

УДК 629.553

ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СУДОВ

Аннотация

Рассмотрены методика и компьютерная интеллектуальная технология обоснования оптимального варианта двигательного комплекса судов смешанного плавания на основе метода последовательных приближений и результаты их использования применительно к судну проекта RSD49. Показано, что кроме технических факторов на выбор варианта двигательного комплекса значительное влияние оказывают производственные и эксплуатационные факторы.

Ключевые слова: интеллектуальная технология, метод последовательных приближений, перманентная и адаптивная реализация, двигательные комплексы на базе винтов фиксированного и регулируемого шага.

Повышение эффективности энергетических установок судов - перманентная проблема. В последние годы дополнительный импульс в поисках ее решения придала новая редакция Приложения 6 к МАРПОЛ 73/78 по снижению выбросов углекислого газа с судов, которое (приложение) вступило в силу в 2013 году [1]. Это привело к пересмотру подходов повышения эффективности судовых энергетических установок (СЭУ) в целом и отдельных его комплексов, в частности судового пропульсивного комплекса (СПК).

В работе [2] была предложена модель судового пропульсивного комплекса как системы взаимосвязанных элементов (главного двигателя, главной передачи, валопровода, гребных винтов (в общем случае двигательного комплекса в составе гребных винтов и дополнительных конструкций, например насадок) и корпуса) находящихся в динамическом взаимодействии при работе судна.

Как известно [3,4], наиболее общим параметром эффективности СПК с дизельными главными двигателями является коэффициент полезного действия судового пропульсивного комплекса (чаще коэффициент судового комплекса)

$$\eta_{ск} = \eta_e \eta_{п} \eta_{в} \eta_{пр}, \quad (1)$$

где $\eta_e = 3600/(Q_n b_n)$ - эффективный коэффициент полезного действия (КПД) главного двигателя; b_n и Q_n - удельный расход топлива главного двигателя в кг/кВт*ч и его (топлива) удельная теплота сгорания в кДж/кг;

$\eta_{п}$ и $\eta_{в}$ - КПД главной передачи и валопровода соответственно;

$\eta_{пр} = \eta_p \eta_k$ - пропульсивный коэффициент; η_p - КПД гребного винта;

$\eta_k = (1 - t)/(1 - \psi)$ - коэффициент влияния корпуса судна;

t и ψ — коэффициенты засасывания и попутного потока, которые отражают влияние корпуса на работу двигательного комплекса.

В первом приближении значения t и ψ для судов смешанного плавания могут определяться для [5]:

$$\text{одновинтовых } (x = 1) \quad t = 0,1\delta^2 + 0,26\delta - 0,056; \quad \psi = 0,5\delta - 0,1;$$

$$\text{двухвинтовых } (x = 2) \quad t = 0,05\delta^2 + 0,368\delta - 0,123; \quad \psi = 0,5\delta - 0,16,$$

где δ – коэффициент общей полноты корпуса судов.

Анализ зависимости (1) и значимости элементов СПК свидетельствует о том, что наиболее перспективным направлением повышения его эффективности является увеличение $\eta_{пр}$ за счет совершенствования конструкции и параметров движительного комплекса и корпуса судна, так как потенциал судовых дизельных двигателей по экономии энергии к настоящему времени в значительной степени исчерпан [2-4].

Между тем значение пропульсивного коэффициента зависит не только от упомянутых конструкции и параметров движительного комплекса, но от его энергетических параметров, в частности от частоты вращения гребного винта, причем обратно пропорционально [6]:

$$\eta_{пр} = A/(B + n_d), \quad (2)$$

где A и B – статистические коэффициенты;

n_d – частота вращения гребного винта (в об/мин), которая в свою очередь является функцией множества других параметров пропульсивного комплекса [5], а именно:

$$n_d = B \{ [P_n \eta_p \eta_v \eta_{пр} / v(1-t)]^{0,5} \} / D^2 \quad (3)$$

где P_n – номинальная мощность главного двигателя, кВт; v – скорость судна в полном грузу, км/ч;

B – коэффициент, учитывающий тип судна и конструкцию движительного комплекса (для судов смешанного плавания в первом приближении можно принимать $B = 275$);

D – диаметр гребного винта (в м), значение которого лимитируется осадкой судна и вальностью (количеством гребных валов) СЭУ. В общем случае максимально возможный D для диаметрально расположенного винта обычно принимается не более $75\%T$, а при бортовом расположении винта – не более $65\%T$, где T – осадка судна в полном грузу в м, исходя из обеспечения достаточного зазора между движительным комплексом и корпусом и предотвращения подсоса воздуха при ходе судна в балласте.

Таким образом, зависимость (2), несмотря на её простоту, является многопараметрической и пропульсивный коэффициент зависит от множества факторов, таких как состав и показатели его элементов (главных двигателей, главных передач), вальность СЭУ, осадка судна, форма обводов корпуса, его полнота и т.д., которые в свою очередь также функционально зависимы друг от друга. Многофакторность и многопараметричность приводит к необходимости рассмотреть обоснование состава движительного комплекса и выявление воз-

возможностей повышения его эффективности как решение некоторой оптимизационной задачи [7], исходя из обеспечения в данном случае возможно максимального значения $\eta_{пр}$.

Как известно [8], в общем случае модель оптимизации состоит из функционала, отражающего цель обоснования, системы ограничений и граничных условий, определяющих в конечном итоге область поиска решения. При этом оптимальным считается то решение, которое наилучшим образом отвечает цели в рамках имеющихся ограничений и граничных условий. Функционал модели оптимизации обычно строится на основе целевой функции, то есть величины, которую в данном случае необходимо максимизировать ($\eta_{пр} \rightarrow \max$), и должен представлять собой функциональную зависимость $\eta_{пр}$ от указанных выше параметров. Для построения этой зависимости в данном случае необходимо решить кубическое уравнение

$$\{B^2[P_n \eta_n \eta_v / v(1-)] / D^4\} (\eta_{пр})^3 - B^2 (\eta_{пр})^2 + 2AB \eta_{пр} - A^2 = 0, \quad (4)$$

которое является результатом постановки (3) в (2). Однако получить решение этого уравнения в общем виде, а соответственно и построить классическую модель оптимизации в данном случае представляет известную сложность [9].

В такой ситуации обычно используются методы эвристического программирования, которые базируются на определенных рациональных соображениях и глобальная оптимизация заменяется локальной [8, 10, 11].

В данном случае в качестве такого метода используется метод последовательных приближений, реализованный с помощью интеллектуальной технологии в форме компьютерной программы (таблица 1), которая позволяет выполнять оптимизацию движительного комплекса без решения уравнения (4).

Численное насыщение этой технологии и все дальнейшие обоснования выполнены применительно к судну море-река плавания типа Нева-Лидер (рисунок 1) на основе данных ЗАО «Морское Инженерное Бюро» [12] и статистики, собранной автором для судов смешанного плавания, которая свидетельствует о том, что для таких судов в первом приближении можно принимать в формуле (2) при $A = 300$ для винтов фиксированного шага (ВФШ) $B = 240 \dots 350$ (меньшие значения для ВФШ с насадками), а для винтов регулируемого шага (ВРШ) $B = 310 \dots 400$ (меньшие значения для ВРШ с насадками).

Суда типа Нева-Лидер (проекта RSD49) – это универсальные сухогрузные суда смешанного плавания нового поколения длиной 140 м и дедвейтом 7150 тонн. Их отличает повышенные мореходность, грузоподъемность, контейнерместимость и уровень автоматизации (класс автоматизации до AUT1-C). Указанный объем автоматизации позволяет обслуживать судовую энергетическую установку с применением компьютеров без постоянной вахты в машинном отделении и в центральном посту управления. Районы плавания судов проекта RSD49 ограничены классом R2 (волна до 7,0 м, удаление от мест убежища до 100 миль при расстоянии между местами убежища 200 миль), а ледовые ус-

ловия эксплуатации - неарктической категорией Ice2, которая допускает самостоятельное плавание в мелкобитом разряженном льду толщиной до 0,55 метра. Другими особенностями этих судов являются наличие носового подруливающего устройства, носового бульба, двойной осадки (в реке 3,6 м, а в море до 4,7 м) и повышенного коэффициента общей полноты корпусов (0,902).

Таблица 1

Фрагмент компьютерной интеллектуальной технологии оптимизации
двигательного комплекса судов

БАЗА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ						
ПАРАМЕТР, размерность	Численные значения					
	Варианты					
	1,0	1	2	3	4	5
<i>Данные проекта судна</i>						
Коэффициент общей полноты	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902	0,902
Коэффициент продольной полноты	0,907	0,907	0,907	0,907	0,907	0,907
Осадка судна, м:						
в реке	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
в море	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
Скорость судна, км/ч	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
Тип гребных винтов	ВФШ	ВФШ	ВФШ	ВФШ	ВРШ	ВРШ
Количество гребных винтов	2	2	2	1	1	1
<i>Данные судна-прототипа</i>						
Требуемая мощность главного двигателя, кВт	1162	1162	1085	2500	2650	2500
КПД гребного винта в свободной воде	0,552	0,552	0,591	0,5	0,467	0,494
Пропульсивный коэффициент гребного винта	0,546	0,546	0,585	0,512	0,478	0,504
КПД валопровода	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
БАНК ЗНАНИЙ						
Коэффициент попутного потока	0,291	0,291	0,291	0,351	0,351	=0,5*H21-0,
Коэффициент засасывания	0,250	0,250	0,250	0,260	0,260	=0,1*H21*H
Коэффициент влияния корпуса	1,058	1,058	1,058	1,140	1,140	=(1-H36)/(1-
Расчетный пропульсивный коэффициент винта	0,500	0,584	0,625	0,570	0,533	=H31*H37
<i>Обоснование варианта двигательного комплекса</i>						
Марка главного двигателя	6L20	6L20	6L20	8L26	8L26	8L26 =ИНДЕКС(J
Номинальная эффективная мощность ГД, кВт	1200	1200	1080	2480	2600	2480 =ИНДЕКС(J
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	1000	1000	1000	900	1000	900 =ИНДЕКС(J
Реверсивность	0	0	0	0	0	0 =ИНДЕКС(J
Род топлива	41800	41800	41800	41800	41800	41800 =ИНДЕКС(J
Удельный расход топлива, кг/кВт*ч	0,191	0,191	0,191	0,190	0,192	0,190 =ИНДЕКС(J
КПД главной передачи	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97 =ЕСЛИ(H4С
Диаметр гребного винта, м	2,8	2,8	2,5	3,2	3,2	2,9 =0,617*H25
Частота вращения винта первой итерации, об/мин	206,3	223	275	244	242	295 =(275/(H\$4;
Пропульсивный коэффициент	0,559	0,543	0,577	0,505	0,468	0,491 =300/(315+I
Частота вращения винта второй итерации, об/мин	218,2	215	264	230	226	276 =(275/(H\$4;
Пропульсивный коэффициент	0,547	0,550	0,588	0,517	0,478	0,506 =300/(317+I
Частота вращения винта третьей итерации, об/мин	216	216	266	232	229	280 =(275/(H\$4;
Пропульсивный коэффициент	0,550	0,547	0,587	0,513	0,476	0,501 =300/(319+I
Частота вращения винта четвертой итерации, об/мин	216	216	266	232	228	279 =(275/(H\$4;
Пропульсивный коэффициент	0,549	0,547	0,586	0,513	0,475	0,500 =300/(321+I
Частота вращения винта пятой итерации, об/мин	216	216	266	232	228	278 =(275/(H\$4;
Пропульсивный коэффициент	0,549	0,546	0,585	0,512	0,478	0,504 0,5851
<i>Выбор варианта двигательного комплекса</i>						
Тип гребных винтов	ВФШ					=ЕСЛИ(I57=D54;D27;ЕСЛИ(I57=E54;E27;ЕСЛИ(I57=F54;F27;ЕСЛИ(I57=G
Число гребных винтов	2					=ЕСЛИ(C59=D27;D28;ЕСЛИ(C59=E27;E28;ЕСЛИ(C59=F27;F28;ЕСЛИ(C
Марка главного двигателя	6L20					=ЕСЛИ(C59=D27;D40;ЕСЛИ(C59=E27;E40;ЕСЛИ(C59=F27;F40;ЕСЛИ(C
Номинальная эффективная мощность ГД, кВт	1 080					=ЕСЛИ(C59=D27;D41;ЕСЛИ(C59=E27;E41;ЕСЛИ(C59=F27;F41;ЕСЛИ(C
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	1 000					=ЕСЛИ(C59=D27;D42;ЕСЛИ(C59=E27;E42;ЕСЛИ(C59=F27;F42;ЕСЛИ(C
Реверсивность	0					=ЕСЛИ(C59=D27;D43;ЕСЛИ(C59=E27;E43;ЕСЛИ(C59=F27;F43;ЕСЛИ(C
Род топлива	41800					=ЕСЛИ(C59=D27;D44;ЕСЛИ(C59=E27;E44;ЕСЛИ(C59=F27;F44;ЕСЛИ(C
Удельный расход топлива, кг/кВт*ч	0,191					=ЕСЛИ(C59=D27;D45;ЕСЛИ(C59=E27;E45;ЕСЛИ(C59=F27;F45;ЕСЛИ(C
КПД главной передачи	0,97					=ЕСЛИ(C59=D27;D46;ЕСЛИ(C59=E27;E46;ЕСЛИ(C59=F27;F46;ЕСЛИ(C
Диаметр гребного винта, м	2,5					=ЕСЛИ(C59=D27;D47;ЕСЛИ(C59=E27;E47;ЕСЛИ(C59=F27;F47;ЕСЛИ(C
Оптимальная частота вращения гребного винта, об/мин	266					=ЕСЛИ(C59=D27;D56;ЕСЛИ(C59=E27;E56;ЕСЛИ(C59=F27;F56;ЕСЛИ(C
Пропульсивный коэффициент	0,585					=ЕСЛИ(C59=D27;D57;ЕСЛИ(C59=E27;E57;ЕСЛИ(C59=F27;F57;ЕСЛИ(C
Отношение мощности ГД к оборотам, кВт/(об/мин)	1,08					=С62/С63
Требуемое передаточное число	3,763					=С63/С69
Марка главной передачи	RR1941					=ИНДЕКС(Т"Главные передачи"!*\$B\$1:Т"Главные передачи"!*\$B\$10;1;НАИ
Номинальное передаточное число	3,522					=ИНДЕКС(Т"Главные передачи"!*\$B\$1:Т"Главные передачи"!*\$B\$10;1;НАИ
Допустимое отношение мощности к оборотам, кВт/(об/мин)	2					=ИНДЕКС(Т"Главные передачи"!*\$B\$1:Т"Главные передачи"!*\$B\$10;1;НАИ
Фактическая частота вращения гребных винтов, об/мин	284					=С63/С74
Пропульсивный коэффициент гребных винтов	0,565					=300/(247+С76)
КПД судового пропульсивного комплекса	0,245					=(3600/(С65*С66))*С33*С67*С77



Рисунок 1. Судно смешанного плавания проекта RSD49

В основу интеллектуальной технологии обоснования состава движительного комплекса (таблица 1) положена следующая модель оптимизации, построенная на базе вышеприведенных зависимостей:

$$\eta_{пр} = A/(B + n_d) \rightarrow \max;$$

$$\text{при } n_d = B \{ [P_H \eta_{п} \eta_{в} \eta_{прт} / v(1-t)]^{0,5} \} / D^2,$$

$$\text{где } \eta_{прт} = \eta_p(1-t)/(1-\psi);$$

$$t = \text{ЕСЛИ}(x = 1; (0,1\delta^2 + 0,26\delta - 0,056); (0,05\delta^2 + 0,368\delta - 0,123));$$

$$\psi = \text{ЕСЛИ}(x = 1; (0,5\delta - 0,1); (0,5\delta - 0,16));$$

$$0,95P_T \leq P_H \leq 1,1P_T; \quad D = \text{ЕСЛИ}(x = 1; (\leq 0,75T); (\leq 0,65T));$$

$$\eta_{п} = \text{ЕСЛИ}(r = 1; 0,98; 0,97); \quad \eta_{в} = 0,99; \quad v = v_H,$$

где x – количество гребных винтов; $r = 1$ – главный двигатель реверсивный, а иначе ($r = 0$) нет; v_H – номинальная скорость судна в грузу; P_T – требуемая мощность главного двигателя в кВт, обоснование которой выведено за рамки настоящей статьи.

Параметром оптимизации в этой модели является частота вращения гребных винтов, которая позволяет обеспечить возможно большее значение пропульсивного коэффициента в рамках сформулированных ограничений и граничных условий (в дальнейшем оптимальная частота вращения гребных винтов).

По форме используемый для поиска решений с помощью этой модели метод совпадает с известным методом решения уравнений - методом итераций, а по сути состоит в том, что в данном случае оптимальная частота гребных винтов определяется в процессе ряда последовательных шагов (итераций) расчета их

частоты вращения и пропульсивного коэффициента с промежуточной логической оценкой полученных результатов. Причем реализация этих итераций может быть перманентной, когда коэффициенты А, Б и В модели оптимизации неизменны и равны значениям, характерным для рассматриваемого типа судов, или адаптивной, когда они в процессе каждой итерации закономерно корректируются (приспосабливаются). При этом в случае перманентной реализации для первой итерации расчета n_d обычно используется нижнее значение диапазона $\eta_{пр}$, характерного для рассматриваемого типа судов, а при адаптивной реализации используется в данном случае расчетное (теоретическое) значение пропульсивного коэффициента $\eta_{прт}$. Далее действует общая схема, а именно: для второй итерации используется значение $\eta_{пр}$, рассчитанное на основе n_d первой итерации, для третьей итерации – значение $\eta_{пр}$, рассчитанное на основе n_d второй итерации, и т.д. Отличие перманентной и адаптивной реализации здесь состоит в том, что во втором случае (при адаптивной реализации) коэффициенты А, Б и В функционала модели оптимизации в процессе каждой итерации корректируются по определенному логическому закону. Такой подход позволяет в общем случае более точно определить оптимальную частоту вращения гребных винтов.

На рисунке 2 показано, как работает механизм перманентной (черная ломаная линия) и адаптивной (зеленая ломаная линия) реализации метода последовательных приближений к искомому (оптимальному) значению $\eta_{пр}$.

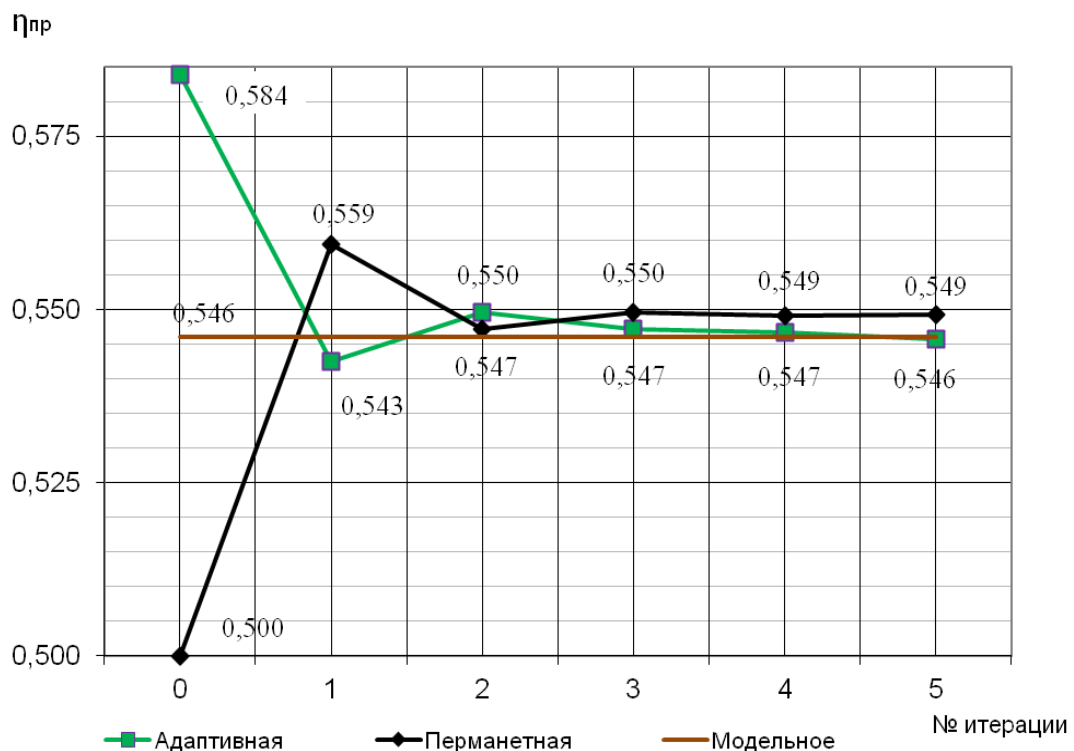


Рисунок 2. Механизм адаптации модели оптимизации движительного комплекса судов

В первом случае (перманентная реализация) значение $\eta_{\text{прт}}$ равно 0,500 (это нижнее значение диапазона $\eta_{\text{пр}}$, характерного для рассматриваемого типа судов), а во втором случае 0,584 (это расчетное значение пропульсивного коэффициента в данном случае для варианта движительного комплекса из двух открытых ВФШ (таблица 1)). В процессе первой итерации коэффициенты А, Б и В как в первом, так и во втором случае неизменны, а далее при адаптивной реализации закономерно изменяются. Логика подсказывает, что, например, при неизменном коэффициенте А коэффициент Б надо повышать, причем постепенно с тем, чтобы не «проскочить» оптимум $\eta_{\text{пр}}$, который в общем случае неизвестен (в данном частном случае за оптимум $\eta_{\text{пр}}$ принято значение пропульсивного коэффициента, полученное при модельных испытаниях). В итоге из сравнения перманентного и адаптивного вариантов устанавливается закон адаптации модели оптимизации к конкретному типу судна (в данном случае к проекту RSD49) и количество итераций, позволяющих получить удовлетворительный результат по оптимальной частоте вращения гребных винтов (в данном случае достаточно пяти итераций).

Рассмотренный адаптивный механизм реализации метода последовательных приближений был использован для поиска решений по 5 вариантам движительного комплекса судна типа Нева-Лидер (таблица 1): 1 (с двумя открытыми ВФШ); 2 (с двумя ВФШ с насадками); 3 (с одним открытым ВФШ); 4 (с одним открытым ВРШ); 5 (с одним ВРШ с насадкой). Вариант 1,0 (перманентной реализации с двумя открытыми ВФШ) – технологический для самообучения программы путем адаптации моделей, положенных в её основу. Для реализации программы предварительно был сформирован массив исходных данных на основе материалов статьи [12], тем самым конкретизированы ограничения, граничные условия и область поиска решений. Далее программа из базы по судовым дизелям автоматически выбрала главный двигатель для каждого варианта движительного комплекса, определила среди них оптимальный (имеющий наибольший пропульсивный коэффициент) и сформировала состав судового пропульсивного комплекса с оптимальным движительным комплексом.

В результате было установлено, что оптимальным вариантом для судна проекта RSD49 является вариант движительного комплекса с двумя ВФШ с насадками, что абсолютно совпадает с выводами проектировщиков судна [12]. Пропульсивный коэффициент этого варианта движительного комплекса (вариант 2 таблицы 1) заметно больше по сравнению с аналогичным других вариантов, в частности на 7% по сравнению с 1 вариантом (с двумя открытыми ВФШ), на 16% по сравнению с 5 вариантом (с одним ВРШ с насадкой) и на 22% по сравнению с 4 вариантом (с одним открытым ВРШ).

На рисунке 3 выполнена графическая иллюстрация полного цикла обоснований по оптимальному варианту движительного комплекса.

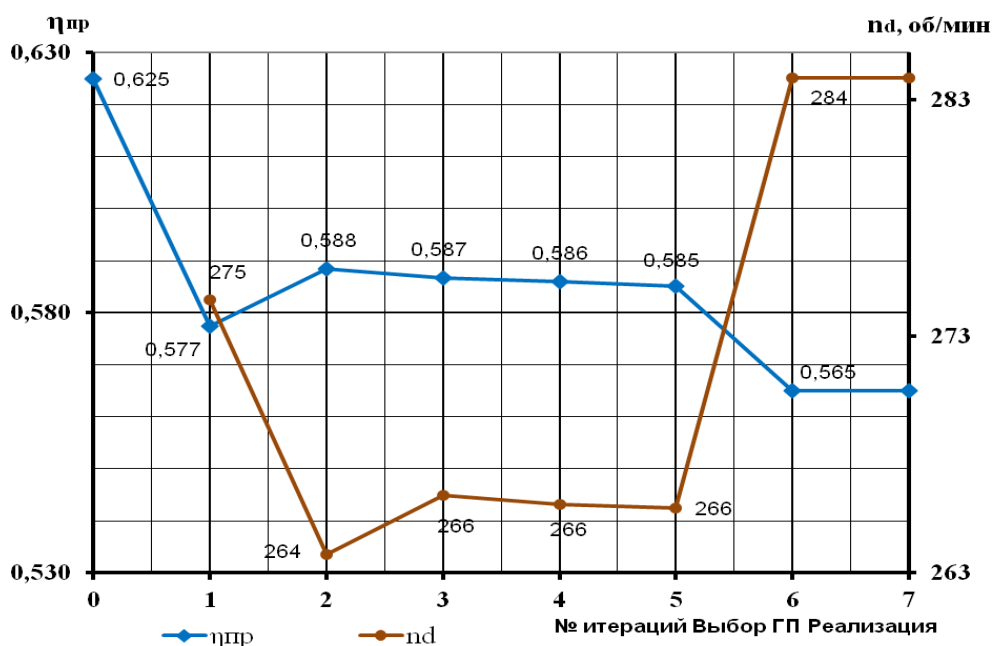


Рисунок 3. Алгоритм оптимизации движительного комплекса на основе двух ВФШ с насадками: ГП – главная передача

Из рисунка 3 следует, что оптимальная частота гребных винтов движительного комплекса судна проекта RSD49 с двумя ВФШ с насадками равна 266 об/мин. Для обеспечения этой частоты из базы по главным передачам программа подобрала ревер-редуктор с передаточным числом 3,522 при требуемом 3,763 (увы номенклатура редукторных передач ограничена). При такой передаче и выбранном главном двигателе 6L20 частота вращения гребных винтов на номинальном режиме работы будет 284 об/мин, а их пропульсивный коэффициент на уровне 56,5%, что на 3,5% меньше оптимального для варианта с двумя ВФШ с насадками (0,585), но и на те же 3,5% выше оптимального с двумя открытыми ВФШ (0,564) - варианта, который, как отмечено в [12], был фактически реализован на судне по указанию заказчика для облегчения работы в ледовых условиях (рис.4).



Рисунок 4. Движительно-рулевой комплекс судна проекта RSD49

На рисунке 5 выполнена графическая иллюстрация полного цикла обоснований по фактически реализованному движительному комплексу судна типа Нева-Лидер.

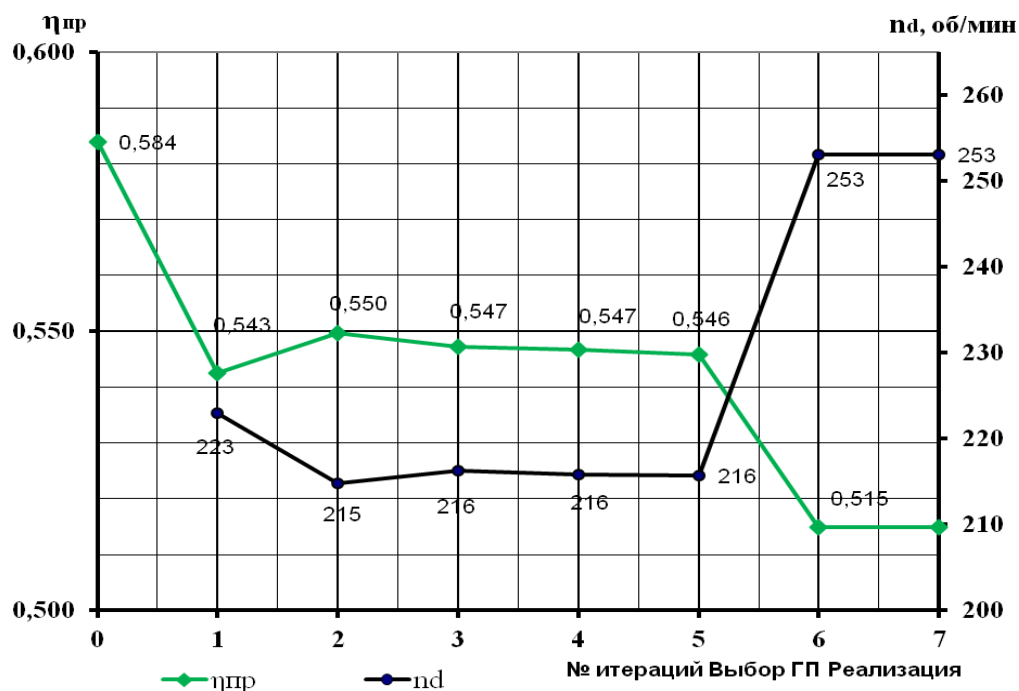


Рисунок 5. Алгоритм оптимизации движительного комплекса на основе двух открытых ВФШ: ГП – главная передача

Из рисунка 5 следует, что оптимальной частотой гребных винтов фактически реализованного движительного комплекса судна проекта RSD49 является частота в 216 об/мин, при которой значение пропульсивного коэффициента обеспечивается на уровне 54,6%. Для обеспечения этой частоты из базы передач программа предложила использовать ревер-редуктор с передаточным числом 3,952. При такой передаче и главном двигателе 6L20 частота вращения гребных винтов на номинальном режиме работы будет 253 об/мин, а их пропульсивный коэффициент на уровне 51,5%, что на 9,7% меньше пропульсивного коэффициента реально возможного, но нереализованного движительного комплекса. То есть, решение заказчика привело к снижению эффективности движительного комплекса практически на столько же, что и влияние всех других факторов вместе на выбор оптимального комплекса с двумя ВФШ с насадками ($100(1 - 0,565/0,625) = 9,6\%$ (рис.4)).

Таким образом:

- разработанная методика и интеллектуальная технология обоснования состава движительных комплексов на основе метода последовательных приближений являются реально работающими, позволяющими не только установить оптимальный вариант движительного комплекса судна, но и состав судового пропульсивного комплекса в целом;

- на выбор движительного комплекса кроме технических факторов влияют также и такие факторы как возможная номенклатура судового оборудования с необходимыми технико-эксплуатационными параметрами и опыт эксплуатации судов. Причем в современных условиях влияние последних зачастую является определяющим.

Список литературы

1. Приложение 6 к МАРПОЛ 73/78 (пересмотренное). — Российский морской регистр судоходства, 2011. — 52 с.

2. Артемов, Г. А. Судовые энергетические установки / Г. А. Артемов, В. П. Волошин, Ю. В. Захаров, А. Я. Шквар. — Л.: Судостроение, 1988. — 313 с.

3. Проектирование судов внутреннего плавания. - Л.: Судостроение, 1974. - 335 с.

4. Артюшков Л. С. Судовые движители: учебник для вузов / Л. С. Артюшков, А. Ш. Ачкинадзе, А. А. Русецкий. — Л.: Судостроение, 1988. — 296 с.

5. Баёв, А.С. Влияние осадки судов на структуру их энергетических установок / А.С.Баёв // Судостроение 4'2018 (839). С.26-28.

6. Баёв, А.С. Моделирование процессов судовой энергетики: материалы третьей Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики» / А.С.Баёв - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. С.119-120.

7. Даниловский, А. Г. Оптимизация судового пропульсивного комплекса: монография / А. Г. Даниловский, М. А. Орлов, И. А. Боровикова. — СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2007. — 175 с.

8. Бункин, В. А. Решение задач оптимизации в управлении машиностроительным производством / В. А. Бункин, Б. Я. Курицкий, Ю. А. Сокуренок — Л.: машиностроение, 1976. — 232 с.

9. Математическая энциклопедия/ Главный редактор И.В.Виноградов – М.: Советская энциклопедия, 1977.

10. Баёв, А.С. Оптимизация укладки коленчатых валов судовых дизелей методом эвристического программирования / А.С.Баёв // Двигателестроение, 1982, № 11. С.57-60.

11. Баёв, А.С. Оптимизация энергоиспользования судовых энергетических установок методами эвристического программирования: материалы четвертой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики» / А.С.Баёв - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2015. С.125-126.

12. Егоров, Г.В. Многоцелевые сухогрузные суда «Волго-Дон макс» дедвейтом 7150 тонн проекта RSD49 типа «Нева-Лидер» / Г.В.Егоров, В.И.Тонюк // Судостроение 2'2014. С. 9-17.