

---

---

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОЖДЕНИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

---

---

УДК 621.3

**В.В. Кирюха, Ю.М. Горбенко, В.С. Яблокова**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## СПОСОБ КОРРЕКТИРОВКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

*Рассматриваются методы формирования системы уравнений решения задачи диагностики электрической цепи. Система уравнений решается методом наименьших квадратов.*

**Ключевые слова:** метод наименьших квадратов.

**V.V. Kiryuha, U.M. Gorbenko, V.S. Yablokova**

## METHOD OF QUADRIPOLE DIAGNOSIS FEATURES BASED ON THE LEAST SQUARES METHOD

*This paper deals with the system of equations forming methods. The system of equations is solved by the least square method.*

**Key words:** the least square method.

Оценка надежности электротехнического и радиотехнического оборудования в условиях дестабилизирующих факторов является одной из важнейших задач. Для ее осуществления необходимо располагать информацией о параметрах, значения которых могут быть определены при решении задачи диагностики электрической цепи (ДЭЦ) на основании результатов измерений, выполненных с погрешностью, и априорной информации. При такой постановке задача ДЭЦ сводится к решению переопределенной системы уравнений с ограничениями. Система ограничений формируется и по уравнениям отождествления [1].

При решении переопределенной системы уравнений по методу наименьших квадратов (МНК) не всегда обеспечивается выполнение всех ограничений, особенно, если для линейризации компонентных уравнений используются априорная информация, заданная в виде широкого интервала возможных значений.

Для получения достоверного решения требуется управлять процессом вычисления, что можно обеспечить введением корректирующих коэффициентов, выбор которых представляет собой сложную задачу. Рассмотрим один из вариантов назначения корректирующих коэффициентов.

Сформируем систему уравнений таким образом, что элементы  $u_i$ ,  $U_i$  компонентного уравнения ( $u_i - \pi \cdot U_i = 0$ ), по отношению к которому применим корректирующий коэффициент  $\lambda$ , будут являться двумя первыми элементами вектора неисключаемых переменных  $\mathbf{X}_1$ .

С учетом указанных обстоятельств матрицы  $\mathbf{A}_\lambda$  и  $\mathbf{F}_\lambda$  уравнения  $\mathbf{A}_\lambda \cdot \mathbf{X}_1 = \mathbf{F}_\lambda$  примут следующий вид:

$$\mathbf{A}_\lambda = \begin{bmatrix} \lambda a_{11} & \lambda a_{12} & 0 \\ \mathbf{N}_1 & \mathbf{N}_2 & \mathbf{N}_3 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_\lambda = \begin{bmatrix} \\ \mathbf{F}^0 \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2$  – векторы-столбцы матрицы  $\mathbf{A}_\lambda$ ;  $\mathbf{F}^0$  – подвектор вектора  $\mathbf{F}_\lambda$  без первого нулевого элемента;  $\mathbf{N}_3$  – соответствующая подматрица матрицы  $\mathbf{A}_\lambda$ .

Решение системы уравнений находится псевдообращением

$$\mathbf{X}_1 = (\mathbf{A}_\lambda^T \cdot \mathbf{A}_\lambda)^{-1} \cdot \mathbf{A}_\lambda \cdot \mathbf{F}_\lambda =$$

$$= \begin{bmatrix} \lambda^2 a_{11}^2 + \mathbf{N}_1^T \cdot \mathbf{N}_1 & \lambda^2 a_{11} a_{12} + \mathbf{N}_1^T \cdot \mathbf{N}_2 & \mathbf{N}_1^T \cdot \mathbf{N}_3 \\ \lambda^2 a_{11} a_{12} + \mathbf{N}_2^T \cdot \mathbf{N}_1 & \lambda^2 a_{12}^2 + \mathbf{N}_2^T \cdot \mathbf{N}_2 & \mathbf{N}_2^T \cdot \mathbf{N}_3 \\ \mathbf{N}_3^T \cdot \mathbf{N}_1 & \mathbf{N}_3^T \cdot \mathbf{N}_2 & \mathbf{N}_3^T \cdot \mathbf{N}_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{N}_1^T \cdot \mathbf{F}^0 \\ \mathbf{N}_2^T \cdot \mathbf{F}^0 \\ \mathbf{N}_3^T \cdot \mathbf{F}^0 \end{bmatrix}$$

С целью обращения матрицы  $(\mathbf{A}_\lambda^T \cdot \mathbf{A}_\lambda)$  представим ее в виде

$$\mathbf{A}_\lambda^T \cdot \mathbf{A}_\lambda = \mathbf{W} + \bar{\mathbf{E}} \cdot \bar{\mathbf{E}}^T,$$

где  $\mathbf{W}$  – квадратная симметричная матрица

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_1^T \cdot \mathbf{N}_1 & \mathbf{N}_1^T \cdot \mathbf{N}_2 & \mathbf{N}_1^T \cdot \mathbf{N}_3 \\ \mathbf{N}_2^T \cdot \mathbf{N}_1 & \mathbf{N}_2^T \cdot \mathbf{N}_2 & \mathbf{N}_2^T \cdot \mathbf{N}_3 \\ \mathbf{N}_3^T \cdot \mathbf{N}_1 & \mathbf{N}_3^T \cdot \mathbf{N}_2 & \mathbf{N}_3^T \cdot \mathbf{N}_3 \end{bmatrix},$$

$\bar{\mathbf{E}}^T$  – вектор-строка

$$\bar{\mathbf{E}}^T = \begin{bmatrix} \lambda a_{11} & \lambda a_{12} & 0 \end{bmatrix}.$$

Получим решение в виде

$$\mathbf{X}_1 = \left[ \mathbf{W}^{-1} - \frac{\lambda^2}{\lambda^2 \theta_0 - 1} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}^T \right] \cdot \bar{\mathbf{F}},$$

где  $\mathbf{M} = \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{E}$ ,

$$\mathbf{E}^T = \begin{array}{|c|c|c|} \hline a_{11} & a_{12} & 0 \\ \hline \end{array},$$

$$\theta_0 = \mathbf{E}^T \cdot \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{E},$$

$$\bar{\mathbf{F}}^T = \begin{array}{|c|c|c|} \hline (\mathbf{N}_1^T \cdot \mathbf{F}^0)^T & (\mathbf{N}_2^T \cdot \mathbf{F}^0)^T & (\mathbf{N}_3^T \cdot \mathbf{F}^0)^T \\ \hline \end{array}.$$

Анализ полученного выражения позволяет сделать вывод о том, что коэффициент  $\lambda$  обеспечивает коррекцию решения непосредственно только одной какой-то переменной, например  $x_1$ . Все остальные переменные зависят линейно от  $x_1$ . Связь между  $x_1$  и каждой из остальных  $x_k$  можно записать в виде

$$x_k = c_k \cdot x_1 + \theta_k,$$

где  $c_k = \theta_k'' / \theta_1''$ ,  $\theta_k = \theta_k' - \frac{\theta_1' \cdot \theta_k''}{\theta_1''}$ ;  $\theta_1'$  и  $\theta_k'$  – первый и  $k$ -й элементы матрицы столбца  $\mathbf{W}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{F}}$ , соответственно;  $\theta_1''$  и  $\theta_k''$  – первый и  $k$ -й элементы матрицы столбца  $\mathbf{M} \cdot \mathbf{M}^T \cdot \bar{\mathbf{F}}$ , соответственно.

Пользуясь линейной связью  $x_1$  с остальными  $x_k$ , можно найти границы  $x_{1\alpha}^k$ ,  $x_{1\beta}^k$  интервала  $\nabla_k' = [x_{1\alpha}^k, x_{1\beta}^k]$ , значений  $x_1$ , соответствующие верхней и нижней границам  $x_k$ .

Если

$$\nabla_0' = \bigcap_{k=1}^m \nabla_k' \neq \emptyset,$$

то для  $\lambda^2 > 0$  и  $\lambda^2 \neq \infty$  можно выбрать такое значение  $x_1$ , а следовательно, и  $\lambda$ , при котором каждая  $x_k$  попадает в свой интервал  $[x_{k\alpha}, x_{k\beta}]$ .

Аналогично может быть определен интервал  $\nabla_k''$ , соответствующий априорной интервальной информации об оцениваемых параметрах.

Если определить интервалы  $\nabla_k''$  для всех  $\pi_k$  и найти пересечения

$$\nabla_0'' = \bigcap_{k=1}^m \nabla_k'',$$

и если  $\nabla_0''$  не пусто, то можно подобрать такое значение  $x_1$ , при котором выполнялись бы требования в отношении априорной информации.

В случае если

$$\nabla_0 = \nabla'_0 \cap \nabla''_0 \neq 0,$$

то можно обеспечить выполнение всех заданных условий.

Выбор корректирующего коэффициента при требовании, чтобы  $x_1$  оказалось в интервале  $f_\alpha \leq x_1^0 \leq f_\beta$ , определяется выражением

$$\lambda^2 = \frac{\theta'_1 - x_1^0}{\theta_0 \cdot x_1^0 + \theta'_1 - \theta_0 \cdot \theta'_1}.$$

Таким образом, рассмотренный подход формирования системы уравнений и введения корректирующего коэффициента позволяет определить его значение для получения адекватного решения.

### Список литературы

Горбенко Ю.М. Анализ технического состояния объектов по критерию наименьших квадратов // Проблемы развития и совершенствования методов проектирования, производства и эксплуатации радиоэлектронных приборов: тр. III Дальневост. науч.-техн. конф. НТО им. акад. А.Н. Крылова по судовой радиоэлектронике (Секция судовой радиоэлектроники и приборов). – Владивосток: ДВВИМУ, 1984.

**Сведения об авторах:** Кирюха Владимир Витальевич,  
кандидат технических наук, доцент, e-mail: kiryuha@list.ru;  
Горбенко Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: gorbenko.um@mail.ru;  
Яблокова Виктория Сергеевна, кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: victoryapple@yandex.ru.

УДК 621.3

**И.А. Корниенко**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATLAB**

*Предложен пример использования современных компьютерных технологий в процессе обучения студентов.*

**Ключевые слова:** *двигатель постоянного тока независимого возбуждения, Matlab, Simulink.*

**I.A. Kornienko**

## **MODELATION OF ELECTRICAL DC DRIVE IN THE MATLAB PROGRAM**

*Example of use modern computer technology in the learning process*

**Key words:** *independent excitation dc motor, Matlab, Simulink.*

На сегодняшний день подготовка грамотных специалистов невозможна без применения новых форм обучения с использованием компьютерных технологий, базирующихся на современных прикладных программных продуктах.

Владение теорией электрических машин является высокой составляющей профессиональной подготовки специалиста по электрическим машинам и системам электроприводов.

Использование компьютерных технологий позволит расширить круг и глубину изучаемых вопросов, провести множество экспериментов с использованием виртуальных электрических машин, что благотворно скажется на уровне подготовки специалистов.

Система MATLAB (сокращение от MATrix LABoratory — матричная лаборатория) представляет собой интерактивную систему, предназначенную для выполнения инженерных и научных расчетов и ориентированную на работу с массивами данных.

Одной из наиболее привлекательных особенностей системы MATLAB является наличие в ней наглядного и эффективного средства составления программных моделей — пакета визуального программирования Simulink.

Пакет Simulink позволяет осуществлять исследование (моделирование во времени) поведения динамических линейных и нелинейных систем, причем составление «программы» и ввод характеристик систем можно производить в диалоговом режиме, путем сборки на экране схемы соединений элементарных звеньев. В результате такой сборки получается модель системы, называемая S-моделью. В качестве «кирпичиков» при построении S-модели применяются визуальные блоки (модули), которые сохраняются в библиотеках Simulink.

S-модель может иметь иерархическую структуру, т.е. состоять из моделей более низкого уровня, причем количество уровней иерархии практически не ограничено.

В пакете Simulink можно поставить опыт как на структурной модели двигателя постоянного тока (рис. 1), так и на виртуальной модели, которая имеется в библиотеке Simulink.

В структурной модели двигателя постоянного тока независимого возбуждения (далее ДПТ НВ) в качестве источников напряжения для цепи якоря и цепи возбуждения двигателя используются блоки Step, цепь якоря и цепь возбуждения реализованы на базе блоков Transfer Function и Gain, а ротор — на базе блока Integrator (рис. 2).

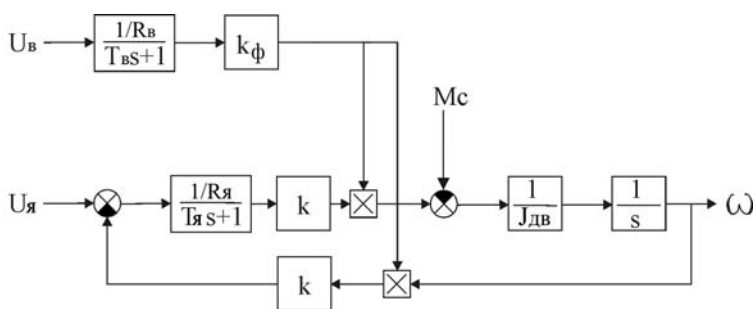


Рис. 1. Структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения  
Fig. 1. Structural diagram of independent excitation dc motor

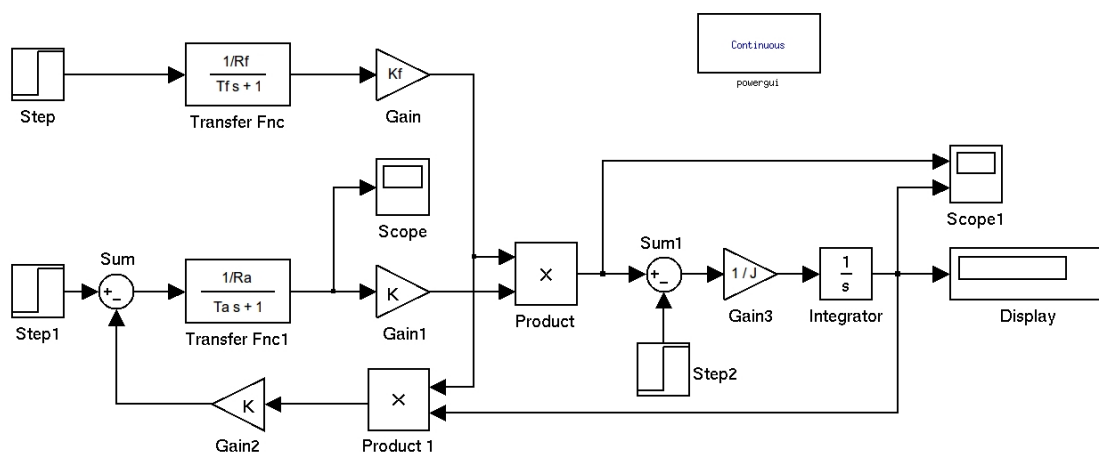


Рис. 2. Структурная модель ДПТ НВ в Simulink  
Fig. 2. Structural diagram of independent excitation dc motor in Simulink

Виртуальная модель ДПТ представляет собой блок, разделенный на три части: обмотка возбуждения (F+, F-), якорная цепь (A+, A-), механическая часть (TL, m). Это обстоятельство делает возможным использование данного блока для моделирования как машины с последовательной обмоткой возбуждения, так и машины с независимым возбуждением.

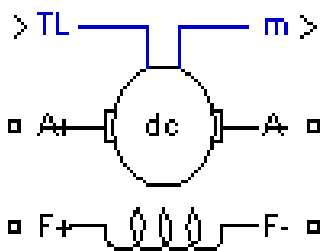


Рис. 3. Блок DC Machine  
Fig. 3. DC Machine diagram

Выход m представляет собой шину данных, по которой выводятся значения скорости, тока цепи якоря, тока возбуждения и электромагнитного момента.

На рис. 3 приведена пиктограмма виртуальной модели ДПТ (DC Machine), которая находится в библиотеке SimPowerSystems в разделе Machines.

На рис. 4 показана виртуальная модель ДПТ НВ с источниками питания цепей и различными измерительными блоками.

На рис. 5 показаны кривые переходных процессов, полученные в ходе эксперимента, проведенного на моделях при условиях: запуск на холостом ходу ( $M_C = 0$ ) с последующим набросом нагрузки ( $M_C = M_H$ ). Кривые, полученные на структурной и виртуальной моделях, идентичны.

Для изучения статических характеристик ДПТ НВ можно создать модель, которая будет являться виртуальным аналогом лабораторной установки ДПТ – ДПТ (рис. 6).

Модель виртуальной установки ДПТ – ДПТ содержит две электрические машины постоянного тока. Одна машина, которая является моделью исследуемого двигателя, имеет нерегулируемые источники питания обмотки возбуждения и цепи якоря. Вторая имеет нерегулируемый источник питания обмотки возбуждения и регулируемый источник в якорной цепи.

Электромагнитный момент DC Machine является нагрузкой на валу машины DC Machine 1, а электромагнитный момент машины постоянного тока DC Machine 1 служит нагрузкой на валу DC Machine.

Рис. 4. Виртуальная модель ДПТ НВ  
Fig. 4. Virtual model of independent excitation dc motor

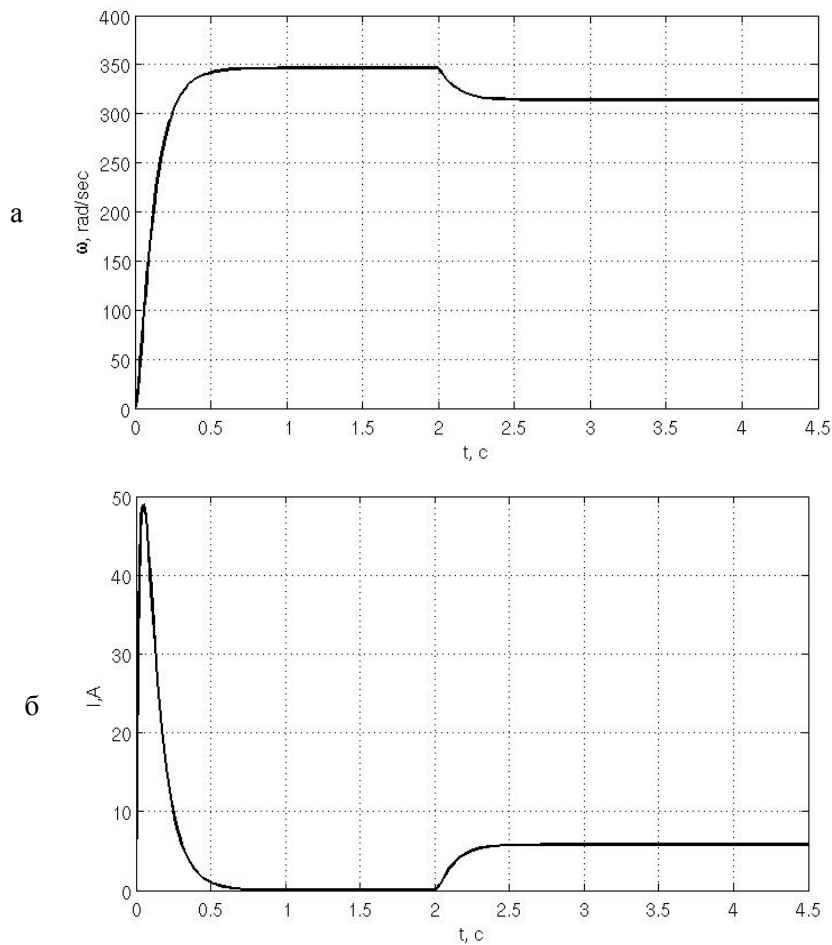
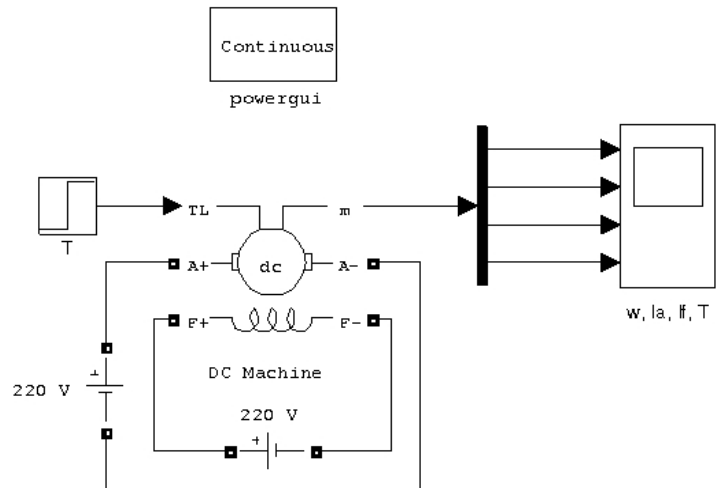


Рис. 5. Переходный процесс: а –  $\omega = f(t)$ ; б –  $I = f(t)$  при пуске ДПТ НВ на холостом ходу и последующем набросе нагрузки до  $M_C = M_H$   
Fig. 5. Transition process: а –  $\omega = f(t)$ ; б –  $I = f(t)$  at start-up excitation dc motor in idling and connection to load after

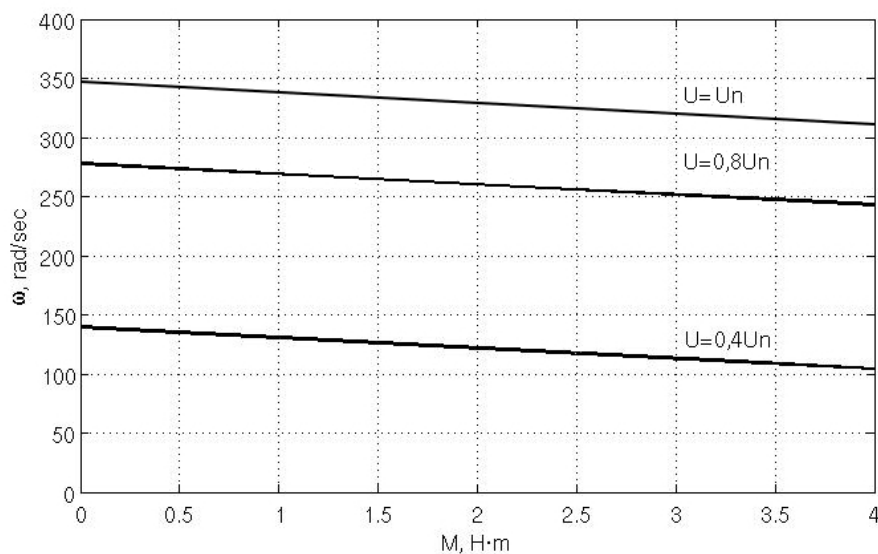


Рис. 6. Экспериментальные искусственные механические характеристики ДПТ НВ при различных значениях питающего напряжения в цепи якоря

Fig. 6. Experimental mechanical characteristics of excitation dc motor at different values of supply voltage

При таком построении моменты обеих машин будут всегда (в установившемся режиме) равны и противоположны по знаку. Для задания скорости вращения исследуемой машины постоянного тока DC Machine машина DC Machine 1 управляется от регулируемого источника.

На рис. 6 показано семейство механических характеристик ДПТ НВ при различных значениях питающего напряжения в цепи якоря исследуемого двигателя.

Кроме экспериментов над ДПТ, в Simulink также можно поставить множество исследований с трехфазными двигателями, что в реальных лабораторных условиях требует колоссальных материальных затрат.

### Список литературы

1. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
2. Герман-Галкин С.Г. MATLAB & SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.
3. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа DHV, 2005. – 512 с.
4. Ануфриев И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 1104 с.
5. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

**Сведения об авторе:** Корниенко Иван Анатольевич, ассистент,  
e-mail: kornienko.iv.an.89@gmail.com.



УДК 629.12.066

**Е.П. Матафонова**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЛОВЕ РЫБЫ НА СВЕТ**

*Приводятся общие сведения по использованию источников света в рыболовстве. Рассматриваются тенденции в светотехническом рыбопромысловом электрооборудовании и анализируются способы регулирования напряжения судового синхронного генератора.*

**Ключевые слова:** светотехническое оборудование, изменение напряжения, синхронный генератор.

**E.P. Matafonova**

## **FEATURES WORK SHIP ELECTRIC WHEN FISHING ON LIGHT**

*Provides general information on the use of light sources in fisheries. Examines trends in lighting and electrical fisheries analyzes methods of voltage regulation of ship synchronous generator.*

**Key words:** lighting equipment, a change in voltage synchronous, generator.

### **Введение**

Взаимодействие светового поля на лов рыбы широко используется в рыболовстве, при этом эффективность привлечения и удержания рыбы повышается за счет определенного изменения характеристик источников света. Существуют различные оптимизированные энергетические и спектральные характеристики светового поля, которые зависят от погодных условий, «типа» косяка, времени промысла и других факторов.

В рыболовстве применяется множество разнообразных источников света и накоплено достаточно данных о реакции рыбы и нерыбных объектов на свет различных характеристик.

Надводное освещение при лове на свет осуществляется с помощью светильников прямого света, укрепленных на судне. Мощность этих светильников (называемых люстрами) должна быть не менее нескольких киловатт, так как большая часть светового потока отражается от поверхности моря и не проникает под воду.

Способы лова рыбы на свет зависят от характера положительной реакции объекта (быстроты привлечения к источнику света, расстояния подхода, характера накапливания у источника и продолжительности нахождения в освещенной зоне), поэтому выбор техники и способы лова начинают с выявления особенностей реакции объекта на световое поле.

Варианты оборудования судов, поиска, привлечения, расстановки судов, облова косяков рыб могут быть различными. Например, изменение высоты подвеса и угла наклона светового оборудования, применение высокоинтенсивных источников света, подобранных в соответствии с реакцией объекта на свет, могут дать значительный экономический эффект.

Тип, мощность и модификация светового оборудования зависят и от способов лова.

### **Объекты и методы исследования**

На современных судах световое оборудование эффективно применяется при лове рыбы бортовыми конусными подхватами, а также с помощью рыбонасосных установок с залавливающим устройством.

Светотехническое оборудование для сайрового промысла в дальневосточных морях на судах типа СТР представляет собой трехфазную систему нагрузки, подключенную к источнику

судовой электростанции – синхронному генератору. СТР оборудованы тиристорными регуляторами мощностью 80 кВт, с помощью которых применяется многоступенчатая схема – с одного борта (светового) регулируется одно напряжение, с другого (рабочего) – другое. Люстры располагаются на разных уровнях [1]. Применяются люстры различного типа. Например, на самой большой высоте располагаются люстры увеличенной мощности типа КГП –220 В 18 кВт, которые осуществляют сбор косяков сайры (привлечение) на большей площади – рассеянное скопление (рис. 1). С помощью них сайра переходит в зону основного промышленного освещения. После того как сайра подошла непосредственно под свет бортовых светильников, расположенных по периметру судна, мощностью 4,5 кВт, приступают к переводу сайры через бак судна с правого, рабочего, на левый, световой борт путем последовательного выключения люстр от периферии к центру.

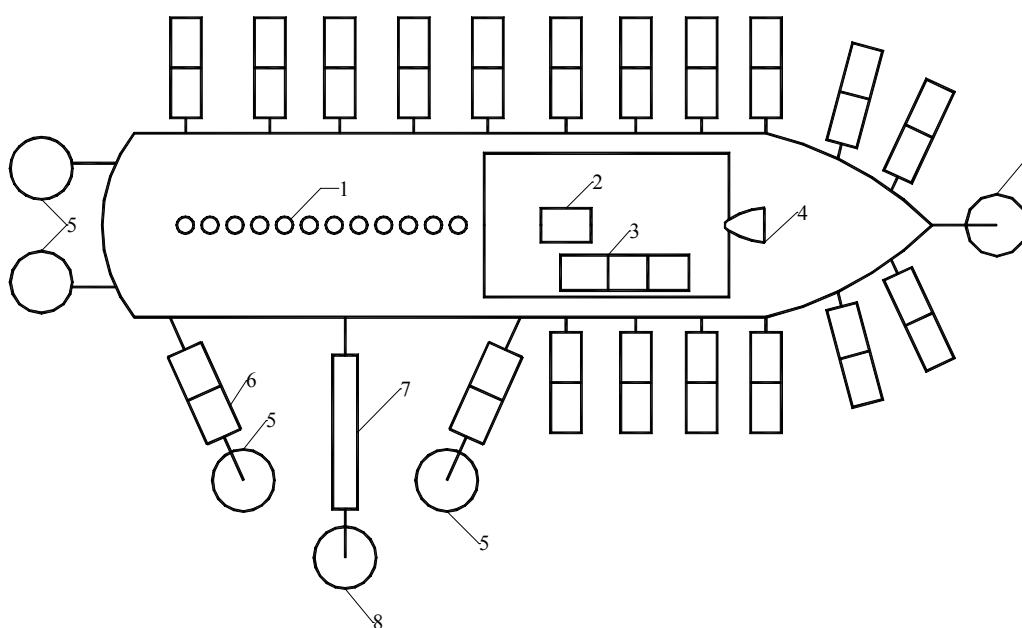


Рис. 1. Схема установки светотехнического оборудования для лова сайры на судах СТР:

1 – гирлянда дополнительного освещения; 2 – коммутатор для включения люстр; 3 – пульт управления световым потоком; 4 – прожектор промысловый ПП-90; 5 – люстра обводная 9 кВт (6 ламп КГП белых); 6 – две люстры по 3 лампы КГП-1500 в каждой; 7 – люстра увеличенной мощности (18 кВт); 8 – люстра концентрирующая (3 лампы белых 4,5 кВт + 3 лампы красных 4,5 кВт)

Fig. 1. Diagram of the installation of lighting equipment for saury fishing on vessels PAGE:

1 – garland of additional lighting; 2 – switch to turn on the chandelier; 3 – remote control light flux; 4 – Spotlight fishing PP-90; 5 – 9 kW chandelier bypass (6 lamps white CHP); 6 – two lamps on the lamp 3 PCG-1500 each; 7 – chandelier increased power (18 kW); 8 – chandelier concentrating (3 Lamp White 4,5 kW + 3 lights red 4,5 kWt)

На рис. 2 показана электрическая схема светотехнического оборудования, представляющая собой трехфазную нагрузку, соединенную по схеме «звезда», которая получает питание от судовой синхронного генератора. Включение (отключение) люстр производится постепенно по двум фазам.

Как только основной косяк подошел в зону залавливающего устройства, включают красный свет определенного спектра (3 лампы красные по 4,5 кВт – красный кварц), с помощью которого рыба еще более максимально концентрируется в районе ловушки, и включают орудие лова.

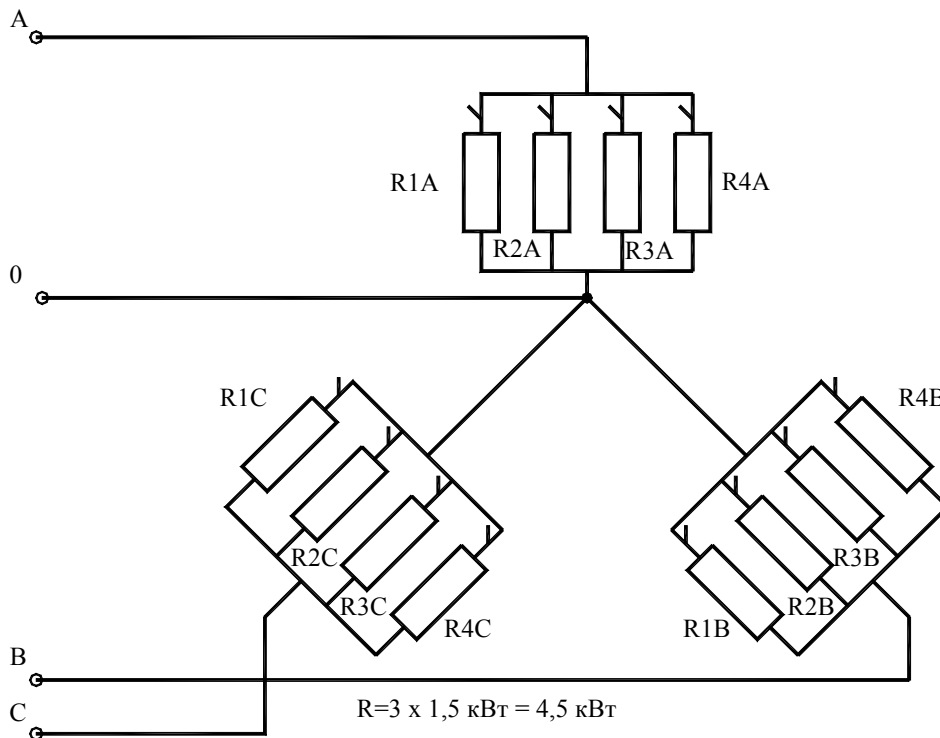


Рис. 2. Схема электрическая светотехнического оборудования  
Fig. 2. Diagram of electrical lighting equipment

В целом, в светотехническом рыбопромысловом электрооборудовании просматриваются следующие тенденции:

- источники света для лова таких рыб, как сайра, должны иметь мощность 250–300 кВт;
- регулировать световой поток нужно не только различным количеством люстр, но и изменением напряжения, подводимого к ним в пределах  $(0,3 \div 1,1)$  от 220 В, при этом изменяют спектральный состав света, что может служить важнейшим фактором концентрации рыбы и управления ее поведением.

Так как несимметрия напряжений зависит от неравномерности распределения нагрузок по отдельным фазам трехфазной системы судового электрооборудования, всю нагрузку рыбопромыслового светотехнического оборудования необходимо распределять равномерно по фазам. К каждой люстре удобно подводить питание с помощью двухпроводной линии. Поэтому в процессе поочередного отключения отдельных люстр возникает неравномерное распределение нагрузки. Люстры необходимо подключить к разным фазам так, чтобы при последовательном включении или отключении люстр в порядке их расположения вдоль борта неравномерность нагрузки не превосходила мощности одной люстры, т.е. до 10–12 кВт.

Элементы источников электропитания должны надежно работать в судовых условиях, которые характеризуются изменением частоты первичного источника, высокой влажностью, наличием качки, крена, дифферента, вибрации и ударных сотрясений [2].

Немаловажным фактором, который необходимо учитывать при выборе варианта источника, является уточнение минимальных значений суммарной массы и стоимости элементов источников электропитания. В ряде случаев определяющим критерием при выборе источника являются его габаритные размеры и занимаемая площадь, так как на некоторых находящихся в эксплуатации судах невозможно дополнительно разместить, например, трансформатор мощностью 200–300 кВт.

### Результаты и их обсуждение

Регулирование напряжения рыбопромыслового светотехнического оборудования можно осуществлять тремя способами [3]:

- 1) изменением напряжения судового синхронного генератора путем воздействия на его систему возбуждения;
- 2) использованием регулируемых трансформаторов при постоянном напряжении генераторов судовой электрической станции;
- 3) применением полупроводниковых регуляторов напряжения при неизменном напряжении генератора;
- 4) одновременным использованием первого и третьего способов, когда, например, светильники одного борта получают питание непосредственно от генератора, а другого – через преобразователь.

При первом способе необходимо использовать отдельный синхронный генератор, питающий только рыбопромысловое светотехническое оборудование. Остальные потребители электроэнергии получают питание от судовой электростанции.

При использовании второго способа регулируемый трансформатор подключается к шинам судовой электростанции наряду с остальными судовыми потребителями электроэнергии. В случае применения трансформаторов, регулируемых подмагничиванием, необходимо проверить, каков при этом коэффициент нелинейных искажений. Если он превышает допустимую норму, то для питания такого трансформатора необходимо использовать отдельный генератор, как и при первом способе.

Такую же проверку необходимо выполнить и при использовании третьего способа. Отдельный генератор, питающий полупроводниковый регулятор напряжения, необходим не только при недопустимом значении коэффициента нелинейных искажений, но и при подключении этого преобразователя и его нагрузки к нулевому выводу генератора.

Питание рыбопромыслового светотехнического оборудования от отдельного генератора можно осуществить следующими путями.

Во-первых, возможно использование в качестве источника электроэнергии автономного дизель-генератора, предназначенного для питания только рыбопромыслового светотехнического оборудования. Этому способу присущи недостатки: большие габариты и необходимость выделения места под установку, лишние затраты, дополнительное время на обслуживание и ремонт, отсутствие возможности быть резервом для других генераторов судовой электростанции.

Во-вторых, путем выделения генератора из состава судовой электростанции. Этот способ наряду с достоинством (не требует установки дополнительного дизель-генератора), имеет и следующие недостатки: а) уменьшение мощности судовой электростанции за счет отвода мощности; б) требуется модернизация ГРЩ.

В-третьих, возможно использование валогенератора с приводом от главного двигателя на судах с винтом регулируемого шага.

Для промысловых судов характерны длительные режимы работы главных двигателей (в основном дизелей) с неполной загрузкой, например, в районе промысла при операциях с тралом и т.п. В этих режимах целесообразно догружать главные двигатели, используя их одновременно для привода электрических генераторов (валогенераторов ВГ). Более высокая экономичность ВГ по сравнению с автономным генератором и выделением генератора от электростанции объясняется следующим: улучшением КПД гребных двигателей в долевых режимах их работы и меньшим удельным расходом топлива на производство электроэнергии по сравнению с менее экономичными автономными ДГ; экономией ресурса ДГ; снижением трудозатрат и других эксплуатационных расходов на обслуживание энергоустановки; не тре-

буется модернизация ГРЩ; нет отбора мощности от судовой ЭС. При лове рыбы с помощью источников света судно стоит, но его главный двигатель работает, вращая винт регулируемого шага, который при этом не создает упор. Мощность главного двигателя расходуется в основном на привод валогенератора. Такому способу присущи уже отмеченные выше недостатки, компенсирующиеся перечисленными преимуществами синхронного валогенератора.

### **Выводы**

Автономное электроснабжение рыбопромыслового светотехнического оборудования лучше осуществлять выделением синхронного валогенератора, что является недостатком этого способа.

Таким образом, наиболее приемлемым в светотехническом рыбопромысловом электрооборудовании является способ, когда полная загрузка синхронного генератора по мощности осуществляется применением полупроводникового преобразователя, который имеет меньшую массу и стоимость по сравнению с трансформаторами и позволяет регулировать напряжение потребителей (при включении нагрузки в «звезду») в широких пределах.

### **Список литературы**

1. Еремин Ю.А., Мизюркин М.П., Бойченко В.А., Балло А.В., Косьяненко В.Л. Тренажер сайровый. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2000. – 16 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 2. Российский Морской Регистр судоходства. – СПб., 2008. – 726 с.
3. Кувшинов Г.Е., Матафонова Е.П. Регулирование напряжения рыбопромыслового светотехнического оборудования. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2004. – 129 с.

**Сведения об авторе:** Матафонова Елена Петровна, кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: kafel302@gmail.com.

УДК 378.147.026.7 : 621.3 : 004

**В.Я. Молочков, И.Д. Молочкова**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, Луговая, 52б

## **СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СУДОВ**

*Приводится методика и математический аппарат исследования функционирования и устойчивости работы технических средств судов на основе моделирования их работы на ЭВМ, решение задач построения оптимальных систем регулирования технических средств судов.*

**Ключевые слова:** моделирование, суда, технические средства, оптимизация.

**V.Ya. Molochkov, I.D. Molochkova**

## **STRUCTURAL MODELS OF DYNAMIC PROCESSES IN RESEARCH SHIP'S TECHNICAL GEARS**

*In article is resulted the technique and mathematical apparatus for research the functionality and the stability ships technical systems on the basis of modeling their work on the computer, the decision of construction problems for optimum regulation ship's systems.*

**Key words:** modeling, ships, means, optimization.

### **Введение**

Исследование на этапе проектирования или модернизации существующих технических средств судов требует применения структурных и алгоритмических моделей устройства, предназначенных для решения следующих задач:

1. Проверка на устойчивость подсистем регулирования.
2. Разработка интерфейсных схем связи с входными параметрами от датчиков и выходными – к исполнительным механизмам.
3. Разработка всех уровней программного обеспечения от драйверов отдельных устройств до внешней оболочки, обеспечивающей эффективную устойчивую работу устройств.

### **Этапы и методики анализа**

Разработку системы управления можно разделить на два этапа: *структурный и алгоритмический*.

Структурный этап связан с разработкой структуры системы и ее математической модели, с анализом ее функционирования и синтезом законов управления.

Алгоритмический этап связан с разработкой алгоритмов сбора и обработки информации в процессе работы системы управления.

*Разработка математической модели управления* связана с анализом и алгоритмизацией объекта управления, с созданием *процедурной модели*, которая описывает операционные действия, изменяющие состояние основного оборудования, и действия, поддерживающие значения основных параметров в нормальных и аварийных режимах.

В настоящее время для создания моделей управления объектами используются три вида математического описания:

- передаточные функции и частотные характеристики линеаризованных систем, разрешенные относительно выходных переменных системы;

- детализированные структурные схемы или направленные графы, позволяющие составить на основе физических законов, действующих в простейших частях схемы, поэлементное описание системы;

- математическое описание с использованием понятия “пространства состояний” в виде уравнений, разрешенных относительно первых производных переменных состояний. В настоящее время для этих целей широко используется язык векторно-матричных уравнений и аппарат линейной алгебры для многомерных систем произвольного порядка с многими входами и выходами.

*Для анализа функционирования технических средств судов предпочтительны следующие две методики.*

*Первая* заключается в нахождении дискретных передаточных функций разомкнутой и замкнутой систем, с помощью которых осуществляется исследование системы в целом. Она основана на использовании метода  $z$ -преобразования (дискретного преобразовании Лапласа), логарифмических частотных характеристик и корневого годографа.

Расчет на ЭВМ позволяет осуществить переход от непрерывных систем, какими являются реальные устройства судовой автоматики к их дискретным аналогам.

Реальные системы, как правило, нелинейные полностью или на каком-то участке своего поведения. Применение ЭВМ позволяет использовать «вычислительный эксперимент» – сочетание аналитических методов с большими сериями вычислений на ЭВМ. «Вычислительный эксперимент» предназначен для изучения, прогнозирования, оптимизации сложных многопараметровых нелинейных процессов, теоретическое и экспериментальное исследование которых традиционными методами затруднено или невозможно.

Аналоговые входные и выходные сигналы преобразуются в дискретные величины с заданным шагом квантования.

Для устранения влияния дискретности  $z$ -преобразования при изучении поведения непрерывных компонентов системы применяется модифицированное  $z$ -преобразование.

*Вторая методика исследования* связана с использованием *метода пространства состояний*. Она позволяет решать задачи исследования различных систем, в том числе цифровых нелинейных. Кроме того, применение метода пространства состояний связано с использованием векторно-матричных обозначений, что не только упрощает математические выражения, но и позволяет автоматизировать процесс исследования рассматриваемых систем с помощью ЭВМ.

Процессы, исследуемые в судовом электроприводе и технологических процессах на судах, носят динамический характер и не на всем протяжении линейны. Реальные процессы заменяются их *структурными моделями* в целом системы или по частям с применением линеаризации и «замораживания».

*Структурные модели* включают динамические звенья данного устройства (гребная электрическая установка, траловая лебедка, комплекс агрегатов машинного отделения с их передаточными функциями).

### **Структурные модели в исследовании технических средств**

Необходимым условием использования структурных моделей является возможность разбиения технического средства на элементарные звенья с известными передаточными функциями.

*Структурные модели линейных систем (рис. 1) представляют в виде:*

- дифференциального уравнения  $n$ -го порядка;
- системы  $n$  дифференциальных уравнений первого порядка в развернутой или матричной форме;

- передаточной функции, которую записывают в общем виде как описание соединений типовых передаточных функций элементарных звеньев.

Линейное дифференциальное уравнение записываем в виде

$$\sum_{i=0}^n a_i p^i y(t) = \sum_{j=1}^m b_j p^j u(t), \quad (1)$$

где  $a_i$  и  $b_j$  – постоянные коэффициенты;  $p$  – символ дифференцирования;  $y(t)$  – выходная, а  $u(t)$  – входная переменные; для реальных систем  $m \leq n$ . Решение этого уравнения ищут для начальных условий

$$p^i y(0) = y_{i0}, \quad p^j u(t) = u_{j0}. \quad (2)$$

*Отношение преобразований Лапласа выходной переменной к входной при нулевых начальных условиях – передаточная функция:*

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{\sum_{j=0}^m b_j p^j}{\sum_{i=0}^n a_i p^i}, \quad (3)$$

где  $p$  – оператор Лапласа.

При  $b_j = 0$  для всех  $j \neq 0$  и  $b_0 \neq 0$  передаточная функция

$$W(p) = \frac{b_0}{\sum_{i=0}^n a_i p^i}, \quad (4)$$

а дифференциальное уравнение записывается как

$$\sum_{i=0}^n a_i p^i y(t) = b_0 u(t), \quad (5)$$

где  $p$  – символ дифференцирования.

Выходную переменную  $y(t)$  получаем путем последовательного интегрирования старшей производной  $p^n y(t)$ . Для этого потребуются  $n$  последовательно включенных интеграторов, сигналы на входах которых представляют собой производные  $y(t)$  от  $p^n y(t)$  до  $py(t)$ .

Запись дифференциального уравнения (5) в виде

$$p^n y(t) = \frac{1}{a_n} [-a_{n-1} p^{n-1} y(t) - \dots - a_1 p y(t) - a_0 y(t) + b_0 u(t)] \quad (6)$$

обнаруживает, что высшую производную  $p^n y(t)$  можно получить, умножив выходные переменные интеграторов на соответствующие коэффициенты от  $a_{n-1}$  до  $a_0$ , просуммировав результаты, вычтя эту сумму из переменной  $b_0 u(t)$  и умножив полученную таким образом переменную на коэффициент  $1 / a_n$  (рис. 1).



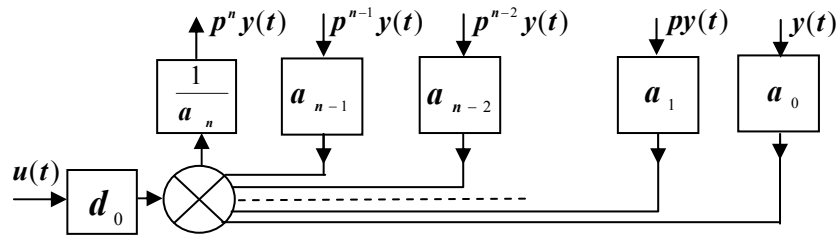


Рис. 1. Схема получения высшей производной  
Fig. 1. Scheme reception of the higher derivative

Структурная модель динамического процесса, описываемого дифференциальными уравнениями в виде (5) или (6), представлена на рис. 2.

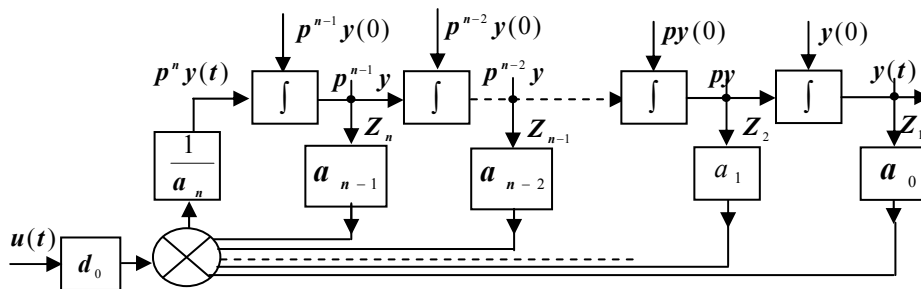


Рис. 2. Структурная модель динамического процесса  
Fig. 2. Structural model of dynamic process

Передаточную функцию легко записать (1), если заменить обозначение интеграла в соответствующих блоках модели (см. рис. 2) оператором  $1/p$ , то по этой модели можно записать передаточную функцию (4).

В ином виде можно представить динамический процесс, структура которого показана на рис. 3, используя аналитическую запись дифференциального уравнения  $n$ -го порядка (5) в виде системы  $n$  дифференциальных уравнений первого порядка с подстановками  $y(t) = z_1(t)$ ;  $py(t) = z_2(t)$  и т.д. до  $p^{n-1}y(t) = z_n(t)$  с начальными условиями  $z_i(0) = y_{i0}$ , где  $\alpha_i = a_i/a_n$  и  $\beta_n = b_0/a_n$ .

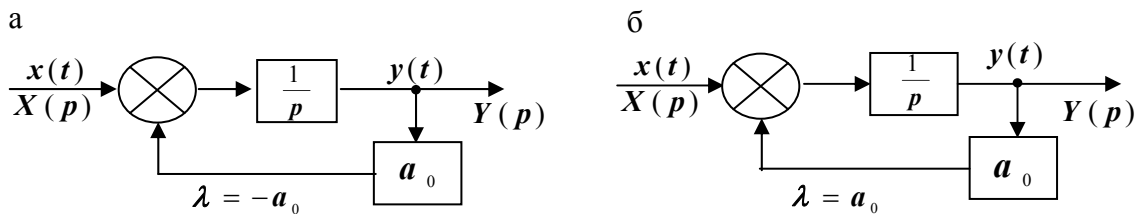


Рис. 3. Системы с отрицательной (а) и положительной обратной связью (б)  
Fig. 3. Systems with negative (a) and positive feedback (б)

Структурная математическая модель динамического процесса, показанная на рис. 2, обладает следующими преимуществами:

- во-первых, она дает наглядное представление понятию “состояние системы” как совокупности сигналов на выходах интеграторов;
- во-вторых, в явном виде представляет структуру связей между переменными в системе с обратной связью. В матричном виде структурная модель представлена на рис. 4.

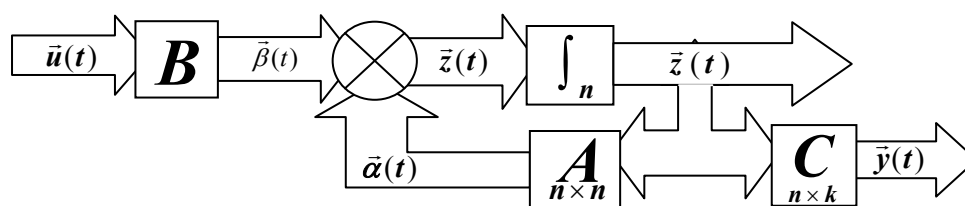


Рис. 4. Структурная модель в матричном исполнении  
 Fig. 4. Structural model in matrix execution

Последовательное  $n$ -кратное интегрирование представлено в ней  $n$ -мерным интегратором  $\int_n$ , преобразующим  $n$ -мерный вектор  $\bar{z}(t)$  в состояние системы  $\bar{z}(t)$ . Векторный сигнал  $\bar{z}(t)$  формируется  $n$ -мерным сумматором из двух компонент: вектора управления  $\bar{\beta}(t)$  и вектора обратной связи по состоянию  $\bar{\alpha}(t)$ . Матрица обратной связи  $A$  формирует сигнал  $\bar{\alpha}(t)$  из вектора состояния  $\bar{z}(t)$ . Матрица управления  $B$  преобразует  $m$ -мерный вектор входных воздействий  $\bar{u}(t)$  в  $n$ -мерный вектор управлений  $\bar{\beta}(t)$ , а матрица  $C$  преобразует  $n$ -мерный вектор состояния  $\bar{z}(t)$  в  $k$ -мерный выход

$$\bar{y}(t) = C \bar{z}(t). \tag{7}$$

Для случая, представленного развернутой структурной моделью (см. рис. 2), управление  $u(t)$  – скалярная переменная,  $m = 1$  и матрица  $B$  вырождается в вектор-столбец с единственным ненулевым коэффициентом  $\beta$ . Матрица  $C$  преобразует  $n$ -мерный вектор состояния  $\bar{z}(t)$  в одномерный скалярный выход  $y(t) = z_1(t)$ .

Передаточную функцию (4) можно представить в виде произведения элементарных сомножителей

$$W(p) = \frac{b_0}{a_n} \frac{1}{p - \lambda_1} \frac{1}{p - \lambda_2} \dots \frac{1}{p - \lambda_n} = \frac{b_0}{a_n} \prod_{i=1}^n \frac{1}{p - \lambda_i}, \tag{8}$$

где  $\lambda_i$  – корни характеристического уравнения

$$\sum_{i=1}^n a_i p^i = 0. \tag{9}$$

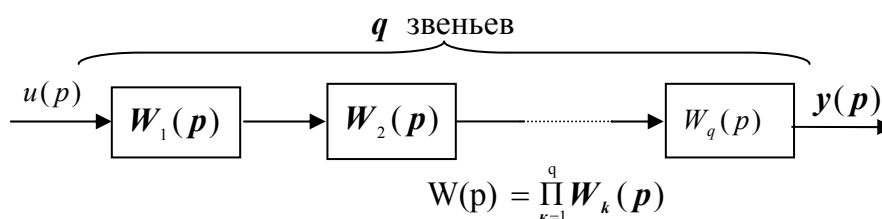


Рис. 5. Последовательное соединение элементарных звеньев  
 Fig. 5. Consecutive connection of elementary links

Корни уравнения (9) являются действительными или комплексно-сопряженными числами.

Передаточная функция системы, показанной на рис. 3, а, имеет вид

$$W_a(p) = \frac{1}{(p + a_0)}. \quad (10)$$

Для системы с положительной ОС (см. рис. 3, б) коэффициент в цепи ОС – корень характеристического уравнения, и поэтому эта структурная модель непосредственно реализует сомножитель вида  $1 / (p - \lambda)$ . Соответствующее ему типовое звено называют *аперидическим* или *инерционным*.

Передаточную функцию приводим к виду со свободным членом в знаменателе, равным единице:

$$W_a(p) = \frac{k}{T_a p + 1}, \quad (11)$$

где  $T_a = 1 / a_0$  и  $k = 1 / a_0 = T_a$ .

Для структурной модели с несколькими контурами обратной связи передаточная функция колебательного звена равна

$$W_k(p) = \frac{1}{p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (12)$$

При  $a_1 = 0$  она принимает вид

$$W_k(p) = \frac{1}{p^2 + a_c}. \quad (13)$$

Характеристическое уравнение  $p^2 + a_0 = 0$  имеет чисто мнимые сопряженные корни

$$p_{1,2} = \pm j\sqrt{a_0} = \pm jw_0, \quad (14)$$

а реакция звена (13) на ступеньку на входе представляет собой незатухающие гармонические колебания с частотой  $w_0$ . Коэффициент  $a_0$  равен квадрату резонансной частоты колебательного звена. При  $a_1 \neq 0$  характеристическое уравнение имеет корни

$$p_{1,2} = \lambda_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1}{2}\right)^2 - a_0}. \quad (15)$$

При  $a_1 / 2 < w_0$  корни становятся комплексно-сопряженными

$$p_{1,2} = \lambda_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm jw_0 \sqrt{1 - \left(\frac{a_1}{2w_0}\right)^2}. \quad (16)$$

Собственная частота  $w_1$  равна

$$w_1 = w_0 \sqrt{1 - \left(\frac{a_1}{2w_0}\right)^2}. \tag{17}$$

Она проявляется в виде частоты колебаний на выходе звена при ненулевых начальных условиях или при подаче на вход звена единичной ступеньки вида

$$h(t) = k \left[ 1 - e^{-\beta t} \left( \cos w_1 t + \frac{\beta}{w_1} \sin w_1 t \right) \right] \cdot 1[t].$$

Параметр  $\xi = a_1 / 2w_0$  называют степенью затухания, а  $\beta = \xi w_0$  – коэффициентом затухания. Коэффициент модели  $a_1 = 2w_0\xi = 2\beta$  равен удвоенному коэффициенту затухания  $\beta$ .

Передаточную функцию колебательного звена

$$W_k(p) = \frac{1}{p^2 + 2\xi w_0 p + w_0^2} \tag{18}$$

часто приводят к виду со свободным членом в знаменателе, равным 1:

$$W_k(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi w_0 T p + 1}, \tag{19}$$

где  $T = 1 / w_0$  – постоянная времени колебательного звена; в нашем случае  $k = T^2 = 1 / a_0$ .

Структурная модель, показанная на рис. 6, реализует пару сомножителей вида  $\frac{1}{p - \lambda} \cdot \frac{1}{p - \lambda^*}$ , соответствующих паре комплексно-сопряженных корней  $\lambda, \lambda^* = -\beta \pm jw_1$ .

Запись передаточной функции в виде произведения дробей (8) можно рассматривать как еще одно аналитическое представление системы. Также это представление возможно в виде последовательно соединенных элементарных звеньев, приведенных на рис. 3, б и 5, соответствующих корням характеристического уравнения (8) этой системы (рис. 6).

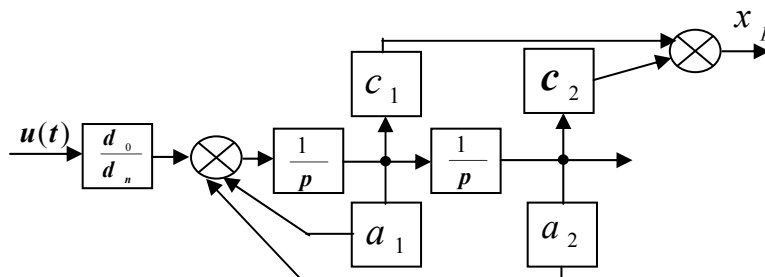


Рис. 6. Схема с комплексно-сопряженными корнями  
Fig. 6. Scheme with complex conjugate roots

Передаточную функцию (8) в случае действительных различных корней можно преобразовать к виду

$$W(p) = \frac{b_0}{a_n} \prod_{i=1}^n \frac{1}{p - \lambda_i} = \frac{b_0}{a_n} \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{p - \lambda_i}, \tag{20}$$

соответствующему параллельному соединению элементарных звеньев вида  $1 / (p - \lambda_i)$  (рис. 7).

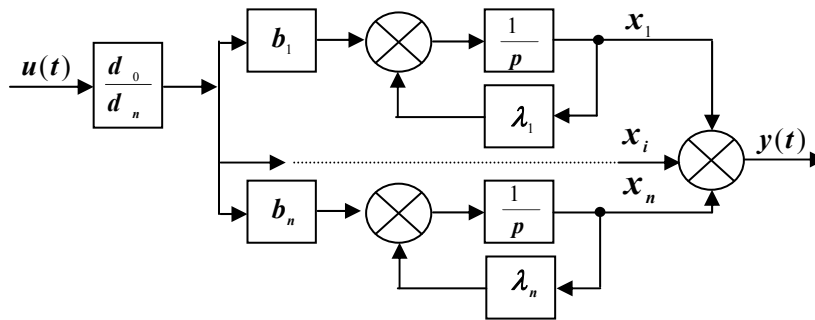


Рис. 7. Параллельное соединение элементарных звеньев  
Fig. 7. Parallel connection of elementary links

Значение коэффициента  $\beta_i$  находят как вычеты функции комплексного переменного  $W(p)$  в полюсах или рассчитывают методом неопределенных коэффициентов. Такая модель непосредственно соответствует аналитической записи общего решения как линейной комбинации частных решений, определяемых корнями характеристического уравнения в виде

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t}, \quad (21)$$

где  $c_i$  – коэффициенты, рассчитываемые по начальным условиям.

Эта модель удобна для графоаналитического расчета переходной характеристики системы как суммы переходных характеристик входящих в ее состав типовых звеньев.

В случае кратных действительных корней можно использовать структурную модель, показанную на рис. 8.

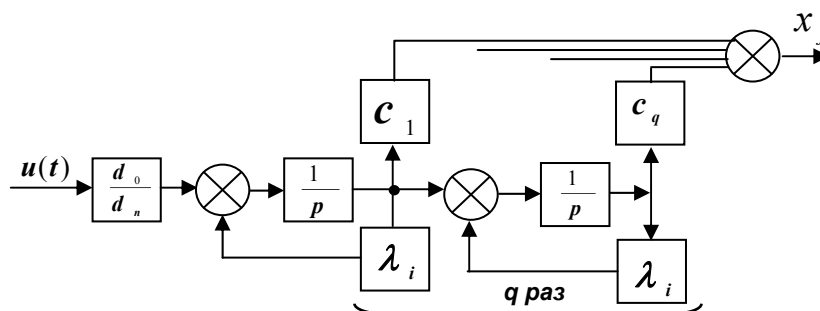


Рис. 8. Схема с действительными корнями  
Fig. 8. The Scheme with the valid roots

Коэффициенты  $C_i$  для этих моделей удобнее всего рассчитать методом неопределенных коэффициентов. В матрице  $\Lambda$  колебательным звеньям соответствуют элементы вида

$$\begin{vmatrix} -\beta & w_1 \\ -w_1 & -\beta \end{vmatrix}$$

Для системы с передаточной функцией общего вида

$$W(p) = \frac{\sum_{k=0}^m b_k p^k}{\sum_{i=0}^n a_i p^i} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} \dots b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} \quad (22)$$

запишем изображение Лапласа выходной переменной  $y(p)$  как

$$y(p) = \sum_{k=0}^m b_k p^k \frac{1}{\sum_{i=0}^n a_i p^i} u(p). \quad (23)$$

Введем дополнительную переменную  $z(p)$  в виде

$$z(p) = \frac{1}{\sum_{i=0}^n a_i p^i} u(p), \quad (24)$$

передаточная функция для которой  $W(p) = z(p) / u(p)$  совпадает с передаточной функцией (4) при  $b_0 = 1$ .

Из соотношений (23) и (24) можно записать

$$y(p) = \sum_{k=1}^m b_k p^k z(p). \quad (25)$$

Из этого уравнения следует, что сигнал  $y(t)$  можно получить суммированием компонент состояния с выходов интеграторов, умноженных на соответствующие коэффициенты от  $b_0$  до  $b_{n-1}$  при  $m = n$  и высшей производной  $p^n z(t)$ , умноженной на коэффициент  $b_n$  (рис. 9).

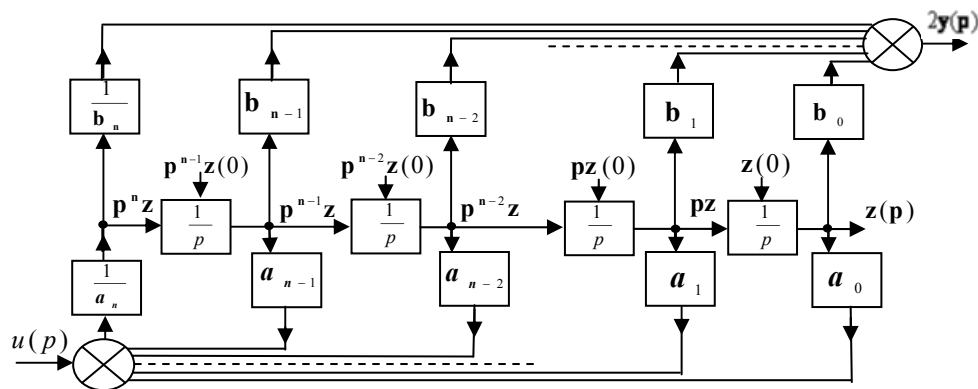


Рис. 9. Структурная модель систем общего вида  
Fig. 9. Structural model of systems of a general view

Если  $m < n$ , то коэффициенты  $b_k = 0$  для всех  $k > m$ . В таком представлении  $n$ -мерный интегратор с матрицей обратной связи и  $n$ -мерным сумматором на входе (см. рис. 2) по-прежнему моделирует преобразование скалярного входа  $u(t)$  в состояние системы  $\vec{z}(t)$ , в совокупность коэффициентов  $b_i$ .

Сумматор 2 на рис. 9 представляет блок  $C$  структуры на рис. 2, преобразующий состояние  $\vec{z}(t)$  в скалярный выходной сигнал  $y(t)$  таким образом, чтобы зависимость последнего от входного сигнала  $u(t)$  удовлетворяла дифференциальному уравнению общего вида (1).

Другой вариант структурной модели для системы общего вида показан на рис. 10.

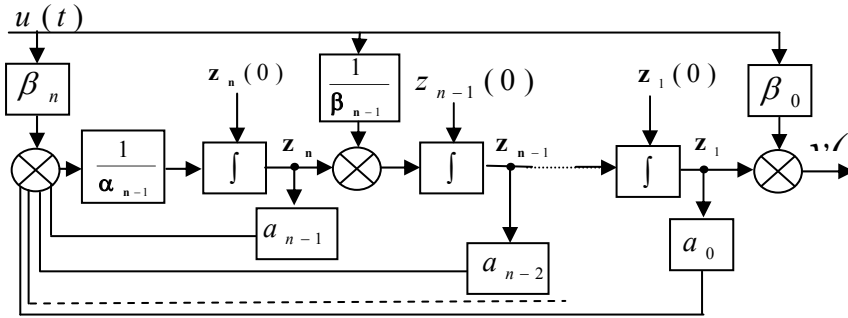


Рис. 10. Вариант структурной модели для систем общего вида  
Fig. 10. Variant of structural model for systems of the general

Коэффициенты  $\beta_k$  этой модели рассчитывают по формулам

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= \frac{1}{a_n} b_n; \\ \beta_1 &= \frac{1}{a_n} (b_{n-1} - \beta_0 a_{n-1}); \\ \beta_2 &= \frac{1}{a_n} (b_{n-2} - \beta_0 a_{n-1} - \beta_1 a_{n-1}); \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

По структурной модели (см. рис. 10) получаем систему  $n$ -уравнений первого порядка

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= z_2(t) + \beta_1 u(t); \\ \dot{z}_2(t) &= z_3(t) + \beta_2 u(t); \\ &\dots \\ \dot{z}_n(t) &= -\frac{1}{a_n} \sum_{i=0}^n a_i z_i(t) + \frac{\beta_n}{a_n} u(t), \end{aligned} \right. \quad (27)$$

представляем ее в развернутой матричной форме

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1(t) \\ \dot{z}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{z}_{n-1}(t) \\ \dot{z}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots & -\alpha_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \vdots \\ z_{n-1}(t) \\ z_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{n-1} \\ \beta_n \end{bmatrix} u(t), \quad (28)$$

где  $\alpha_i = a_i / a_n$

и записываем векторное уравнение

$$\dot{\bar{z}}(t) = A\bar{z}(t) + \bar{B}u(t). \tag{29}$$

Структурная модель на рис. 10 показывает, что и в этом случае состояние системы  $\bar{z}(t)$  есть совокупность сигналов на выходах интеграторов (см. рис. 2), но их входные сигналы формируются как линейные комбинации компонент состояния  $z_i(t)$  и управлений от вектора входных коэффициентов  $\bar{B}$  (блок  $B$  и сумматор на рис. 2). Скалярный выход  $y(t)$  формируется из компонента  $z_1(t)$  и управления  $u(t)$  как  $y(t) + \beta_0 u(t)$ .

Передаточную функцию общего вида (22) можно разложить на элементарные сомножители, найдя не только ее полюса (10), но и нули, как корни уравнения

$$b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0 = 0, \tag{30}$$

которое получают, приравняв нулю числитель передаточной функции.

Передаточная функция в виде произведения элементарных сомножителей

$$W(p) = \frac{\prod_{k=0}^m (p - \gamma_k)}{\prod_{i=0}^n (p - \lambda_i)}, \tag{31}$$

где  $\lambda_i$  – полюса и  $\gamma_k$  – нули передаточной функции, рассматривают как последовательное соединение типовых звеньев следующего вида:

- инерционно-дифференцирующего звена

$$W_1(p) = \frac{p - \gamma_\ell}{p - \lambda_\ell}; \tag{32}$$

- колебательного звена с дифференцированием

$$W_2(p) = \frac{p - \gamma_r}{p^2 + 2\xi w_{0r} p + w_{0r}^2}; \tag{33}$$

- колебательного звена с двойным дифференцированием

$$W_3(p) = \frac{p^2 + 2\xi_s w_{0s} p + w_{0s}^2}{p^2 + 2\xi_q w_{0q} p + w_{0q}^2}. \tag{34}$$

Их структурные модели получаются как частные случаи общих моделей (см. рис. 10) при  $n = 1$  и  $2$ .

Если собственные значения  $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$  матрицы  $A$  системы – действительные различные числа, то используем преобразование

$$\bar{x}(t) = P^{-1} \bar{z}(t), \tag{35}$$



где  $P$  – матрица Вандермонда.

Систему (35) можно преобразовать к виду

$$\vec{\dot{x}}(t) = \Lambda \vec{x}(t) + P^{-1} \vec{B}u(t), \quad (36)$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица собственных значений.

Преобразование изменяет вектор управления

$$\vec{U} = P^{-1} \vec{b}. \quad (37)$$

Используя последнее соотношение, можно записать

$$\vec{\dot{x}}(t) = \Lambda \vec{x}(t) + \vec{U}u(t). \quad (38)$$

Система (32) отличается вектором управления, компоненты которого  $u$  равны вычетам передаточной функции системы в полюсах и могут быть рассчитаны методом неопределенных коэффициентов.

### Выводы

Рассмотренные варианты математического описания структурных представлений динамических процессов могут служить при разработке новых технических средств судов и исследования существующих для следующих целей :

- разработки программного обеспечения для анализа динамических характеристик технических средств судов;
- исследования динамических характеристик технических средств судов в различных режимах работы, особенно в граничных режимах работы.

### Список литературы

1. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: практическое руководство / пер. с англ. – М.: Мир, 1992. – 238 с.
2. Баутин Н.Н. Поведение динамических систем вблизи границы области устойчивости. – М.: Наука, 1994. – 176 с.
3. Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах. – М.: Наука, 1990. – 312 с.

**Сведения об авторах:** Молочков Валентин Яковлевич, кандидат технических наук, доцент, e-mail: val\_mol@mail.ru;  
Молочкова Ирина Дмитриевна, доцент.

УДК 532.526 + 656.61

**В.А. Плоткина<sup>1</sup>, П.А. Стародубцев<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-Морского флота «Военно-морская академия  
имени адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (филиал, г. Владивосток),  
690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6**МЕТОДЫ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ  
В МОРСКОЙ ТЕХНИКЕ**

*Рассматривается концепция способов и методов управления пограничным слоем в приложении механики жидкости морской техники. Раскрывается актуальность исследовательских процессов в области теории пограничного слоя.*

**Ключевые слова:** пограничный слой, морская техника, невязкая и вязкая жидкости.

**V.A. Plotkina, P.A. Starodubtcev****METHODS AND MEANS OF BOUNDARY LAYER MARINE APPLICATIONS**

*This article examines the concept of means and methods of controlling the boundary layer in the application of fluid mechanics marine equipment. Revealed the relevance of research in the field of boundary layer theory.*

**Key words:** boundary layer, marine engineering, in viscid and viscous fluids.

Управление пограничным слоем характеризует исследовательский аспект выявления гидродинамических свойств подвижных объектов. Одной из основных задач при увеличении скорости движения судна остается влияние сил трения на ход движения при одновременном увеличении сопротивления движению, которые возникают в результате вязкости жидкости.

Как известно, свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части относительно другой проявляется способностью быть вязкой. Вязкость отражает свойство жидкости сопротивляться относительному перемещению или сдвигу соседних частиц.

Для иллюстрации эффекта вязкости рассматривается обтекание плоской твердой поверхности потоком невязкой и вязкой жидкости в том числе. В невязкой (идеальной) жидкости (рис. 1, а) скорость потока по мере приближения к стенке не изменяется, жидкость свободно проскальзывает вдоль нее. Во втором случае (рис. 1, б) ближайšie к твердой поверхности частицы жидкости в результате трения «прилипают» к ней, так что скорость потока на ней становится равной нулю. По мере удаления от стенки частицы жидкости сдвигаются друг относительно друга, так как силы взаимного притяжения между молекулами самой жидкости меньше сил притяжения между молекулами и твердой стенкой. Однако эти силы будут препятствовать сдвигу, благодаря чему между слоями возникают касательные напряжения. По мере удаления от стенки скорости жидких частиц постепенно нарастают до заданной скорости набегающего потока (рис. 1, б). При умеренных давлениях вязкость жидкости, в частности воды, с повышением температуры падает.

Основной закон вязкого течения (жидкости) был установлен английским физиком, астрономом и математиком Исааком Ньютоном в 1687 г. для тонкого слоя жидкости, зажатою между пластинами, движущимися параллельно с разными скоростями  $v_1$  и  $v_2$ . Векторы скорости по всему слою жидкости направлены параллельно, модуль скорости линейно зависит от поперечной координаты (рис. 2). Закон утверждает, что на пластины будет действовать сила, величина которой определяется формулой

$$\tau = F_{\tau} = \mu \frac{v_1 - v_2}{\Delta Z} \cdot S,$$

где  $\tau$  – касательные напряжения;  $F_{\tau}$  – касательная к поверхности пластин сила, вектор которой совпадает по направлению с векторами  $v_1$  и  $v_2$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $v_1$  – скорость движения тонкого слоя жидкости относительно движения второго (последующего) слоя;  $v_2$  – скорость движения второго слоя жидкости (рис. 2);  $S$  – площадь слоя, по которому происходит сдвиг;  $\Delta Z$  – поперечная толщина исследуемого слоя.

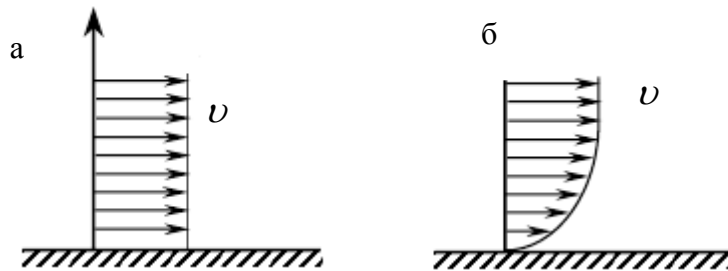


Рис. 1. Эпюры скоростей обтекания стенки жидкостью:  
а – невязкой жидкостью; б – вязкой жидкостью

Fig. 1. Flow velocity profile wall liquid: а – a non-viscous liquid, б – a viscous liquid

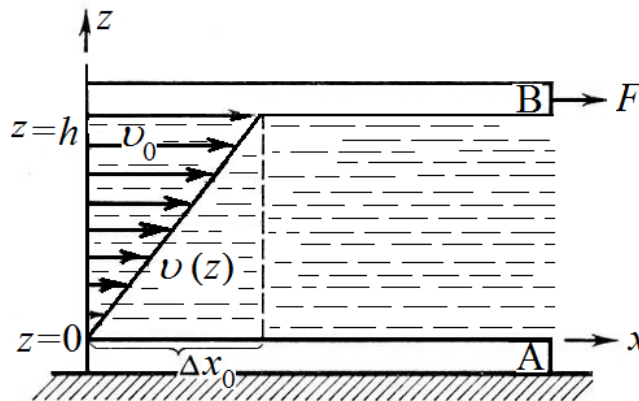


Рис. 2. Схема однородного вязкого течения слоя жидкости высотой  $h$ , заключенного между двумя твердыми пластинками, из которых нижняя А неподвижна, а верхняя В под действием тангенциальной силы  $F$  движется с постоянной скоростью  $v_0$ ;

$v(z)$  – зависимость скорости слоя от расстояния  $z$  до неподвижной пластинки

Fig. 2. Schematic of a homogeneous viscous flow of the liquid layer height  $h$ , enclosed between two solid plates, of which the lower A is fixed, and the top B in under the action of the tangential force  $F$  moves with constant velocity  $v_0$ ;  $v(z)$  – dependence of the velocity layer the distance  $z$  from the fixed plate

Коэффициент пропорциональности  $\mu$  называется коэффициентом динамической вязкости или просто вязкостью. Он характеризует сопротивление жидкости смещению ее слоев относительно кормовой части судна. Кинематической вязкостью  $\nu$  называется отношение динамической вязкости к плотности жидкости. В гидромеханике жидкости широко используется понятие кинематической вязкости.

У реальных жидкостей в основе вязкого трения лежит процесс обмена импульсами молекул, поэтому кинематическую вязкость часто называют в теории пограничного слоя коэффициентом кинематической молекулярной вязкости [1].

В развитие методов и способов управления пограничным слоем в приложении гидродинамики жидкости, подчиняющиеся основному закону вязкости жидкости или закону трения Ньютона, называются ньютоновскими жидкостями. Существуют и неньютоновские жидкости, у которых вязкие свойства более сложны (например: масла, пасты, смолы и др.). Ньютоновские и неньютоновские жидкости в последнее время вызывают активный интерес не только ученых, но и простых людей. Это связано с тем, что неньютоновская жидкость легко изготавливается своими руками и подходит для домашних опытов.

Формирование методов и способов управления пограничным слоем на этапах развития механики жидкости позволяет ученым-мыслителям и изобретателям-экспериментаторам провести теоретические выводы и лабораторные исследования в приложении развития теории сопротивления движения судов. Сопротивление жидкости, в частности воды, движению судов характеризуется необходимостью введения в практическую гидравлику отдельной теории, изучающей движение жидкости. В результате исторически возникла необходимость в выявлении теории гидродинамики жидкости, которая берет свое начало в результате развития гидростатических основ гидравлики как целостной науки. В свою очередь основы, положенные в развитие гидродинамики, служат первоначальным этапом возникновения необходимости в выделении отдельного направления, такого как «теория пограничного слоя».

Важно отметить следующее: рассмотренные предпосылки являются основополагающими как в дальнейшем развитии гидродинамики, так и в необходимости выделения отдельного научного направления под названием «теория пограничного слоя».

В настоящее время ученые, изобретатели и соискатели стремятся совершенствовать методику и способы управления пограничным слоем вблизи кормовой оконечности судна. При этом немаловажную роль играет исторический аспект формирования обводов корпуса корабля. Внешние очертания корпуса корабля задаются теоретическим чертежом корабля при проектировании и зависят от назначения судна, его размеров, скорости, района плавания, автономности и других условий. В значительной степени методы и способы управления пограничным слоем в кормовой оконечности судна определяются сопротивлением пограничного слоя воды его движению, напрямую связанным со свойством жидкой (морской или речной) среды быть вязкой.

XXI в. дал толчок совершенствованию различных методик по управлению пограничным слоем. Самыми актуальными являются методики, разработанные в совокупности сопоставления гидродинамических и аэродинамических аспектов исследовательской деятельности изобретателей.

Таким образом, современные экспериментальные исследования разграничивают теорию пограничного слоя на ламинарную и турбулентную. Данные исследования теории ламинарного пограничного слоя развиваются и ставят перед собой задачу определять новую методику измерений при сравнении их с классической методикой, т.е. совершенствование методов измерений параметров пограничного слоя. При всем многообразии методов исследования пограничного слоя до сих пор остается актуальным поиск методов, конкретизирующих реалистичность их применения. Поэтому группа ученых Калининградского государственного технического университета: А.В. Гриценко, Н.А. Мыслицкая, А.М. Иванов, И.Г. Самусев – на основе данных экспериментальных измерений методом фотонной корреляционной спектроскопии получили оценочные значения коэффициентов диффузии в 2–3-миллиметровом участке вязкого пограничного слоя для ламинарного потока при малых значениях числа Рейнольдса  $Re$ .

Метод фотонной корреляционной спектроскопии хорошо зарекомендовал себя в исследованиях микроструктуры жидкости в силу следующих особенностей: высокая пространственная и временная разрешающая способность ( $\Delta r \sim 0,1$  мм;  $\Delta t \sim 10^{-9}$ – $10^3$  с), оптическое из-

лучение не возмущает исследуемую среду, отсутствие инерционности. Благодаря этим преимуществам метод получил широкое распространение в гидродинамических исследованиях, связанных с развитием морской техники.

Калининградские ученые для проведения исследований собрали экспериментальную установку (рис. 3). В процессе эксперимента исследовались процессы, протекающие в пристеночном слое ламинарного потока при малой скорости направленного переноса. В результате проведенных исследований ламинарного потока при малых значениях  $Re$  было получено подтверждение ранее полученных экспериментальных и теоретических результатов, т.е. отчетливое разделение потока на слои – вязкий подслой, буферная зона и ядро. Большая разрешающая способность и другие свойства фотонной корреляционной спектроскопии позволили провести исследования потока. В результате обнаружили хороший потенциал метода применительно к дальнейшим исследованиям пограничного слоя в развитии морской техники, процессов седиментации или осаждения (оседание частиц дисперсной фазы в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил) и деседиментации частиц, взвешенных в потоке жидкости [2]. Данный эксперимент раскрыл потенциал исследовательской базы ламинарного пограничного слоя применительно к нуждам морского рыболовства Российской Федерации.

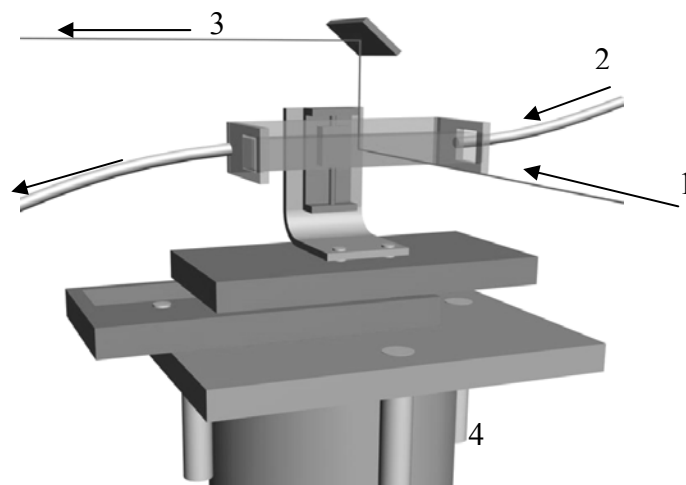


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – источник излучения: одномодовый He-Ne лазер (15 мВт; 632,8 нм); 2 – кювета размером (150/20/20 мм) с рассеивающими на входе и выходе сетками, через которые проходил поток дистиллированной воды; 3 – фотоэлектронное устройство «Photocor Instruments», работающее в режиме счета фотонов; 4 – коррелятор «Photocor-FC» 32-битный 282-канальный (разрешающая способность 25 нс), подключенный к компьютеру  
Fig. 3. Experimental setup: 1 – light source: a single-mode He-Ne laser (15 mW, 632.8 nm); 2 – cell size (150/20/20 mm) with scattering at the entrance and exit grids through which a stream of distilled water; 3 – photoelectron device «Photocor Instruments», working in photon counting mode; 4 – correlator «Photocor-FC» 32-bit 282-channel (25 ns resolution) connected to a computer

В морской отрасли результативными являются исследования турбулентных течений. Исследование турбулентных пограничных слоев без градиента давления позволяет определить предельную высоту элементов шероховатости, которая при обтекании корпуса корабля не вызывает увеличения сопротивления. Для кораблей допустимая высота шероховатости составляет несколько сотых миллиметра. Практически такая степень гладкости для судна неосуществима. Поэтому при проектировании кораблей необходимо считаться со значитель-

ным повышением сопротивления вследствие шероховатости, что влияет на маневренные качества кораблей. В морских силах для оценки ходовых качеств корабля целесообразно рассматривать трехмерные пограничные слои. Исследование пограничного слоя на телах вращения или турбулентного трехмерного пограничного слоя позволяет выявить влияние центробежных сил гребного винта на управляемость корабля.

Связь между распределением скоростей и распределением температуры раскрывает теория турбулентного пограничного слоя с учетом сжимаемости течения. Корпус кораблей представляет собой сложное инженерное сооружение, которое должно учитывать взаимосвязь всех факторов. На практике кормовая часть и обводы корпуса судна диктуются требованиями: минимальное сопротивление при движении и минимальный уровень создаваемого гидроакустического давления. Результативность данных требований на морских кораблях решается конструктивно. А именно, у морских кораблей передняя часть носа заострена (рис. 4). Именно возникающее внутренне трение в жидкости характеризует наличие данных конструктивных решений.



Рис. 4. Фотографии рыболовецких судов с заостренной кормовой частью  
Fig. 4. Photos of fishing vessels with a pointed aft

Турбулентность возникает самопроизвольно, когда соседние области морской среды следуют рядом или проникают один в другой, при наличии перепада давления или при наличии силы тяжести, или когда области среды обтекают непроницаемые поверхности. Она может возникать при наличии вынуждающей случайной силы. Обычно внешняя случайная сила и сила тяжести действуют одновременно. Например, при маневрировании рыболовного судна по акватории внутри морской воды возникают силы, способствующие перемешиванию частиц жидкости, вызывающие впоследствии турбулентность. Мгновенные параметры потока (скорость, температура, давление, концентрация примесей) при этом хаотично колеблются вокруг средних значений, что может привести к гидравлическим потерям, например, в трубопроводе корабельных систем, появлению неустановившегося движения жидкости и другим нежелательным явлениям. Теоретические основы турбулентности как основополагающей теории турбулентного пограничного слоя далеки до завершения, поэтому широкое распространение в морской области нашли полуэмпирические феноменологические модели.

Разработанные математические модели позволили сформировать математическую теорию пограничного слоя. При этом большой вклад на начальном этапе внес российский ученый, профессор, доктор физико-математических наук Сергей Александрович Ломов. Впервые теория пограничного слоя излагается с позиции особых точек теории дифференциаль-

ных уравнений. С.А. Ломов предложил новый подход к понятиям асимптотического ряда и псевдоаналитической функции. Пограничный слой представляется в виде псевдоаналитической функции. Новый подход на базе метода регуляризации сингулярных возмущений позволил сформулировать критерий правильности математического описания пограничного слоя и развить регулярную теорию для сингулярно возмущенных задач [3]. Ученик С.А. Ломова Г.С. Каниев в своей кандидатской диссертации продолжил развитие метода регуляризации на параболические задачи с дискретным и непрерывным спектром.

Большинство математических моделей, которые используются в инженерных расчетах, относятся к моделям турбулентной вязкости для исследования простых и сложных течений, окружающих корабль. А также к моделям турбулентной теплопроводности, моделям для учета шероховатости поверхности корабля, моделированию двухфазного турбулентного пограничного слоя, моделированию эффектов воздействия на пограничный слой слабых растворов полимерных и других добавок и многим другим моделям.

Математическим моделированием теории турбулентного пограничного слоя занимаются и зарубежные ученые. В частности, украинские ученые Национального авиационного университета В.Т. Мовчан и Е.А. Шквар сформулировали основные вехи исследований в области моделирования турбулентных течений вязкой жидкости. Учеными была предложена алгебраическая модель с поправочными коэффициентами на исследование отрывного течения пограничного слоя. Полученные результаты В.Т. Мовчан и Е.А. Шквар сравнили посредством сопоставления выполненных расчетов с экспериментальными данными турбулентных пограничных слоев. В итоге украинские исследователи представили результаты моделирования турбулентной вязкости, продемонстрировав преимущества разработанной математической модели [4]. Как следует из представленных результатов, расчеты в целом адекватно воспроизводят тенденции изменения рассчитываемых параметров турбулентного течения.

Гидравлические системы характеризуют совокупность элементов, воздействующих на текучую среду таким образом, что свойства каждого элемента оказывают влияние на состояние текучей среды во всех элементах системы. В гидросистемах уменьшение гидравлического напора характеризуется потерей энергии движущейся жидкости. Источником потерь во всех случаях является вязкость жидкости. В результате в данных системах возникает увеличение гидравлического сопротивления при перекачивании жидкости, например по трубопроводу. В итоге возникает необходимость в дополнительных устройствах, назначение которых снижать гидравлическое сопротивление. При наличии большого гидравлического сопротивления в трубопроводах корабельных систем может возникнуть обводнение, изнашивание и другие нежелательные явления, приводящие к нарушению работоспособности всех агрегатов корабля в целом. В рыболовецком деле данные явления недопустимы, поэтому ученые выполняют дополнительно поиск решения данной проблемы. Данными изысканиями озабочены многие ученые-экспериментаторы. В частности, в 2005 г. группа ученых Волгоградского государственного технического университета: А.Б. Голованчиков, Л.А. Ильина, А.В. Ильин, Н.А. Дулькина, А.Б. Дулкин, Д.С. Карашук – запатентовали устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе (рис. 5) может применяться в гидравлической, химической, нефтехимической, фармакологической и других отраслях промышленности, связанных с гидротранспортом вязких ньютоновских и неньютоновских жидкостей, суспензий и растворов [5]. Но особенно данное устройство актуально в трубопроводах гидросистем морских кораблей. При этом нельзя исключать и возможность применения других запатентованных устройств.

Предложенное устройство позволяет создать в трубопроводах корабельных систем устойчивый пристенный газовый слой из электролитических газов при небольших расходах электроэнергии и параметрах электричества. Таким образом, осуществляя управление пограничным слоем с помощью изменения токовых параметров, можно оптимизировать процесс

перекачивания жидкости с образованием устойчивого газового или жидкого слоя необходимой толщины в зависимости от удельного электрического сопротивления текучей среды, давления и расхода.

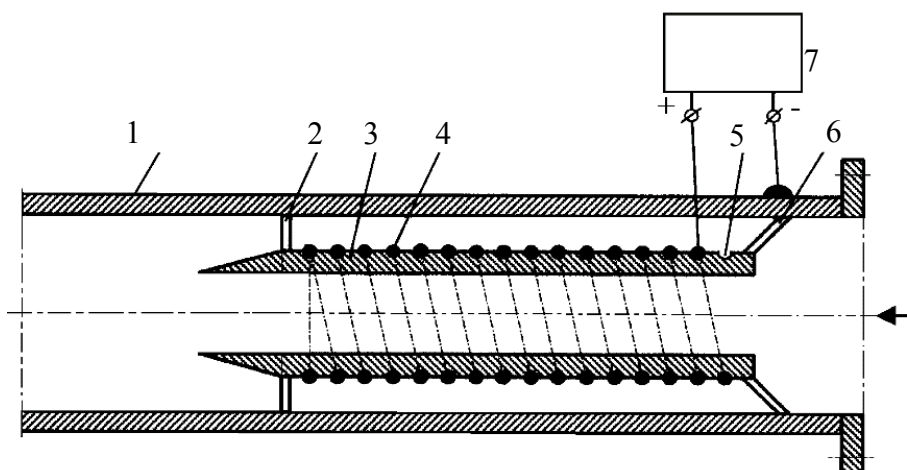


Рис. 5. Схема устройства для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе: 1 – трубопровод; 2 – опора; 3 – трубки; 4 – проволока; 5 – спиральные канавки; 6 – опора; 7 – источник тока  
 Fig. 5. Diagram of the device to reduce the hydraulic losses in the pipeline: 1 – line; 2 – suspension; 3 – tube; 4 – wire; 5 – spiral groove; 6 – bearing; 7 – current source

С характером распределения давления в пограничном слое связано явление отрыва пограничного слоя от стенки трубопровода. При утолщении пограничного слоя вниз по течению в нем возникает возвратное течение. Это влечет за собой вынос гидравлической жидкости, заторможенной в пограничном слое, во внешнее течение, вследствие чего последний оттесняется от тела – эффект отрыва пограничного слоя (рис. 6). На диффузорном участке давление увеличивается, а скорость уменьшается. Так как у поверхности стенки трубопровода частицы газа обладают малой кинетической энергией, то в некоторой точке частицы не могут преодолеть давление и останавливаются. Отрыв потока возникает также при течении жидкости в канале, резко расширяющемся в направлении течения. При расширении канала трубопровода происходит возрастание давления в направлении течения, что приводит к отрыву потока с образованием вихрей. Но если на стенках производится отсасывание пограничного слоя, то отрыв не возникает.

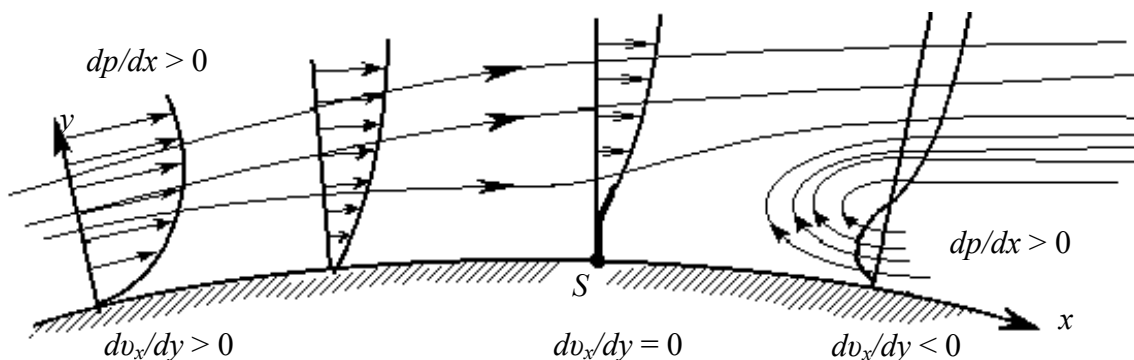


Рис. 6. Отрыв пограничного слоя (точка S – точка отрыва)  
 Fig. 6. Separation of the boundary layer (point S – the point of separation)



С проблемой отрыва пограничного слоя от стенки обтекающего тела, например, рыболовецкого корабля, столкнулись еще в древности, но успешных решений в данной области достигнуто было мало. Поэтому данным направлением успешно занялись исследователи Казанского федерального университета. В частности Рамиль Аделевич Валитов занялся вплотную проблемой отрыва пограничного слоя и высказал предположение о необходимости активного управления потоком в целях предотвращения отрыва и уменьшения сопротивления движению текучих сред [6]. Кроме этого, его сподвижники Д.Ф. Абзалилов и Н.Б. Ильинский занялись поиском оптимальных решений для устранения отрыва пограничного слоя. Выполнив ряд расчетов, ученые-исследователи на примере движущейся стенки поставили и решили задачу нахождения оптимальных параметров данной стенки, при которых достигается безотрывное течение и минимальная величина результирующего коэффициента сопротивления. При этом параметрами поставленной задачи являлись положение движущейся стенки, продольный размер стенки и скорость движения [7].

Данные выводы позволили аргументировать необходимость изучения эффекта отрыва пограничного слоя, например, от корпуса рыболовного корабля. Результаты многолетних исследований показали, что величина сопротивления трения зависит от скорости движения корабля, от размеров и степени шероховатости подводной части корабля, а также от физических свойств жидкости – плотности и вязкости морской воды. На сопротивление трения большое влияние оказывает режим движения жидкости внутри пограничного слоя вдоль поверхности корпуса корабля.

В результате в XXI в. проводятся численные и экспериментальные исследования в области изучения свойств температурного и диффузионного пограничных слоев. Данные исследования затрагивают больше аэродинамическую область науки, где зачастую рассматривается влияние термоэффекта на структуру пограничного слоя вблизи летательных аппаратов. В гидродинамике эти исследования затруднены из-за отсутствия больших опытовых бассейнов, моделирующих структуру жидкого теплового и диффузионного пограничных слоев. В то время как данная проблема в аэродинамике решается с помощью аэродинамических труб. Данные аспекты ни как не являются отрицательной стороной исследований пограничного слоя в гидродинамике. Это утверждение только раскрывает перспективное направление в развитии теории пограничного слоя на рубеже XXI в., особенно в морских нуждах страны. Особый интерес вызывают исследования истечения струи газа через слой жидкости (рис. 7). Моделирование многофазных (гетерогенных) течений является одним из современных направлений, которому в последнее время уделяется большое внимание в военном деле. Этот подход позволяет изучать на современном уровне двухфазные течения в различных технологических гидравлических устройствах, поскольку методики, основанные на теории однофазных жидкостей, не всегда дают необходимые прогнозные оценки параметров потоков.

Сочетание гидродинамических и аэродинамических исследовательских направлений позволяет совершенствовать способы и методы управления пограничным слоем. Методы управления пограничным слоем для уменьшения или увеличения сопротивления тел и тепло-, массообмена между телами и потоками указывает теория пограничного слоя. На практике применяются два способа управления пограничным слоем. Первый: искусственная ламинаризация пограничного слоя заключается в увеличении точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный для уменьшения трения и тепло-, массообмена между поверхностью тела и потоком жидкости, которая заключается в уменьшении толщины пограничного слоя, интенсивности турбулентности набегающего потока, градиента давления и высоты гребешков шероховатости. Эффективными методами уменьшения толщины ламинарного пограничного слоя является охлаждение обтекаемой стенки, удаление с поверхности тела наиболее заторможенных слоев отсосом или сдувом пограничного слоя перед ожидаемой точкой перехода, а также

применение ламинаризованных устройств. Второй способ приемлем для увеличения трения, теплообмена и диффузии. При этом следует турбулизовать пограничный слой.

На основании всех данных, приведенных выше, можно видеть, что гидравлика занимает одну из ведущих позиций в современной морской технике, без которой невозможно было бы обойтись в современном мире. Без гидравлических компонентов и систем невозможно было бы судостроение и многое другое.

Анализ полученных результатов в приложении развития теории по исследованию движения тела в жидкости показал, что высокая эффективность изучения поведения тела в движении относительно текучей среды возможна только в целенаправленном исследовании теории пограничного слоя. Целью данного анализа является изучение основных вопросов, связанных в концептуальном приложении с исследованием задач взаимодействия структуры течения в пограничном слое с реальными движущимися объектами в жидкой или газообразной среде.

Выявленные предпосылки влекут за собой направленный интерес ученых и экспериментаторов в обнаружении новых методов и способов управления пограничным слоем. В итоге были выделены такие способы управления пограничным слоем, как отсос, вдув, математическое моделирование и многие другие. При этом особый интерес представлен работами по исследованию гидродинамических свойств морских подвижных объектов с применением систем автоматизированного проектирования судна, которые осуществляются с помощью гидродинамических расчетов, основанных на основных известных пакетах гидродинамического анализа FlowVision, SolidWorks+COSMOSEloWorks, ANSYS. При данных исследованиях определение гидродинамической силы, включающей инерционную и вязкостную составляющие, осуществляется аналитическими или экспериментальными методами с использованием систем автоматизированного проектирования [8]. При этом выбор систем автоматизированного проектирования характеризуется как с экономическим фактором, так и с возможностью интеграции с уже внедренными средствами на предприятии средствами проектирования.

Проведенный анализ способов и методов управления пограничным слоем в морской технике раскрывает перспективность исследовательского научного направления. В то же время позволяет продолжить исследования в данной области, ориентируясь на современные технологии. При этом содержание статьи раскрывает лишь некоторые из существующих методов и способов управления пограничным слоем.

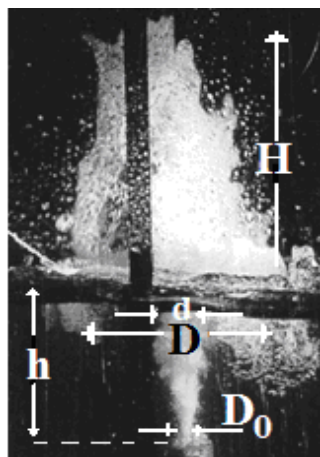


Рис. 7. Фотография истечения газа через слой жидкости  
Fig. 7. Photo expiration gas through the fluid layer

Предложенные способы и методы дают возможность совершенствовать и «оттачивать» методику исследовательских процессов в области ламинарного и турбулентного пограничного слоя. Благодаря теории пограничного слоя появляется необходимость учитывать влияние вязкой жидкости на кормовую часть и обводы морского судна. Развитие современных способов и методов управления пограничным слоем позволит охарактеризовать улучшение мореходных качеств морской техники, в том числе и в промышленный период. При всем многообразии методов и способов управления пограничным слоем насущной задачей исследования теории пограничного слоя является подготовка и настройка специализированных методов и программ, необходимых для достоверной оценки всевозможных методов управления пограничным слоем, которые могут повлиять на конструктивные особенности морских судов и характер их движения в морской акватории.

### Список литературы

1. Плоткина В.А., Стародубцев П.А. Зарождение и развитие теории пограничного слоя в гидравлике // История науки техники. – 2014. – № 5. – С. 10-20.
2. Гриценко А.В. Исследование пограничного слоя ламинарного потока жидкости в гладкой трубе методом фотонной корреляционной спектроскопии / А.В. Гриценко, Н.А. Мыслицкая, А.М. Иванов, И.Г. Самусев // Изв. КГТУ. – 2009. – № 16. – С. 197-203.
3. Ломов С.А., Ломов И.С. Основы математической теории пограничного слоя. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2011. – 456 с. – <http://www.knigafund.ru/books/138665/read>.
4. Мовчан В.Т., Шквар Е.А. Математическое моделирование пограничных слоев // Прикладная гидромеханика. – 2005. – Т. 7 (79), № 3-4. – С. 73-85.
5. Пат. 2241868 Российская Федерация, F15D1/06, F17D1/20. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе; заявитель и патентообладатель / Голованчиков А.Б., Ильин А.В., Ильина Л.А., Лобойко В.Ф., Якушко М.В. Волгоградский гос. техн. ун-т; № 2003110552/06; заявл. 14.04.2003; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 12.
6. Валитов Р. А. Применение устройств активного управления пограничным слоем с учетом энергетических затрат для предотвращения отрыва потока // Тр. Математического центра имени Н.И. Лобачевского: материалы Восьмой молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения – 2009»; Казань, 1-6 ноября 2009 г. – Казань: Казан. матем. об-во, 2009. – Т. 39. – С. 147-148.
7. Абзалилов Д.Ф., Валитов Р.А., Ильинский Н.Б. Поиск оптимальных параметров движущейся стенки для устранения отрыва пограничного слоя // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике: тез. докл. Междунар. конф., посвященной 110-летию академика М.А. Лаврентьева. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2010. – С. 55.
8. Маттис А.В., Коптилкин А.А. Исследование гидродинамических свойств морских подвижных объектов с применением САПР // Автоматизация процессов управления. – 2011. – № 2. – С. 39-42.

**Сведения об авторах:** Плоткина Виктория Александровна, старший преподаватель,  
e-mail: vika\_plotkina@mail.ru;  
Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: spa1958@mail.ru.