



УДК 621.436:621.833–52:656.6

М.И. Калинина

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМ ДВУХМАШИНЫМ ДИЗЕЛЬ-РЕДУКТОРНЫМ АГРЕГАТОМ, РАБОТАЮЩИМ НА ВИНТ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА

M.I. Kalinina

OPTIMIZATION OF A CONTROL SYSTEM FOR THE SHIP'S TWO-MACHINE A DIESEL ENGINE-GEAR BOX UNIT WORKING ON THE CONTROLLABLE PITCH PROPELLER

В статье рассмотрена математическая модель судовой дизель-редукторной установки, позволяющая оптимизировать режимы ее эксплуатации по топливной экономичности. Приведены результаты расчетного исследования, выполненного для большого морозильного траулера.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ. ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ. ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.

This article discusses the mathematical model of the ship diesel engine — gear installation, allowing to optimize modes of its operation on fuel profitability. The results of settlement research executed for the big freezing trawler are given.

SHIP POWER INSTALLATIONS. OPTIMIZATION OF MANAGEMENT. ECONOMY OF FUEL. MATHEMATICAL MODEL. SETTLEMENT RESEARCH.

Задача улучшения топливной экономичности судовых дизельных энергетических установок (ЭУ) обусловлена современным состоянием и тенденциями развития отечественного транспортного, промышленного и технического флота. В основной массе флот морально и физически устарел и нуждается в замене. После согласования вопроса о вступлении России в ВТО особенно остро встает вопрос о конкурентоспособности российских судостроителей [1].

Одно из основных требований, выдвигаемых в настоящее время заказчиками, — повысить топливную экономичность. Для транспортного флота это связано с попыткой введения через международные организации нормирования выброса углекислого газа путем оценки судов с помощью индекса энергетической эффективности конструирования (ЕЕДИ) [2]. Для судов рыбопромыслового флота наблюдается снижение экономической эффективности при использовании устаревших типов ЭУ в условиях сокращения сырьевой базы и современных цен на топливо. Если на момент начала эксплуата-

ции цена морского дизельного топлива (MDO) составляла не более 250 \$/т, а тяжелого дизельного (IFO 380) — не более 100 \$/т, то в настоящее время по данным Bunker Ports News они увеличились до 950 \$/т для MDO и 650\$/т для IFO 380.

Один из распространенных видов установок для транспортных судов ледового плавания, судов с горизонтальной погрузкой и больших морозильных траулеров — это дизель-редукторный агрегат (ДРА) с отборами мощности, работающий на винт регулируемого шага (ВРШ) при постоянной частоте вращения (рис. 1).

Отборы мощности на валогенераторы (ВГ) переменного тока определяют работу ДРА при постоянной частоте вращения. Все маневры (изменения скорости хода и реверс) выполняются разворотом лопастей ВРШ. Соединительно-разобщительные муфты используются при нештатных ситуациях и не приспособлены для отключения на ходу.

К преимуществам данной схемы ДРА и способа управления относятся простота и снижение

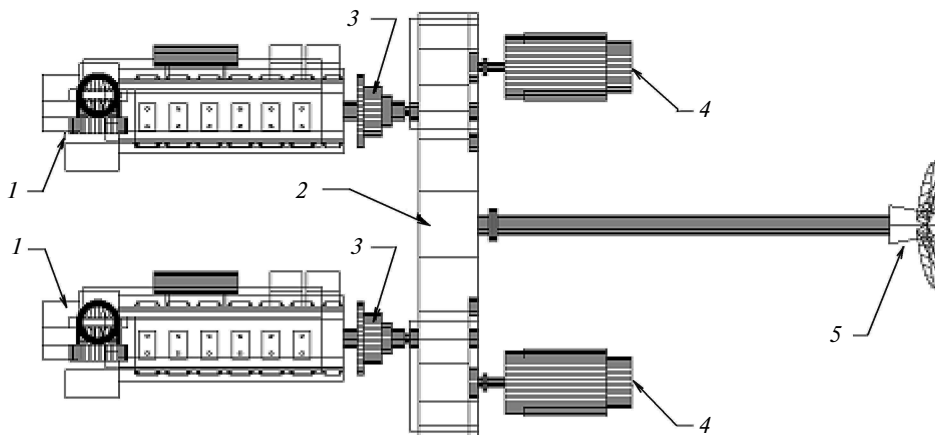


Рис. 1 Двухмашинный дизель-редукторный агрегат с отборами мощности (1 — дизель; 2 — суммирующий редуктор; 3 — соединительно-разобщительная муфта; 4 — валогенератор; 5 — винт регулируемого шага)

термических напряжений в динамических режимах (так как на долевых нагрузках двигателя работают с достаточным запасом по коэффициенту избытка воздуха).

Вместе с тем на долевых режимах эксплуатации ДРА рассмотренный способ управления приводит к значительному перерасходу топлива. На математической модели была оценена возможность улучшения топливной экономичности ДРА при оптимизации системы управления и конструктивной схемы редукторной передачи. Оптимальный режим определяется для заданной скорости хода и тяги и соответствует минимальному расходу топлива. В программе рассчитывается оптимальная частота вращения, соответствующий ей шаг гребного винта, режим включения передачи, расход топлива, а также производится сравнение по топливной экономичности с режимом эксплуатации при постоянной частоте вращения. Варьирование частоты вращения производится с учетом поля допустимых режимов эксплуатации двигателя и конструкции редукторной передачи. Конструктивные признаки передачи включают:

наличие муфт, благодаря которым возможно отключение на ходу одного из двигателей;

наличие муфт, с помощью которых возможна раздельная работа одного двигателя на винт, а второго — на ВГ;

привод ВГ через передачу постоянной скорости (ППС), позволяющую поддерживать но-

минальную частоту вращения ВГ в диапазоне частоты вращения двигателя (0,7–1) от номинального значения.

Блок-схема программы расчета оптимального режима эксплуатации показана на рис. 2.

Исходные данные по судну включают проектные данные для расчета сопротивления судна, полученные по результатам испытаний модели в опытовом бассейне.

Исходные данные по ВРШ позволяют определить коэффициент полезного действия в поле расчетных режимов по значениям коэффициентов упора и момента в функции относительной поступи. Наиболее точно характеристики ВРШ описываются массивами, относящимися к определенной поступи гребного винта. Подготовка данных для расчета КПД ВРШ, использованных в программе, была выполнена В.М. Ильиным на основе испытаний винтов в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова.

Исходные данные по ДРА включают характеристики двигателя и конструктивные признаки передачи.

Анализ универсальных характеристик современных судовых двигателей со свободным газотурбинным наддувом позволил применить упрощенный метод задания исходных данных по двигателю без моделирования его параметров на каждом из расчетных режимов. Метод задания показан на примере универсальной характеристики двигателя Vasa 46 фирмы Вяртсиля [3] (рис. 3).

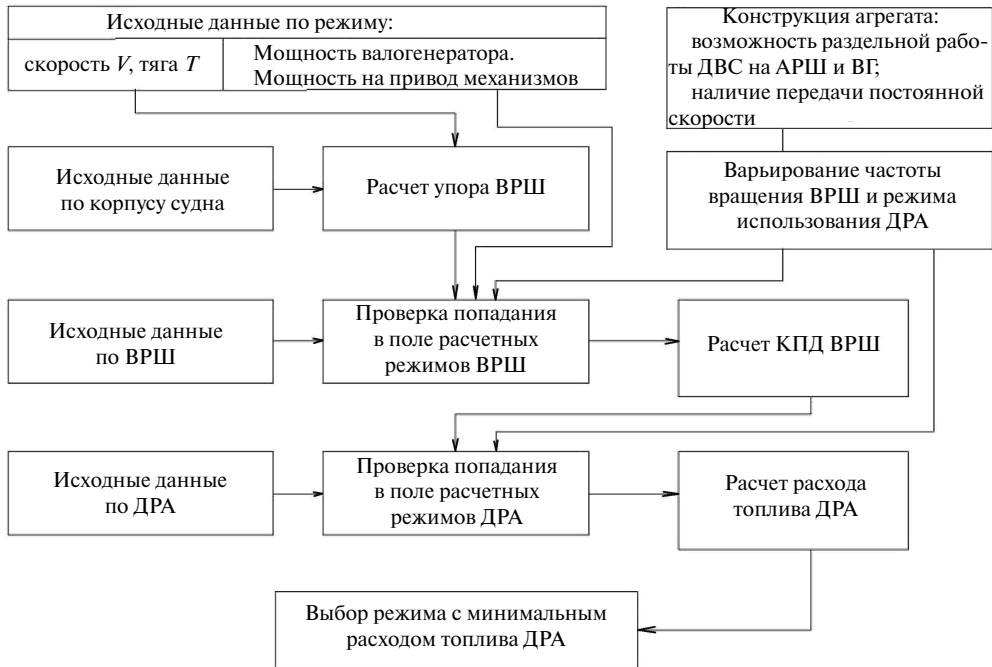


Рис. 2. Блок-схема программы расчета оптимального режима эксплуатации ДРА

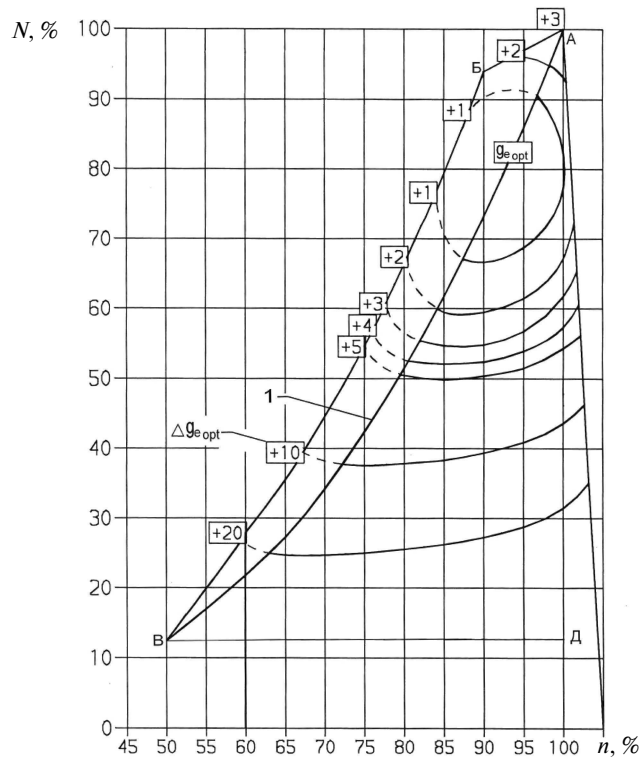


Рис. 3. Универсальная характеристика двигателя Vasa 46:

1 — линия оптимальных удельных расходов топлива; АБ — участок ограничительной характеристики, соответствующей упору рейки топливного насоса; БВ — участок ограничительной характеристики по допустимой тепловой напряженности; АД — работа при номинальной частоте вращения

Поле допустимых режимов эксплуатации АБВД задается в виде:

номинальной мощности и частоты вращения (точка А);

двух полиномиальных зависимостей для участков АВ и ВВ и точки перегиба Б;

минимальной частоты вращения двигателя (точка В).

Для расчета удельного расхода топлива в виде полиномиальных зависимостей задаются следующие величины:

линия I оптимального удельного расхода топлива;

удельный расход топлива по линии оптимальных расходов в зависимости от нагрузки;

отклонение удельного расхода от оптимального для заданной мощности при работе с номинальной частотой вращения;

отклонение удельного расхода от оптимального для заданной мощности при работе по винтовой характеристике.

Значения удельного расхода топлива в поле между оптимальной и нагрузочной характеристиками или в поле между оптимальной и винтовой определяются путем интерполяции. Для некоторых двигателей линия оптимальных удельных расходов совпадает с винтовой характеристикой. При попадании расчетной точки между винтовой и ограничительной характеристиками расход принимается по винтовой. Это допущение может снижать точность расчетов на величину около 0,5 %, но не оказывать существенное влияние на результаты оптимизации, поскольку изменения КПД гребного при оптимизации составляют до 500 %.

Оптимизационные расчеты выполнены на примере проектных данных большого морозильного траулера (проект 12880). ДРА включает два двигателя 6РС-5 Пилстик мощностью 2870 кВт каждый, суммирующий редуктор и два ВГ переменного тока мощностью по 1600 кВт. Один ВГ является резервным. ВРШ диаметром 4,2 м имеет конструктивное шаговое отношение $(H/D)_к = 0,9$, характеристики рассчитываются в диапазоне $(H/D) = 0,3-1,5$. Полная мощность ВГ используется на режиме выборки трала. На ходовых режимах нагрузка ВГ составляет примерно 600 кВт. По проектным данным полная скорость свободного хода составляет около 15,6 узлов. На режиме траления обеспечивается

тяга 400 кН на скорости 6 узлов. Долевые режимы эксплуатации судна соответствуют поиску рыбы в районе промысла. Возможны также режимы пробного траления с орудиями лова уменьшенного размера или при пониженных скоростях.

При выполнении оптимизационных расчетов для режимов свободного хода в первую очередь была проверена оптимизационная модель, применявшаяся в системах управления НПО «Аврора», в которых ВРШ работал по расчетной винтовой характеристике. Для этого моделировался режим с отключением ВГ.

По результатам расчетов (рис. 4) можно констатировать наличие ощутимого отклонения линии оптимальной частоты вращения от расчетной винтовой характеристики. Разность в часовом расходе топлива составляет от 4 % при скорости хода 9 узлов до 1 % при скорости хода 14–15 узлов. Главным образом это объясняется выбором конструктивного отношения $(H/D)_к$ с большим запасом к максимальному расчетному значению $(H/D)_{max}$. Увеличение на долевых режимах при $(H/D) > (H/D)_к$ позволяет осуществлять работу в зоне максимальных значений КПД винта $\eta_в$.

На рис. 4 приведены также результаты расчетов шагового отношения и КПД винта при работе по нагрузочной и оптимальной характеристике.

Дальнейшие расчеты были выполнены для изучения эффективности применения различных конструктивных типов передач на гребной вал и на валогенератор. На рис. 5 приведены результаты расчетов часового расхода топлива на агрегат в диапазоне скоростей свободного хода от 6 до 15 узлов.

Кривая $Gt1$ соответствует работе агрегата при постоянной частоте вращения, кривая $Gt2$ — возможности отдельной работы двигателей на ВРШ и ВГ, кривая $Gt3$ — агрегату с ППС в качестве привода ВГ. Выполненные расчеты показали следующее.

Для варианта работы при постоянной частоте вращения ВРШ на скоростях хода менее 8 узлов из-за уменьшения коэффициента полезного действия винта расход топлива ДРА почти не меняется и составляет около 390 кг/час. На скорости 6 узлов КПД винта равен 0,1 при $(H/D) = 0,31$.

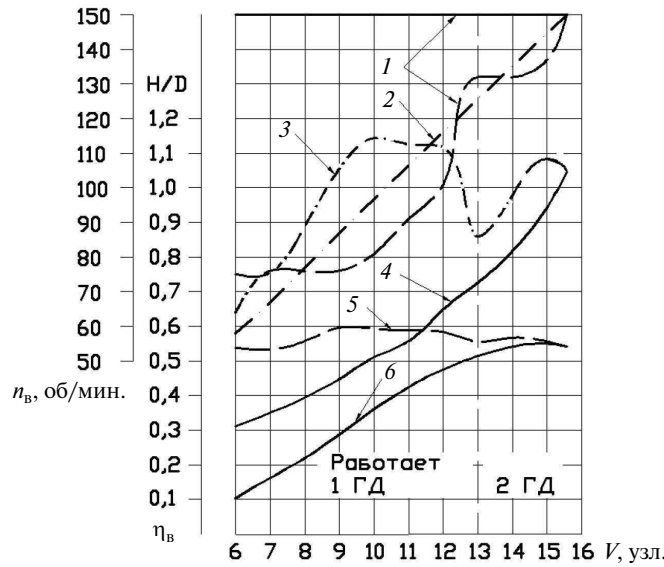


Рис. 4 Результаты оптимизационных расчетов режимов свободного хода ДРА с отключенным валогенератором:

- работа при номинальной частоте вращения;
- · - оптимизация по программе;
- винтовая характеристика;
- 1 и 2 — обороты ВРШ n_B ; 3 и 4 — шаговое отношение H/D ;
- 5 и 6 — КПД винта η_B

Вариант с раздельной работой двигателей возможен при скорости хода менее 13 узлов. Этот вариант позволяет выбрать оптимальный по КПД режим работы ВРШ, однако второй двигатель работает на ВГ при малой нагрузке и имеет повышенный удельный расход топлива.

Вариант с ППС на приводе ВГ при скорости менее 9 узлов проигрывает варианту с раздель-

ной работой двигателей, однако позволяет улучшить топливную экономичность установки во всем диапазоне режимов.

Дополнительно были выполнены расчеты для хода с тяговым усилием 100 кН. Такие режимы соответствуют ходу при штормовых метеоусловиях и при обрастании корпуса судна. Результаты расчетов показаны на рис. 6.

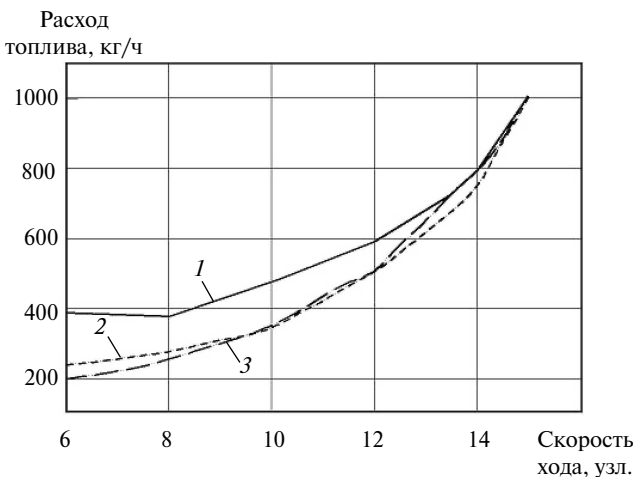


Рис. 5. Сравнение часового расхода топлива ДРА на свободном ходу при различных способах управления (1 — $Gt1$; 2 — $Gt2$; 3 — $Gt1$)

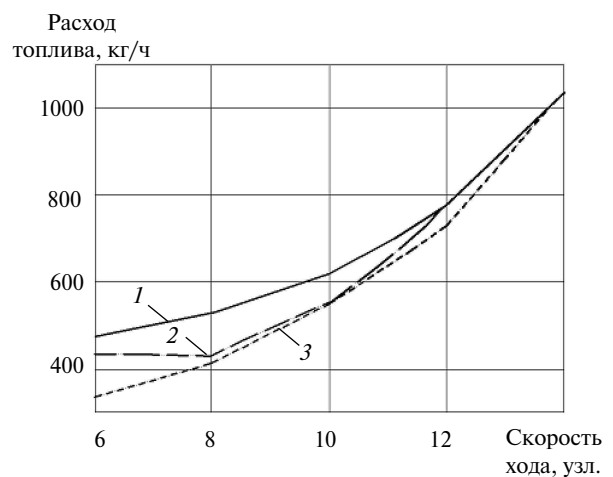


Рис. 6. Сравнение расходов топлива ДРА при тяговом режиме 100 кН для различных способов управления (1 — $Gt1$; 2 — $Gt2$; 3 — $Gt1$)

Наиболее выгодным оказывается вариант с ППС на приводе ВГ. В области малых скоростей хода при раздельной работе двигателей мощность одного дизеля оказывается недостаточной для оптимизации режима работы ВРШ.

Таким образом, выполненные исследования подтвердили ощутимое снижение расхода топлива в многорежимных дизель-редукторных установках при введении оптимального управления, возможного за счет усложнения конструкции судовых передач.

Оптимизированные дизель-редукторные установки могут конкурировать с дизель-электрическими установками, получившими в последние годы перспективы развития [4].

В свое время в СССР были запатентованы судовые силовые установки с винтами фиксированного шага, в которых двигатель работает с постоянной частотой вращения. Изменение частоты вращения и реверс винта фиксированного шага осуществляется за счет регулирующей электрической машины малой мощности, соединенной с планетарной передачей, и блоки-

рующих муфт [5]. Однако для оценки экономической эффективности таких решений необходимо выполнить НИОКР с проработкой конструкции основных узлов передачи.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

Оптимизация режимов управления ДРА судов со сложным спектром режимов эксплуатации позволяет существенно снизить расход топлива на привод ВРШ.

На стадии проектирования применение расчетной модели ЭУ дает возможность быстро оценивать эффективность по топливной экономичности различных конструктивных решений и разрабатывать оптимальные алгоритмы использования ДРА.

Внедрение механических передач, позволяющих осуществлять соединение и разобщение элементов ДРА на ходу, в том числе и с регулирующими электрическими машинами малой мощности, может существенно улучшить топливную экономичность энергетических установок со сложным спектром режимов эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашин, В.М.** Российское судостроение и WTO. Последствия [Текст] / В.М. Пашин // Судостроение.— 2012. № 1.— С. 9–11.
2. **Пустошный, А.В.** ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX — новая реальность от IMO [Текст] / А.В. Пустошный // Судостроение.— 2012.— № 1. С. 11–17.
3. WARTSILA DIESEL, Vasa 46, Project Guide for

marine application [Текст] / Issue 1994.

4. **Лазаревский, Н.А.** Структурные схемы гребных установок, анализ и перспективы развития [Текст] / Н.А. Лазаревский, В.А. Хомяк, Ф.А. Гельвер, В.Ф. Самойленко // Судостроение.— 2012.— № 3. С. 44–47.

5. **Авторское свидетельство № 600030.** Судовая силовая установка // Г.Х. Баракан, Я.Н. Вольфензон, М.И. Калинина и Е.П. Руденко.

REFERENCES

1. **Pashin, V.M.** The Russian shipbuilding and WTO. Consequences [Text] // Sudostroenie.— 2012.— № 1.— P. 9–11. (rus.)
2. **Pustoshny, A.V.** ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX — a novel reality from IMO [Text] / A.V. Pustoshny // Sudostroenie.— 2012.— № 1.— P. 11–17. (rus.)
3. WARTSILA DIESEL, Vasa 46, Project Guide for

marine application [Text] / Issue 1994.

4. **Lazarevsky, N.A.** Block diagrams of rowing installations, the analysis and prospects of development [Text] / N.A. Lazarevsky, V.A. Khomyak, F.A. Gel'ver, V.F. Samojlenko // (rus.).— 2012.— № 3.— P. 44–47. (rus.)

5. **The copyright certificate RF № 600030.** The Ship power-plant [Text] / G.H. Barakan, J.N. Vol'fenzon, M.I. Kalinina and E.P. Rudenko.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / AUTHORS

КАЛИНИНА Марина Ивановна — кандидат технических наук доцент кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: mi.kalinina2012@yandex.ru
KALININA Marina I. — St.-Petersburg state Polytechnical University, 195251, Polytechnicheskaya Str, 29, Saint Petersburg, Russia, e-mail: mi.kalinina2012@yandex.ru