

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 623.4

**В. В. Сахаров,**  
д-р техн. наук, профессор,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

**А. Г. Таранин,**  
доцент,  
ФГБОУ ВПО «Новороссийский  
государственный морской университет  
им. адм. Ф. Ф. Ушакова»;

**А. А. Чертков,**  
канд. техн. наук, доцент,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

## АЛГОРИТМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА

### ENERGOEFFICIENT SHIP STEERING CONTROL ALGORITHM

*В статье рассматривается алгоритм энергоэффективного управления курсом судна, базирующийся на методе синтеза робастного регулятора и процедуре апериодического управления с использованием матрицы Ляпунова. На основе алгоритма выполняется синтез системы управления курсом судна, обеспечивающей минимум энергии на управление рулевым комплексом. Приведен пример расчета системы.*

*The article is devoted to construction of energy efficient algorithm for ship steering control that is based on robust regulator synthesis and dead beat control treatment with Lyapunov matrix employment. Numerical algorithm is used for ship steering synthesis with minimum energy for rudder control. Example of energy efficient system design is suggested.*

*Ключевые слова: алгоритм, энергетическая эффективность, робастный регулятор, апериодическое управление, матрица Ляпунова, управление рулем судна, модель, оптимизация.*

*Key words: algorithm, energy efficiency, robust regulator, dead beat control, Lyapunov matrix, ship rudder control, model, optimization.*



АВТОМАТИЗАЦИЯ управления энергетической эффективностью судов является одной из важнейших проблем на морском и речном флоте. В состав концептуальных положений этой проблемы согласно Конвенции МАРПОЛ и Резолюции МЕРС.213(63) входят технологии синтеза автоматизированных систем управления курсом и рулевыми устройствами, обеспечивающие повышение энергоэффективности судна. Предполагается, что судовые навигационные управляющие системы должны обеспечивать значительную экономию топлива путем сокращения расстояния, пройденного с отклонением от заданного пути, улучшения управления рулевым комплексом и др. [6, с. 35–40].

Развитие методов и средств компьютерного моделирования, базирующихся на современных технических и программных средствах, способствует значительному повышению эффективности и качества синтеза высокоэффективных систем управления морскими и речными судами в сложных погодных и путевых условиях. Первостепенную роль в обеспечении высокой точности удержания судна на курсе и выполнении сложных маневров играют судовые авторулевые комплексы. Возросшие требования к соблюдению правил безопасности плавания и решению задач логистики в условиях конкуренции определяют актуальность создания авторулевых, обладающих рядом

преимуществ, которые принципиально не могут быть реализованы традиционными средствами со структурой ПИД-регуляторов.

Как правило, регулятор состояния или выхода синтезируется с помощью методов аналитического конструирования (АКОР) в предположении, что время действия системы  $t \rightarrow \infty$  и в процессе синтеза нелинейное дифференциальное уравнение Риккати вырождается в алгебраическое матричное уравнение, решаемое эффективными численными методами. В этом, по существу, состоит упрощение процедуры синтеза регуляторов методом АКОР.

Повышение маневренных качеств судов требует использования для управления различных оптимальных законов: обеспечение минимального времени маневрирования в условиях ограничений на переменные состояния и управления, обеспечение минимального расхода топлива при стабилизации курса в условиях волнения и др.

В работе предлагается алгоритм маневрирования судна по критерию минимума энергии на управление, обеспечивающий переход из заданного начального состояния в требуемое конечное состояние (не обязательно нулевое) в течение фиксированного времени. Время выбирается таким образом, чтобы максимальное отклонение пера руля от положения диаметральной плоскости не превышало заданных значений (ограничение на сигнал управления). Алгоритм основан на применении матрицы Крылова для оценки вектора оптимального управления [5, с. 83–87].

Известно, что динамические свойства каждого судна в процессе эксплуатации существенно изменяются вследствие значительного влияния различных факторов на их рабочие характеристики. Параметры моделей динамики речных судов и судов смешанного река–море плавания (отечественных серий «Волгонефть», «Волго-Дон», класса «Волго-Дон макс» и др.) зависят от осадки, скорости движения, глубины под килем, скорости течения реки, характеристик фарватера и других факторов. Поэтому для управления требуется оценка характеристик, идентификация параметров моделей по экспериментальным данным, расчет регуляторов для автоматизации и оптимальной настройки авторулевого комплекса. Выполнение этих операций возможно при наличии на судне хорошо развитой информационной системы, базирующейся на вычислительных средствах при соответствующем программном и техническом обеспечении.

Моделирование и алгоритмизация режимов движения неустойчивых на курсе речных судов показывают, что возможно на качественно новом уровне решить задачу стабилизации судна как нелинейного динамического объекта в условиях ветрового воздействия, исследовать бифуркационные процессы, получить и объяснить закономерности возникновения неоднозначности стационарных режимов, автоколебаний, ухудшения условий управляемости. В результате могут быть созданы алгоритмы синтеза интеллектуального авторулевого, что позволит синтезировать устройства автоматизации для реализации энергоэффективных технологий. Рабочие параметры систем автоматического удержания судов на курсе на тихой воде и на волнении должны быть различными. Эта особенность связана с необходимостью ограничения количества включений рулевой машины при ухудшении погодных условий с целью снижения износа механизма рулевого устройства и потери полезной мощности судовой силовой установки [2, с. 3–4].

Морские и речные суда, работающие на закрепленных грузовых линиях, эксплуатируются на двух основных (квазистационарных) режимах: в грузу и балласте. Специфика управления состоит в том, что структура математической модели судна не изменяется, а матричные коэффициенты объекта автоматизации сохраняются постоянными для каждого из двух режимов. Тогда, исходя из опыта эксплуатации авторулевых, можно полагать, что постоянные коэффициенты матрицы регулятора не изменяются при вариации динамических параметров объекта в заданных пределах и обеспечиваются свойства робастности системы. Одновременно минимизируется критерий качества, состоящий из аддитивных составляющих, характеризующих каждый квазистационарный режим. По существу, предлагается единый регулятор для двух режимов, обеспечивающий минимум расхода топлива в рейсе [3, с. 7–8]. Основное преимущество такого регулятора состоит в отсутствии необходимости перенастройки параметров при переходе с режима на режим и обеспечении устойчивости во всем диапазоне изменения параметров объекта.

Рассмотрим судно, модель которого представлена матричными уравнениями в пространстве состояний для двух режимов:

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + b_i u(t), \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где  $x(t) \in R^n$  — вектор состояния и  $u(t) \in R$  — управление.  $A \in R^{n \times n}$  и  $b_i \in R^n$  не изменяются во времени. Система (1) полностью управляема для двух режимов. Для каждой модели рассчитаем регулятор состояния:

$$\dot{x}_i(t) = -K^T x_i(t), \quad (2)$$

обеспечивающий минимум целевой функции:

$$J_i = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x_i^T Q x_i + u_i^T R u_i) \cdot dt, \quad (3)$$

где  $Q \in R^{n \times n}$  — симметрическая положительно полуопределенная матрица;  $R$  — положительно определенная матрица.

Управление судном (1) реализуем с помощью регулятора  $K$ , пригодного по параметрам настройки для двух систем ( $i = 1, 2$ ). Параметры регулятора должны обеспечивать минимум критерия качества:

$$L(K) = \sum_{i=1}^2 w_i \cdot J_i(K), \quad (4)$$

где  $w_i$  — весовые коэффициенты (выбираются исходя из условий минимизации расхода топлива в рейсе [3]).

В замкнутом состоянии каждая  $i$ -я система имеет матрицу

$$A_{zi}(K) = (A_i - b_i \cdot K^T), \quad i = 1, 2, \dots,$$

спектр которой должен обеспечивать устойчивость и динамические свойства, отвечающие требованиям минимума (4).

Если (3) представить как функцию  $K$ , то критерий качества примет вид

$$J_i(K) = \frac{1}{2} \int_0^\infty [x_i^T (Q + K R K^T) x_i] \cdot dt. \quad (5)$$

Известно, что минимум (5) определяется в результате решения матричного уравнения Ляпунова и, кроме того, зависит от вектора начальных условий  $x_i(0)$ . Чтобы упростить задачу, предлагается рассматривать  $x_i(0)$  как вектор с единичными начальными условиями либо считать его случайным с математическим ожиданием  $E\{x_i(0)\} = 0$  и ковариационной матрицей  $E\{x_i(0) \cdot x_i^T(0)\} = X_0$ , равной единичной матрице:

$$X_0 = I.$$

Тогда согласно работе [3] для минимизации (5) необходимо найти след матрицы Ляпунова, получаемый как положительно определенное решение уравнения

$$P_i A_{zi}(K) + A_{zi}^T(K) \cdot P_i = -D, \quad (6)$$

где  $D = Q + K \cdot R \cdot K^T$ . В результате будем иметь

$$J_i(K) = \frac{1}{2} \text{tr}(P_i). \quad (7)$$

Рассмотрим модель судна, работающего на закрепленной линии. Уравнения динамики в грузу и балласте представим в виде двух систем [3]:

— в грузу:

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + b_1 u(t);$$

— в балласте:

$$\dot{x}(t) = A_2 x(t) + b_2 u(t)$$

при следующих численных значениях матриц:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.298 & -0.279 & 0 \\ -4.370 & -0.773 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad b_1 = [0.116 \quad -0.773 \quad 0]^T,$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.428 & -0.339 & 0 \\ -2.939 & -1.011 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad b_2 = [0.150 \quad -1.011 \quad 0]^T.$$

Здесь вектор  $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$ . В принятых обозначениях  $x_1(t) = \beta(t)$  — угол дрейфа;  $x_2(t) = \omega(t)$  — угловая скорость по курсу;  $x_3(t) = \varphi(t)$  — курсовой угол;  $u(t) = \delta(f)$  — угол перекладки руля [1, с. 784–796].

В критерии (5) выберем матрицу  $Q = I$ . Для определения численных значений коэффициентов робастного регулятора и критериев, аддитивно входящих в уравнение (7), воспользуемся табличными данными, приведенными в работе [3]. В результате для  $R = I$  получим

$$K = [3.8609 \ -2.3370 \ -1.3405], \quad J_1(K) = 10.8579, \quad J_2(K) = 4.7524.$$

Критерий оптимальности (4) принимает численное значение:

$$J = 15.6123.$$

Составим файл для расчета регулятора и моделирования замкнутой системы. Заметим, что собственные значения матриц  $A_1$  и  $A_2$  соответственно равны:

$$\text{eig}(A_1) = [0 \ -1.6649 \ 0.5939]; \quad \text{eig}(A_2) = [0 \ -1.7594 \ 0.3204].$$

Применение регулятора  $K$  согласно равенству

$$A_{ci}(K) = (A_i - b_i \cdot K^T), \quad i = 1, 2,$$

обеспечивает устойчивость системы на обоих режимах: собственные значения матрицы  $A_{c1}$ :

$$p_1 = \text{eig}(A_{c1}) = [-2.1808; -0.5723 + 0.3545i; -0.5723 - 0.3545i]$$

и аналогично собственные значения  $A_{c2}$  равны

$$p_2 = \text{eig}(A_{c2}) = [-2.8715; -1.1568; -0.3525].$$

Теперь по заданным спектрам матриц  $A_{c1}$  и  $A_{c2}$  выполним расчет регуляторов, для чего воспользуемся функцией `acker` инструментария Control Toolbox среды MatLab. В результате применения модального метода синтеза получим:

$$K_{es1} = \text{acker}(A_1, B_1, p_1);$$

$$K_{es2} = \text{acker}(A_2, B_2, p_2);$$

$$K_{es} = K_{es1} = K_{es2} = [3.8609 \ -2.3370 \ -1.3405],$$

что свидетельствует о корректности выполненных решений. Переходные процессы в устойчивой системе управления с робастным регулятором  $K_{es}$  приведены на рис. 1 и 2.

При управлении судном в грузу (рис. 1) наблюдаются колебания ввиду наличия двух комплексно-сопряженных корней в спектре матрицы  $A_{c1}$ . Матрица  $A_{c2}$ , полученная для судна в балласте, содержит в составе спектра только вещественные отрицательные числа. Поэтому переходный процесс является аperiodическим (рис. 2).

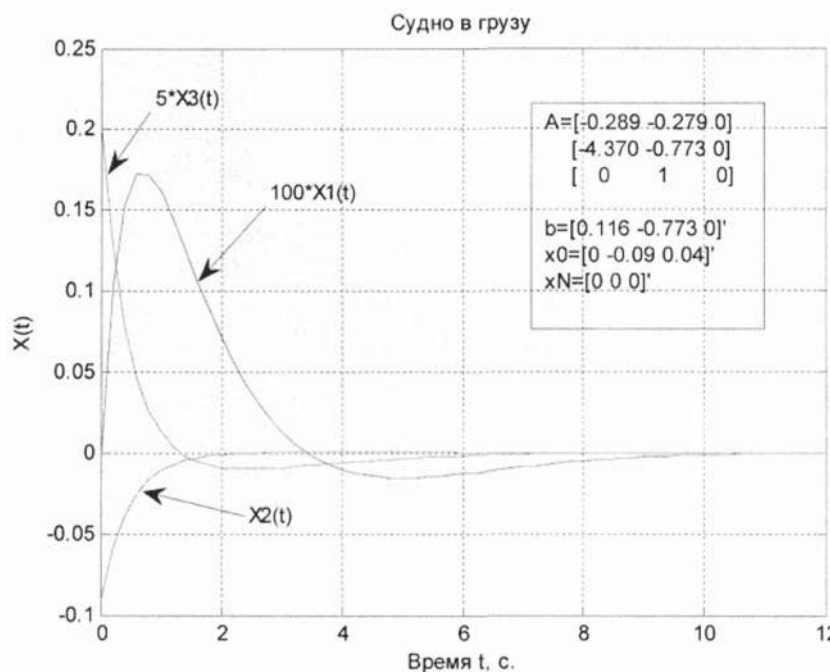


Рис. 1. Переходный процесс при управлении судном в грузу

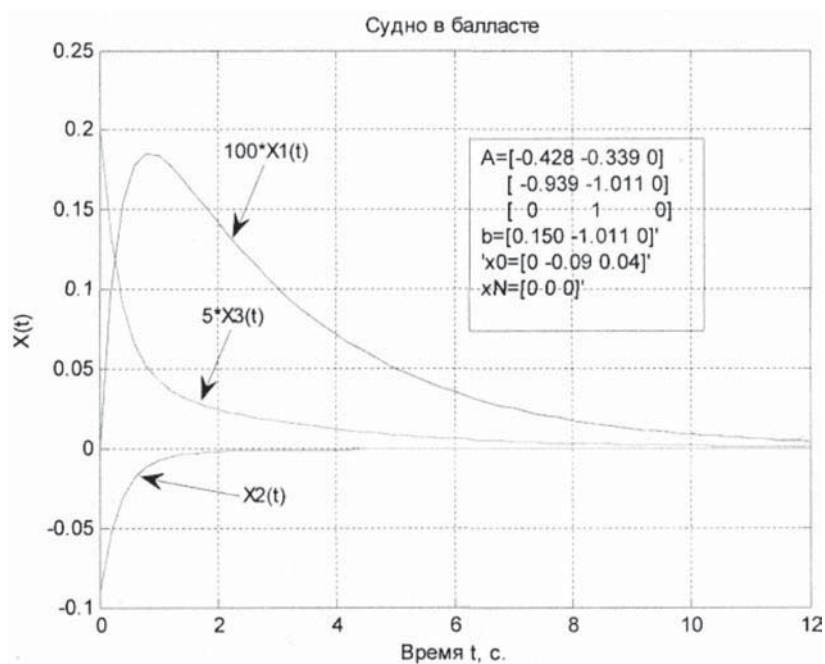


Рис. 2. Переходный процесс при управлении судном в балласте

Если весовая матрица  $Q = 0$ , критерий (3) характеризует потери энергии на управление рулевым комплексом. Путем изменения верхней границы интеграла можно задать конечное время переходного процесса в системе, и тогда целью процедуры оптимизации будет повышение энергоэффективности рулевого комплекса судна. Для решения задач рассматриваемого класса можно предложить численный алгоритм, основанный на использовании матрицы Крылова [5].

Применение численного алгоритма связано с переходом от модели непрерывной системы (1) к дискретной, что позволяет использовать принципы аperiодического управления для получения энергоэффективных решений в исследуемой предметной области.

Из работ Калмана и Тоу известно, что в общем случае для перевода динамической системы (1) с помощью дискретных управлений из начального в конечное (например, нулевое) состояние требуется синтезировать  $n$  сигналов управления, где  $(n \times n)$  — размерность матрицы  $A$ . Поэтому весь временной интервал  $N$  должен состоять не менее чем из  $n$  интервалов, на которых управления могут быть кусочно-постоянными функциями [3].

При кусочно-постоянных сигналах управления  $i$ -й системой модели (1) с одним входом, амплитуда которых изменяется в моменты квантования по времени с помощью электронного квантователя, решение при заданном векторе начальных условий  $X(t_0)$ , имеет вид [5]:

$$X(t_N) = W^N X(t_0) - K_r \cdot U, \quad (8)$$

где  $X(t_N)$  — вектор состояния объекта в момент  $t_N$ ;  $K_r$  — матрица Крылова;  $W$  — матричный экспоненциал,  $U$  — вектор кусочно-постоянных управлений размерности  $(N \times 1)$ . Матрица Крылова полного ранга размерности  $(n \times N)$  имеет вид

$$K_r = [W^{N-1} \ W^{N-2} \dots \ W^1 \ W^0] \cdot H, \quad (9)$$

где  $W = e^{A\delta}$  и  $H = (I - e^{A\delta}) \cdot A^{-1} \cdot B$ ;  $\delta$  — шаг квантования,  $I$  — единичная  $(n \times n)$ -матрица. В формуле (9) знак  $(\cdot)$  означает выполнение операции поэлементного умножения на вектор-столбец  $H$ .

Согласно (8) на шаге  $N$  при  $\delta = 1$ , то есть в момент  $t = t_N$ , вектор состояния  $X(t_N)$  является функцией вектора начальных условий  $X(t_0)$  и управлений  $U = [U_0, U_1, \dots, U_{N-1}]^T$ , приложенных к системе в моменты квантования. Для перевода динамического объекта из состояния  $X(t_0)$  в состояние  $X(t_N) \neq 0$  требуется получить вектор  $U$  с помощью соотношения

$$U = K_r \cdot (X(t_N) - W^N \cdot X(t_0)). \quad (10)$$

Из (10) следует, что если  $N = n$ , объект переводится из начального в конечное состояние за минимальное время. При этом квадратная матрица Крылова, имеющая полный ранг, должна инвертироваться. Если же  $N > n$ , переход осуществляется за  $N$  шагов по критерию минимума расхода энергии на управление. Матрица Крылова становится прямоугольной, и для получения наилучшей оценки вектора управления  $U$  можно воспользоваться операцией псевдоинверсии Мура–Пенроуза.

Случай приведения объекта в начало координат является частным и получается по формуле (10), если положить  $X(t_N) = 0$ . Если матрица  $A$  является особенной, то вычисление  $H$  следует производить путем численного интегрирования:

$$H(t - t_0) = \int e^{A(t-\tau)} B U(\tau) d\tau \quad (11)$$

по переменной  $\tau$ .

Соотношениями (8)–(11) представлен алгоритм аperiodического управления судном с использованием матрицы Крылова, обеспечивающий минимум энергии на управление рулевым комплексом.

Для определения энергоэффективного управления по данному алгоритму разработана программа, представленная файлом `sah289a.m` в кодах MatLab. В файле содержатся матрицы состояния и управления двух моделей судна: в грузу и балласте. Переход к дискретной форме выполнен с шагом `del=0.2` с. Получена модель в пространстве состояний в терминах LTI. Предусмотрено управление дискретным аналогом модели пространства состояний в форме кусочно-постоянной функции на каждом шаге. Файл использован для моделирования переходных процессов с заданными граничными условиями. Число шагов  $N = 60$ .

```
% sah289a.m
```

```
% Уравнения динамики судна:
```

```
% Судно в грузу
```

```
A=[-0.298 -0.279 0;-4.370 -0.773 0;0 1 0]; B=[0.116 -0.773 0]';
```

```
% Судно в балласте
```

```
%A=[-0.428 -0.339 0;-2.939 -1.011 0;0 1 0]; B=[0.150 -1.011 0]';
```

```
C=[1 0 0;0 1 0;0 0 1]; D=[0 0 0];
%=====
% Шаг дискретности
del=0.2;
% Модель LTI:
V=ss(A,B,C,D);
Vd=c2d(V,del,'zoh');
Ad=Vd.a; Bd=Vd.b; Cd=Vd.c; Dd=Vd.d;
% Граничные условия
x0=[-0.05 -0.1 0.08]';
% x0=[0 -0.09 0.04]';
xN=[0 0 0]';
% Число шагов
N=60;
% МАТРИЦА КРЫЛОВА
Kr=gallery('krylov',Ad,Bd,N);
Kr=flipud(rot90(Kr,2));
KR=pinv(Kr);
% Оценка вектора управления с помощью
% матрицы Крылова:
Z=Ad^(N)*x0;
u=KR*(xN-Z);
% Моделирование системы:
[y,x]=dlsim(Ad,Bd,Cd,Dd,[u;0],x0);
% Графические построения:
tau=0:N; t=tau.*del;
plot(t',x,t',[u;0]*0.75,'.').grid
```

Графики переходных процессов построены с помощью оператора plot с введением масштаба на координату управления, равного 0.75. На рис. 3 изображены графики вектора переменных состояния  $X=[X(1) \ X(2) \ X(3)]'$  для судна в грузу. Вектор, обеспечивающий минимум энергии на управление объектом, представлен системой точек. На рис. 4 приведены аналогичные графики для судна в балласте.

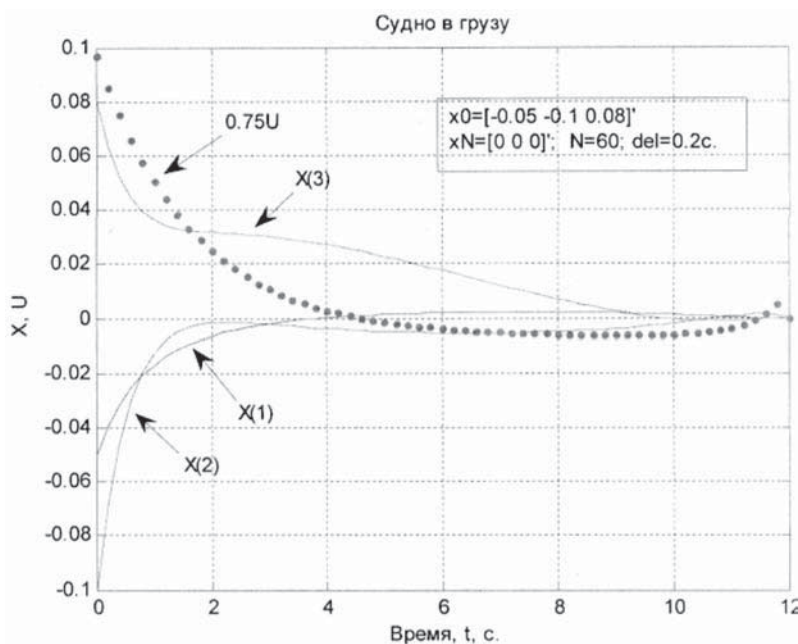


Рис. 3. Энергоэффективное управление судном в грузу

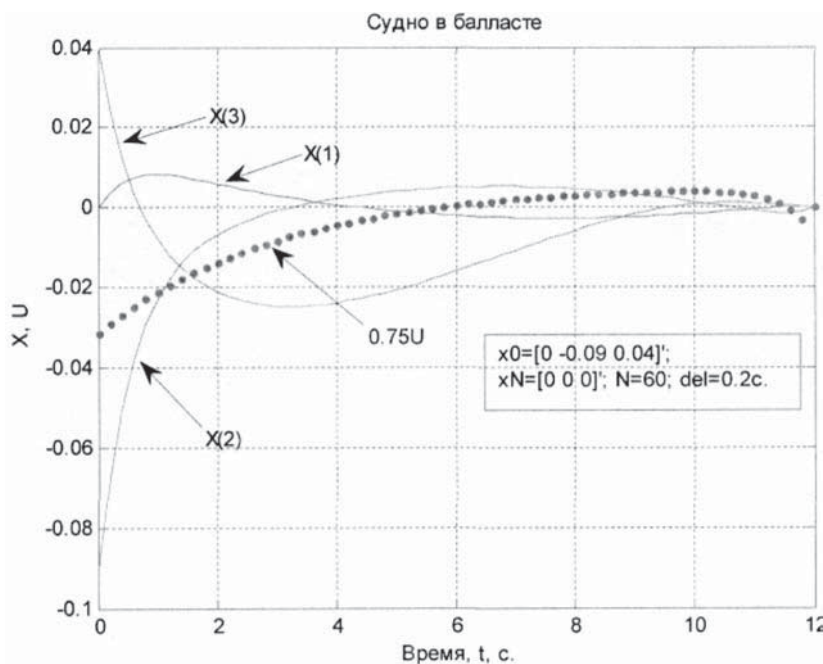


Рис. 4. Энергоэффективное управление судном в балласте

Заметим, что в спектрах матриц  $A_1$  и  $A_2$  содержатся положительные числа, то есть объект как в грузу, так и в балласте является неустойчивым. Вместе с тем алгоритм обеспечивает эффективный переход неустойчивого объекта из начального состояния в конечное на заданном временном интервале (см. рис. 3 и 4). Чтобы обеспечить минимизацию энергии на управление и сохранить устойчивость системы при высоких эксплуатационных показателях, следует использовать комбинированный регулятор, состоящий из двух частей: робастного регулятора и оптимизатора энергии на управление. Первый обеспечит устойчивость системы, второй регулятор — энергоэффективное управление при существенных отклонениях координат состояния от заданных значений в переходных режимах.

### Список литературы

1. Веремей Е. И. Применение пакета NCD для решения задач модальной параметрической оптимизации / Е. И. Веремей, М. В. Коровкин // Проектирование систем автоматического управления и регулирования: тр. II науч. конф. — М., 2004. — Ч. 1.
2. Кондратьев С. И. Об использовании авторулевых для автоматического управления судами, идущими параллельными курсами / С. И. Кондратьев, А. В. Бачище, Д. В. Стрельников // Транспортное дело России. — М., 2003. — Спецвып.: Проблемы водного транспорта Российской Федерации.
3. Королев В. И. Робастная система управления судном на курсе / В. И. Королев, В. В. Сахаров // Транспортное дело России. — М., 2003. — Спецвып.: Проблемы водного транспорта Российской Федерации.
4. Лутков С. А. Управление маневром судна по критерию минимума расхода энергии / С. А. Лутков, В. И. Королев, В. В. Сахаров // ТРАНСКОМ-2004: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 8–9 декабря 2004 г. — СПб., 2004. — С. 145–148.

5. Сахаров В. В. Применение матрицы Крылова для апериодического управления динамическими объектами / В. В. Сахаров, В. И. Королев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — Вып. 1 (9).

6. Сахаров В. В. Экономичные режимы работы генераторов электроэнергии на различных сортах топлива / В. В. Сахаров, Е. Н. Андрианов, В. И. Королев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — Вып. 4 (12).

**УДК 621.3.053.4**

**Е. Н. Андрианов,**

канд. техн. наук, профессор,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

**В. В. Сахаров,**

д-р техн. наук, профессор,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

**А. Г. Таранин,**

доцент,  
ФГБОУ ВПО «Новороссийский государственный  
морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»

## **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ПО ЭТАЛОННЫМ МОДЕЛЯМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТОВ**

### **SHIP DIESEL WORKING PROCESS DIAGNOSTING WITH STANDARD MODELS AND WAVELET TECHNIQUES APPLICATIONS**

*Рассматривается способ диагностирования рабочего процесса судового дизеля в рейсе по инвариантам, установленным по эталонным моделям с применением вейвлетов. Для квазистатических режимов способ применен на танкере дедвейтом 66881 р. т с целью функционального диагностирования главного двигателя судна MITSUI B&W 6L80GFCA. Эффективная мощность двигателя 11 900 кВт (16 180 л. с.). Завод-изготовитель: MITSUI Engineering and shipbuilding Co., LTD.*

*Ship diesel working process diagnostic mode is considered. Invariants in trip are defined by standard models with wavelet tools applications. The mode is applied to functional diagnostics of MITSUI B&W 6L80GFCA ship diesel in sea tanker of 66881 register tons. Diesel effective power is 11900 kW (16180 HP). Diesel-building plant is MITSUI Engineering and shipbuilding Co. LTD.*

*Ключевые слова: функциональное диагностирование, судового дизель, сплайн-аппроксимация, интерполяция, ряды Фурье, вейвлет, квазистатический режим.*

*Key words: functional diagnosis, ship diesel, spline approximation, interpolation, Fourier's ranks, wavelet, quasistatic mode.*



**Э**НЕРГЕТИЧЕСКАЯ эффективность судна непосредственно зависит от технического состояния главных и вспомогательных двигателей, являющихся основными потребителями топлива в рейсе. Поэтому их функциональному диагностированию, то есть проверке правильности функционирования в процессе выполнения ими основных технологических операций по назначению, всегда уделялось большое внимание.

При диагностировании судового дизеля необходимо выполнять проверку исправности, работоспособности и правильности его функционирования. Исправный объект характеризуется от-