

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КРИТЕРИИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РЕЧНЫХ СУДОВ

## Потемкин А.А.

*Потемкин Александр Александрович – аспирант,  
кафедра управления и защиты информации,  
Институт транспортной техники и управления  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

**Аннотация:** в статье анализируются энергетические характеристики и критерии управления движением речных судов, показано, что они являются базой для энергосбережения и всей энергетики судна в целом. Представлена структура энергетической установки на судне, определяющая влияние различных составляющих на режимные показатели работы составляющих ее основу блоков. Получены соотношения для расчета оптимальных статических характеристик управления расходом топлива.

**Ключевые слова:** энергетические характеристики, критерии управления, речное судно, расход топлива, управление движением.

Энергетические характеристики лежат в основе процессов энергосбережения и выработки критериев управления движением речных судов [1].

Энергетическая установка на судне (ЭУС) является базовым элементом всей энергетики управления.

Наиболее распространены на речных судах ЭУС дизельные установки, оконечной нагрузкой которых является винт с фиксированным шагом (ФШВ).

Такая ЭУС представлена на рис. 1.

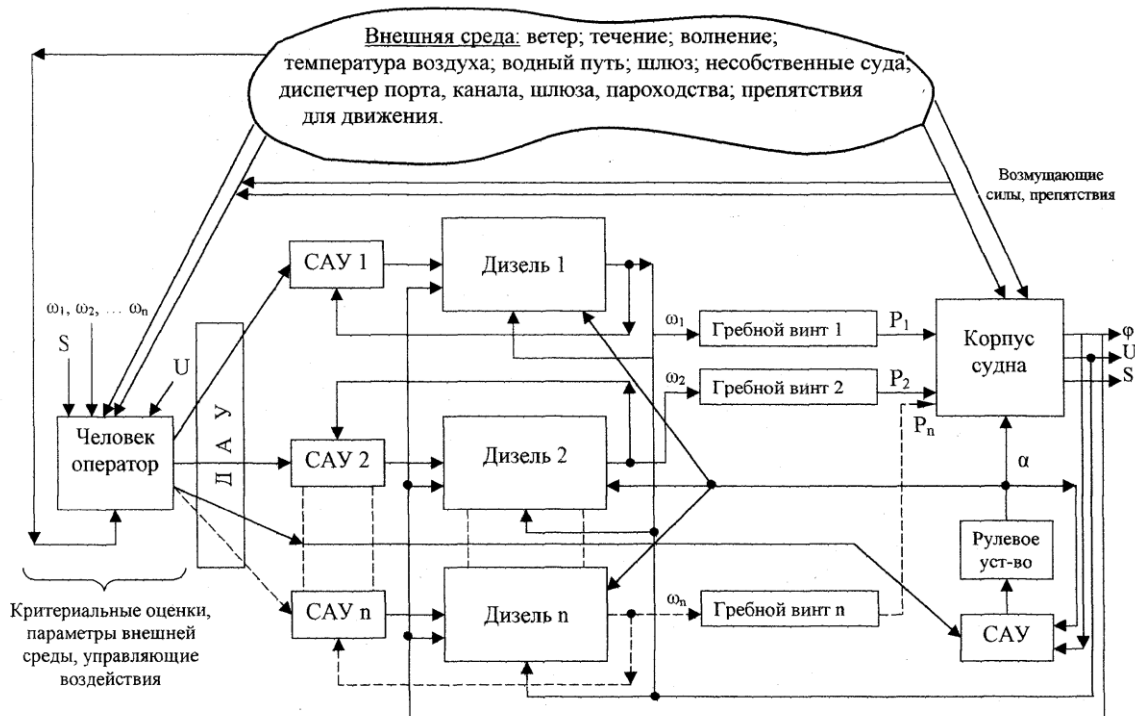


Рис. 1. Структурная схема ЭУС

САУД - система автоматического управления дистанционная; САУ - система автоматического управления;

$\omega$  - определяющая вращение движителем (ЧВД) частота;  $P_i$  - движительный упор, где  $i = 1, n$ ;

$S$  - путь, который судно проходит при движении;  $U$  - судовая скорость;

$\varphi$  - угол курса;  $\alpha$  - угол, определяющий величину поворота пера руля или насадки

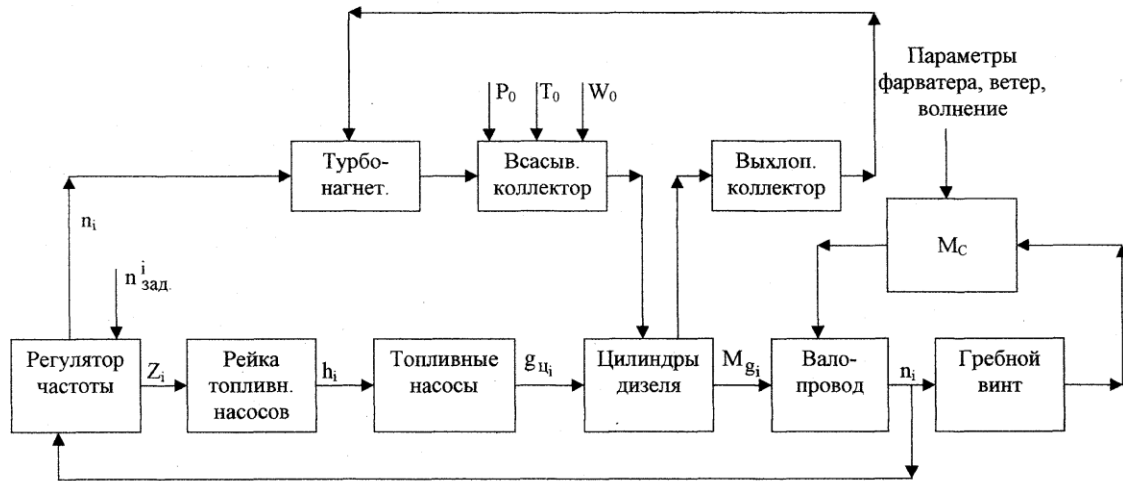


Рис. 2. Блочная схема ЭУС

Блочная схема ЭУС представлена на рис. 2:

$n_{зад}^i$  - заданная величина частоты вращения,

$Z_i$  - величина движения механизма исполнения регулятора, определяющего частоту вращения,

$h_{p_i}$  - величина движения рейки топливных насосов,

$g_{ц_i}$  - подача топлива по циклу,

$M_{g_i}$  - дизельный момент,

$M_C$  - момент сопротивления.

По этой схеме можно определить, как влияют разные составляющие на режимные показатели работы блоков ЭУС, составляющих ее основу.

Воздействия от управления со стороны регулятора, определяющего частоту вращения, а также нагрузки формируют режимы функционирования дизеля.

Они определяются по скорости движения судна в продольном направлении, величинам  $\dot{\phi}, \alpha, \dot{\alpha}$ , параметрами окружающей среды ( $P_0$  - давлением,  $T_0$  - температурой,  $W_0$  - воздушной влажностью,  $t_3$  - температурой воды за бортом).

Человеком-оператором посредством САУ (или САУД), скоростной режим задается дизелю при учете определенного времени движения к назначаемому пункту и параметров окружающей среды.

Дизелей, работающие на речных судах в составе ЭУС имеют следующие скоростные режимы [2]:

- стабилизационная частота вращения;
- изменение частоты параметров;
- временные программы;
- режимы комбинированные.

На рис. 3 показаны основные режимы при осуществлении стабилизации частоты вращения.

Стабилизация частоты вращения может быть выполнена с помощью регуляторов в статике (рис. 3а) и астатических регуляторах (рис. 3б).

На рис. 4 показан режим изменения частоты параметров.

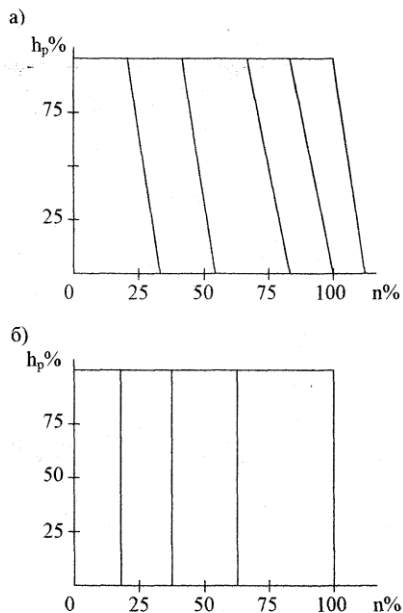


Рис. 3. Стабилизация частоты вращения

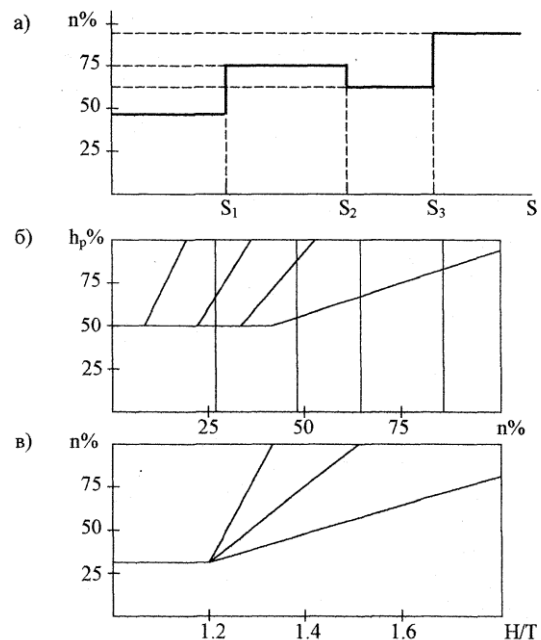


Рис. 4. Изменение частоты параметров

Изменения частоты вращения как функции пути, проходимого судном показаны на рис. 4а.

Вариации положения рейки в функции изменения частоты представлены на рис. 4б.

Изменение частоты как функция относительной глубины фарватера (H/T) - на рис. 4в.

При прогреве дизеля при его остановке изменение частоты представлено на рис. 5 в виде временных программ.

Линия 0-1-2-4 отражает программу маневра при прогреве.

По нормальной программе процесс прогрева дизеля осуществляется по линии 1-2-3.

Программа процесса прогрева после аварии показана на линии 0-1-5.

Комбинированная программа регулирования частоты представлена на рис. 6.

Всерезимный регулятор и регулятор ограничения нагрузки позволяют изменить частоту.

Информация, которая поступает к судоводителю от внешней среды, определяет режимы использования ЭУС.

Например, зависимости «суммарный часовой расход топлива  $G_T$  от скорости продольного движения» для ЭУС в двухвальном варианте (рис. 7).

- режим, когда оба дизеля функционируют в прямом направлении (1). Он соответствует движению на речных фарватерах, водохранилищах, каналах;

- режим, когда один дизель работает в прямом направлении (2). Он применяется при движении с небольшой скоростью.

Для того, чтобы обеспечить небольшие скорости, при швартовке и для изменения направления движения в экстренных случаях применяют режимные варианты работы дизелей «враздрай» (3, 4).

При решении задачи оптимизации предусматривается, что имеется объект или процесс, оценки по критериям, которым должен соответствовать режим работы.

Ограничения, которым подвергаются изменяемые величины характеристик, воздействия управления, энергетические параметры, экономические факторы необходимо всегда учитывать для осуществления оптимизации.

Оптимальные режимы находятся экспериментально или на основе математических методов [3, 4].

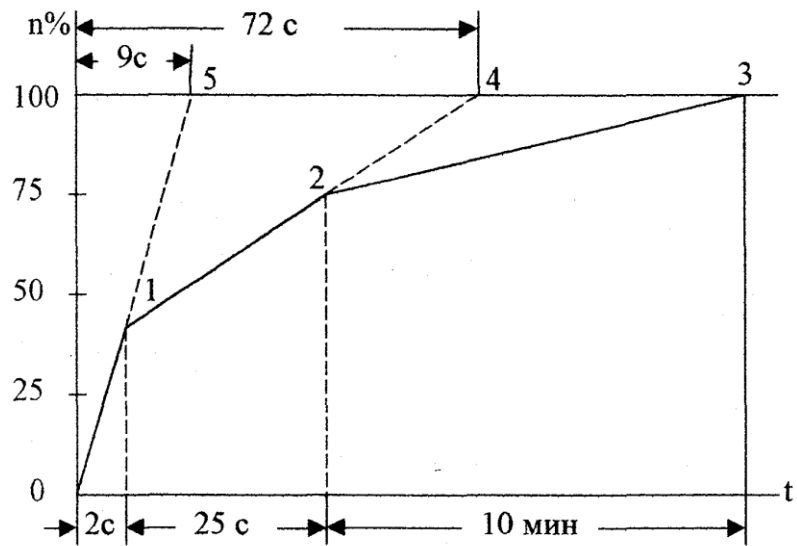


Рис. 5. Временные диаграммы изменения частоты дизеля при его прогреве после остановки

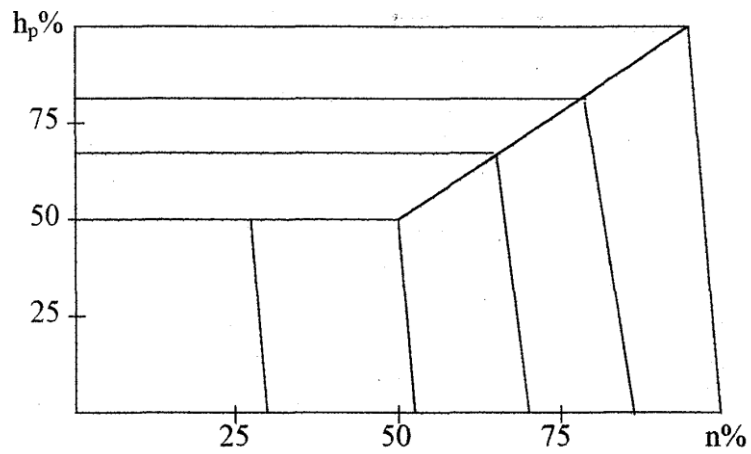


Рис. 6. Комбинированная программа регулирования частоты

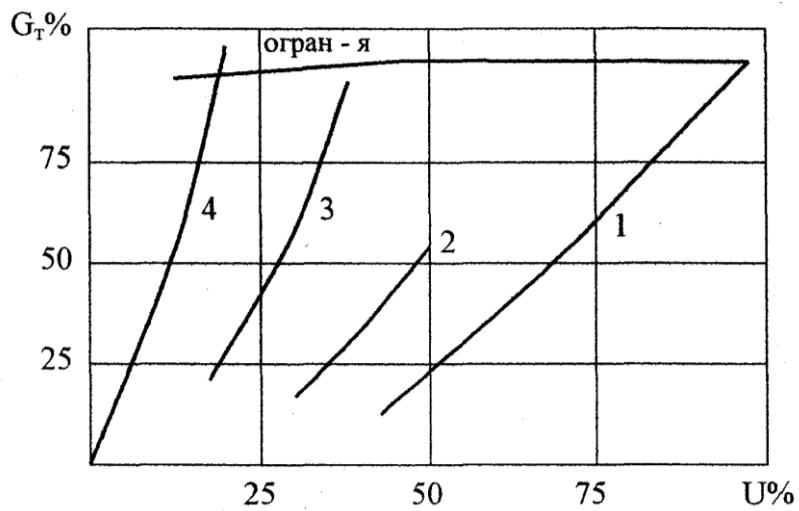


Рис. 7. Диаграмма зависимости расхода топлива от скорости продольного движения

Ne %

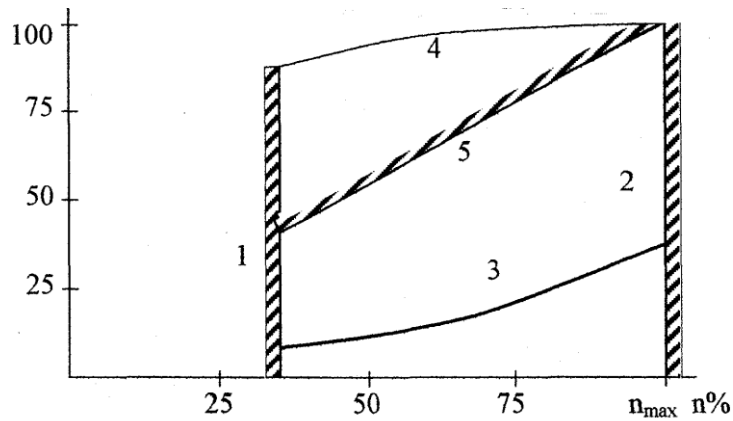


Рис. 8. Ограничения статического характера

В самых простых случаях, для одномерных объектов применим первый способ.

Сложные многомерные объекты и системы, к которым относится и ЭУС требуют применения второго способа.

Математические методы оптимизации исходят из наличия исходных математических моделей объекта, которые заданы в виде зависимостей, сформулированных аналитически или характеристик в виде графиков.

Для оптимизации процессов в динамике рассмотрим математические модели в виде дифференциальных уравнений [4]:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_r), i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

или в векторном виде

$$\frac{dX}{dt} = f(X, V), \quad (2)$$

$X$  - вектор, определяющий координаты объекта;

$V$  - управляющий вектор.

Составляющие вектора  $X$  для ЭУС [4]:

- момент дизеля крутящий,
- мощность,
- частота при вращении,
- температура от выхлопа газов,
- топливный расход,

Составные части вектора управления  $V$  для ЭУС:

- движения рейки у топливных насосов,
- подача топлива в цикле,
- частота вращения.

На составные части векторов  $X$  и  $V$  наложены ограничения статического (рис. 8) или динамического характера (рис. 9) исходя из действительных условий эксплуатации.

Рабочая зона режимных фаз работы дизеля имеет ограничения (рис. 8):

- 1, 2 - по частоте при вращении,
- 3 - по мощности по минимуму,
- 5 - моменту кручения,
- 4 - мощности по максимуму, которая является внешней предельной характеристикой.

На изменение частоты вращения дизеля вводятся ограничения, носящие динамический характер при прогреве или остановке.

Оценкой эффективности оптимизации является функционал - непрерывная функция [4]

$$G = G(X, V), \quad (3)$$

которая определена в области  $t = t_H - t_K$ ,

$t_H$  - начальное время, указывающее на изменения векторов  $X$  и  $V$ ,

$t_K$  - время, показывающее, что движение окончено.

Необходимо найти такую кусочно-непрерывную функцию  $V = V(t)$  в области  $t = t_H - t_K$ , которая с учетом ограничений могла обеспечить минимум или максимум разности функции (3), определенной на

областных границах  $t_H$  и  $t_K$ , при выполнении этого условия будет решена задача динамической оптимизации.

$$\Delta G = G_{t_K} - G_{t_H} \quad (4)$$

Алгебраические модели, представленные или в форме аналитики или в форме в виде графиков возможно использовать для оптимизации процессов в статике:

$$N_e = N_e(n, g_e, h_p), M_g = M_g(n, U, g_e, h_p), g_e = g_e(U, n, H/T), U = U(S, H/T).$$

Для оптимизации, в данном случае, используются только ограничения в статике.

Два основных направления оптимизации режимов работы ЭУС:

- оптимизация для программ регулирования, которые показаны на рис. 9 – 12, целью является синтез структур регуляторов;

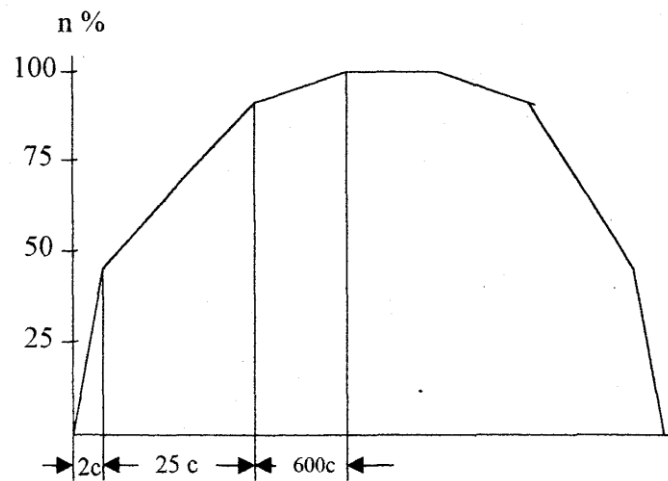


Рис. 9. Ограничения динамического характера

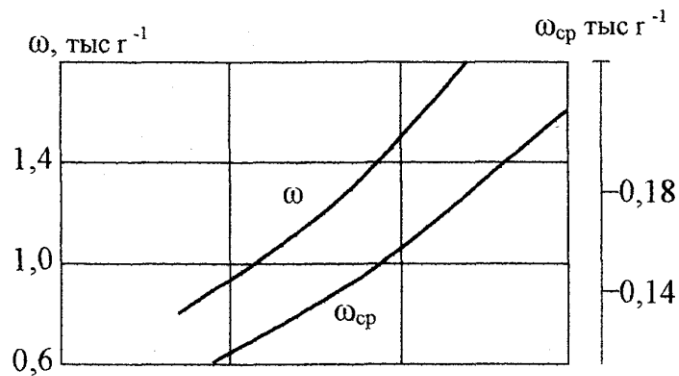


Рис. 10. Типовая зависимость потока отказов и часового расхода топлива

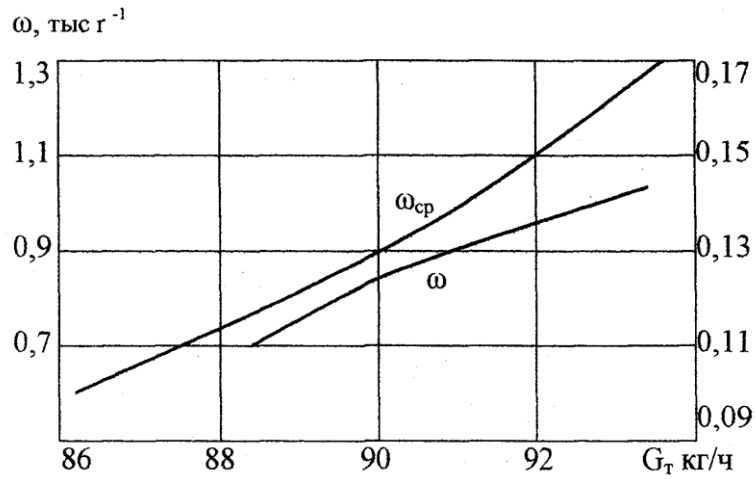


Рис. 11. Величины параметров потока отказов, требующих вскрытия дизеля

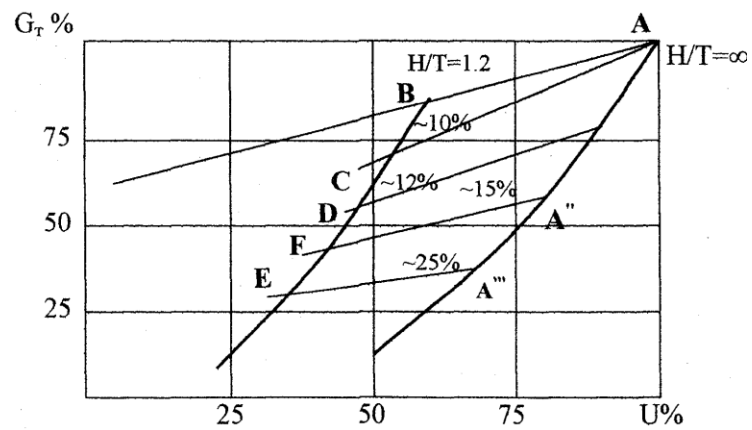


Рис. 12. Зависимости частоты вращения статических характеристик изменения скорости от заданного времени движения

- обеспечение разных вариантов движения судна, учитывая оптимизацию режимов использования дизелей.

При осуществлении первого пути оптимизации возможно не учитывать характер действительных возмущений.

Здесь возмущения могут быть определены в виде типовых нагрузок:

- ступенчатые,
- импульсные,
- периодические.

Необходимы показатели качества переходных процессов в качестве критериальных оценок [4]:

- оценка быстродействия,
- определение статической и динамической точности,
- показатели колебательности,
- величины запасов устойчивости.

Успешное решение оптимизации режимов работы ЭУС при эксплуатации, указывает на второе направление.

Оно возможно при учете:

- параметров маршрута при движении судна,
- взаимосвязи в системе дизель – валопровод – винт - судовой корпус.

Здесь в качестве критериальных оценок принимаются:

- показатели работы дизеля (экономичные),
- надежность функционирования,
- увеличение моторесурса,
- свойства маневренности судна.

Конкретизация целей движения судна обозначает, как могут меняться величины функционалов, их выражение в аналитике, а также программы управления изменения частоты вращения.

Оценки критериев режимов функционирования между собой являются взаимосвязанными.

Поэтому, добиться оптимальности сразу по нескольким показателям не возможно, так как выполнение экстремума выбранного критерия приводит к изменению других критериев режимов функционирования [4].

Движения речного судна определяются расписанием или по заранее определенному времени перехода. Оно определено диспетчерскими службами и судовым оператором.

Системы автоматизации при движении судов обоснованно определяют это время, отслеживают его выполнение, корректируют его значения при необходимости, обеспечивают безопасность при плавании, вычисляют оптимальные режимы движения судна и работы дизелей.

Таким образом, время перехода устанавливается системой иерархически более высокого уровня, чем судно и его ЭУС.

Возможности ЭУС анализируются при задании времени движения, также учитываются фарватерные параметры, факторы от ветра и волн, присутствия и количества судов, которые будут попутными и встречными.

Когда заданное время превышает предельное, то при движении судна оптимизация режимов работы даст большую экономию топлива за счет осуществления работы дизеля на нагрузках в долях.

В этом случае задача оптимизации выгладит так:

- необходимо так разделить скорости движения на различных глубинах при заданном времени перемещения на конкретном маршруте, чтобы обеспечить минимизацию суммарного расхода топлива.

Результаты многочисленных испытаний, проведенных ранее на речных судах с целью проверки эффективности экономии топлива за счет снижения средней скорости показаны в [5]:

$$\Delta G_{\Sigma} \% = (\Delta U_{cp} \%)^m, \quad (5)$$

$\Delta G_{\Sigma}$  - экономия в топливе, %;

$\Delta U_{cp}$  - уменьшение скорости движения судна, %;

$m = 4 - 6,5$  - коэффициент, который зависит от крутизны характеристик  $G_T = f(U)$ .

Фактом является то, что уменьшение средней скорости движения судна при уменьшении частоты вращения вместе с значительной экономией топлива позволяет увеличить моторесурс дизеля.

Анализ показывает, что понижение мощности и частоты вращения связано с величиной изменения моторесурса в судовых условиях.

$$m_x = a \frac{N_{ном}}{N_x} - b \left( \frac{N_{ном}}{N_x} \right)^2 - c, \quad (6)$$

$m_x$  - изменение моторесурса относительное;

$N_{ном}$  - мощность дизеля полная;

$N_x$  - мощность дизеля пониженная;



$a$ ,  $b$ ,  $c$  - коэффициенты, которые определяются из практики возможных сроков эксплуатации дизеля на начальных режимах.

Формула (6) может быть представлена в виде

$$m_x = M_x = \frac{M_n}{M_x},$$

$M_n$  - служебный срок дизеля при полной мощности;

$M_x$  - служебный срок при уменьшении нагрузки по сравнению с полной в  $\frac{N_n}{N_x} = \bar{N}_x$  раз, т. е. при мощности  $N_x$ .

Однако, при излишнем уменьшении нагрузки на дизель (ниже 25 - 30%) моторесурс дизеля уменьшается из-за физико-химических процессов.

Надежность работы дизеля оценивают таким показателем как поток отказов [5].

Экспериментальные зависимости потоков отказов и часового расхода топлива дизелем  $G_T$  получены в [6].

Типовые зависимости для дизеля показаны на рис. 10.

Кривая  $\omega_{cp}$  от  $G_T$  отражает величины параметров потока отказов, требующих вскрытия дизеля (рис. 11).

Формулы (1), (2), характеристики (рис. 10, 11) показывают, что одновременно с уменьшением частоты вращения дизеля и уменьшением расхода топлива происходит существенное увеличение надежности работы дизеля.

Расход топлива и надежность дизеля - функционал при оптимизации режимов работы ЭУС, который можно использовать для решения поставленной задачи.

На основе программ регулирования построены зависимости частоты вращения статических характеристик изменения скорости от заданного времени движения, они изображены на рис. 12.

В координатах - часовой расход топлива  $G_T$  % ТЭУ и скорость поступательного движения  $U\%$  - представлены:

- винтовые характеристики  $BE b AA'''$ ,
- ограничительная  $AB$ ,
- характеристики оптимизированных режимов  $AC$ ,  $A'D$ ,  $A''G$ ,  $A'''E$ , где снижение скорости (увеличение времени, затраченного на движение) по сравнению с ограничительной характеристикой  $AB$  показано в процентах.

Вопросы ресурсосбережения относятся непосредственно к дизельной ЭУС.

Существуют и технологические процессы работы судна, где под дизельной установкой понимается система, которая обеспечивает движение, свойства маневров, безопасность судна, воздействие на фарватер, гидротехнические сооружения и т. п.

### Список литературы / Список литературы

1. Соляков О.В. Использование современных глобальных навигационных спутниковых систем и их функциональных дополнений на внутренних водных путях: монография / О.В. Соляков. М.: ФГБОУ ВО «МГАВТ», 2016. 176 с.
2. Румянцев А.Ю. Оптимальное управление в системах электродвижения судов по критерию минимума потерь / А.Ю. Румянцев, В.Ф. Самосейко, Н.В. Белоусова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 2016. № 6 (40). С. 206–213.
3. Сахаров В.В. Алгоритм энергоэффективного управления курсом судна / В.В. Сахаров, А.Г. Таранин, А.А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 2013. № 3 (22). С. 38–46.
4. Korn A.G. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review / A.G. Korn, T.M. Korn. N.-Y.: Dover Publications, Inc., 2000. 1130 p.
5. Gao S. Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks / S. Gao, H. Huang // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012. Vol. 21. Is. 1. Pp. 196-213.
6. Лебедева М.П. Методика оценки безопасного движения судов в стесненной акватории / М.П. Лебедева, С.Д. Айзинов, А.О. Лебедев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 2017. Т. 9. № 1. С. 111-120.