значений от экспериментальных зависимостей не более 3 %.

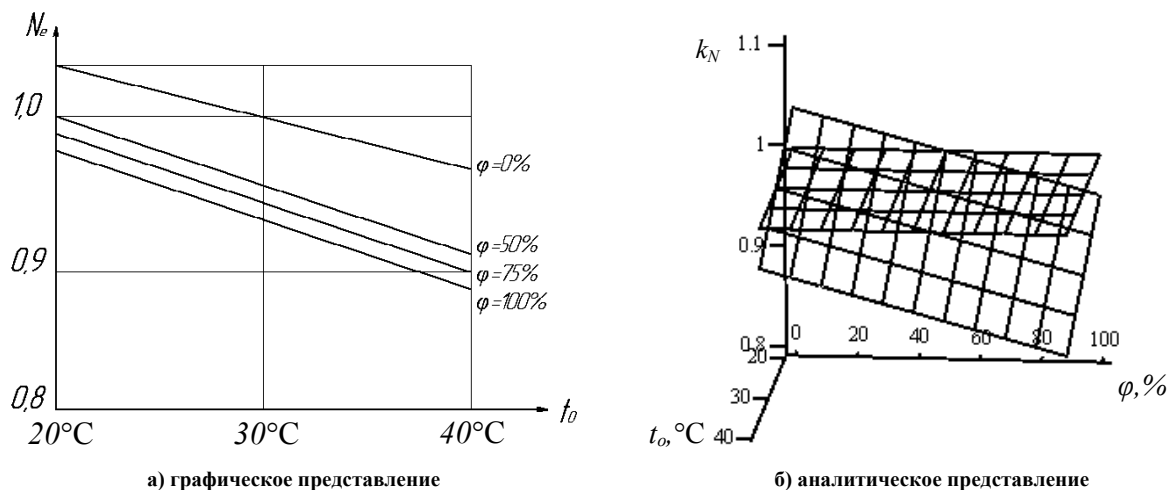


Рис. 4. Влияние параметров окружающей среды на мощность судовых дизельных установок

Аналогичным образом на основе известных экспериментально определенных характеристик можно определить зависимость величины сопротивления движению судна от его скорости, ухудшения технического состояния корпуса (степени обрастания) и спектра волнения.

#### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Полученные регрессионные модели влияния внешних факторов на работу пропульсивного комплекса позволяют имитировать изменение условий эксплуатации судна. Это позволяет проводить анализ динамики судна в ходовых режимах путем компьютерного моделирования с учетом изменения внешних условий при разработке и оценивании эффективности систем управления движением судна.

#### Список использованной литературы

1. Обеспечение надежности судовых дизелей на эксплуатационных и особых режимах работы / М.А. Малиновский, А.А. Фока, В.И. Ролинский, Ю.З. Вахрамеев. – Одесса: ФЕНИКС, 2003. -150 с.
2. Суворов П.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания: учебное пособие / П.С. Суворов. – Одесса: ОНМА, 2012. – 626 с.
3. Суворов П.С. Динамика дизеля в судовом пропульсивном комплексе. / П.С. Суворов. – Одесса: ОНМА, 2004. – 304 с.
4. Ланчуковский В.И. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок. Учебник./ В.И. Ланчуковский, А.В. Кузьминых. – М.: Транспорт, 1983. – 320с.
5. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна. / Л.Л. Вагущенко, Н.Н. Цымбал – Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с.
6. Токарев Л.Н. Системы автоматического регулирования. Примеры схем и структур, статические и динамические характеристики, математические модели, элементы теории регулирования. / Л.Н. Токарев – СПб.: «Нотабене», 2001. – 192с.
7. Киричков В.Н. Автоматика и управление в технических системах. В 11-ти кн. Кн.2. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами / В.Н. Киричков; под ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Выща шк. 1990. – 263 с.