

Скоростные катера и малотоннажные суда глиссирующего типа находят самое широкое применение в мире, причем не только в гражданских структурах, но в силовых, включая военно-морские силы, береговую охрану и др. Не является исключением использование скоростных катеров и судов силовыми структурами Российской Федерации.

Однако анализ состава энергетического оборудования скоростных катеров, создаваемых для силовых структур России, выявил устойчивую закономерность оснащения их энергетическим оборудованием исключительно зарубежного происхождения, причем из недружественных стран.

Основной причиной, побудившей отечественных конструкторов массово использовать на проектируемых катерах и судах оборудование зарубежных производителей, является отсутствие отечественных аналогов, по уровню технико-экономических характеристик сопоставимых с зарубежными аналогами.

В силу вышеизложенного на сегодняшний день остро стоит проблема импортозамещения силового оборудования скоростных катеров и судов.

Обоснование способов импортозамещения – непростая задача, так как конструкторам необходимо оценить конечный результат, т.е. какими характеристиками будут обладать импортозамещенные дизельные двигатели и как это отразится на ТТХ скоростных катеров, а главное какие ресурсы необходимо затратить на опытно-конструкторские работы по импортозамещению с учетом их крайней ограниченности. При этом под способом импортозамещения легких высокооборотных дизельных двигателей будем подразумевать реализацию следующих мероприятий:

- выбор конкретного промышленного кластера или промышленной площадки, которые потенциально приспособлены для реализации полного цикла импортозамещения, включающих конструкторскую и производственную базы, испытательные стенды и налаженные цепочки контрагентских поставок основного оборудования, необходимого для серийного производства дизельных двигателей;
- обоснование конкретных мероприятий в плане импортозамещения, таких как, например: разработка («с нуля») согласно ТЗ комплекта рабочей конструкторской документации, создание опытных образцов дизельного двигателя морского исполнения и проведение предварительных и межведомственных испытаний с присвоением конструкторской документации литеры О1, организация серийного производства; либо форсирование (дефорсирование) по мощности существую-

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКИХ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СОСТАВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СКОРОСТНЫХ КАТЕРОВ И СУДОВ, ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ИХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

К.Г. Голубев, д-р техн. наук, ген. директор,

В.В. Барановский, д-р техн. наук, проф., зам. ген. директора по энергетическим установкам, судовым системам и устройствам,

С.В. Домнин, начальник сектора,

А.В. Довличарова, вед. инженер-конструктор,

АО «ЦМКБ «Алмаз»,

контакт. тел. (812) 373 2899, office@almaz-kb.ru

щих дизельных двигателей морского исполнения, но по каким-либо причинам не устраивающих проектантов скоростных катеров, например по агрегатной мощности; либо реинжиниринг (реверс инжиниринг) или процесс изучения образцов импортного оборудования, в нашем случае двигателей зарубежного производства, с целью разработки и изготовления аналога или улучшенной версии; либо доработка существующих аналогов промышленного назначения, например автомобильных дизельных двигателей, до двигателей морского назначения и т.п.;

- поскольку каждое из обозначенных выше мероприятий в процессе практической реализации имеет вполне конкретные временные и затратные (финансовые) затраты, в процессе обоснования наиболее предпочтительных способов импортозамещения необходимо их строго учитывать и по возможности минимизировать.

С учетом вышеизложенного можно утверждать, что способов импортозамещения двигателей может быть множество, в зависимости от выбранного промышленного кластера и его профильной ориентации, выбранных мероприятий импортозамещения, которые могут иметь свои особенности для каждого кластера и др. Каждый из возможных способов может отличаться по эффективности реализации самой задачи. Определение наиболее предпочтительного способа импортозамещения из множества возможных требует серьезного научного обоснования.

Другими словами, требуется разработка расчетной математической модели, в которой путем моделирования наперед

задаваемых свойств объекта, т.е. технико-экономических характеристик импортозамещаемых дизельных двигателей, синтезировать (т.е. воссоздать) их образ в виде технико-экономических характеристик (ТЭХ) и подтвердить, насколько они будут соответствовать целевому назначению двигателей с позиций технико-экономической эффективности.

Поэтому для решения задачи импортозамещения легких высокооборотных дизельных двигателей, используемых в составе энергетических установок скоростных катеров и судов, приходится прибегать к математическому моделированию. Основные технико-экономические характеристики двигателей в процессе математического моделирования должны найти отражение в конкретных показателях и критериях эффективности при формулировке, постановке и решении задачи оптимизации.

Суть математического моделирования заключается в том, что объект моделирования (в данном случае дизельные двигатели), обладая множеством технико-экономических характеристик, предопределяет такие важнейшие тактико-технические характеристики (ТТХ) скоростных катеров (т.е. системы более высокого уровня), как скорость полного и максимального ходов, маневренность, рейтинг использования катера (т.е. длительность поддержания различных скоростных режимов), автономность и дальность плавания и др.

Исходя из методологии системного подхода к решению задач импортозамещения двигателей для скоростных катеров и судов, обоснование «облика» создаваемого объекта следует рассматривать как задачу синтеза его «образа», иначе говоря, как обратную задачу анализа.

При этом может использоваться аксиома выбора, заключающаяся во введении принципа возможности количественной оценки качества функционирования дизельных двигателей в составе энергетической установки катера. Для реализации этого принципа вводится понятие функции выбора, позволяющей оценивать альтернативные варианты и делать выбор на этой основе предпочтительного варианта [1–3].

Из всего множества ТЭХ дизельного двигателя выделяется ограниченное подмножество, выступающее в задаче оптимизации в качестве множества всех оптимизируемых переменных. Сопоставив каждому набору значений, принимаемых элементами этого множества, с некоторым вектором x , компонентами которого будут ТЭХ дизеля, можно утверждать, что каждому значению вектора x соответствует свой вариант дизеля, создаваемого по программе импортозамещения.

В данном случае компонентами вектора x могут быть цилиндровая и агрегатная мощность двигателя ($кВт$), частота вращения ($об/мин$), его масса ($кг$) и габариты ($L \times B \times H$, мм), размерность (диаметр цилиндра и ход поршня, см), удельный расход топлива ($г/кВт \cdot ч$), количество цилиндров, надежность (показатели ресурса до переборки, до капитального ремонта и до списания, часы) и др. Множество значений вектора $x \in \{X\}$ является областью решения задачи.

Можно считать, что ТЭХ дизелей, определяемые компонентами вектора x , варьируются независимо друг от друга, т.е. являются *независимыми* переменными.

Существуют также *зависимые переменные*, значения которых зависят от значений вектора x , множество значений которых можно записать в виде множества $\{Y\}$. В качестве компонентов вектора $y \in \{Y\}$ могут выступать скорость полного и максимального хода катера, удельная стоимость серийного образца, а также свойства, характеризующие надежность, живучесть и безопасность дизеля и ряд других свойств. Значение вектора y полностью определяется заданием вектора x . В общем виде связь между этими переменными выражается следующим образом:

$$F: \{X\} \rightarrow \{Y\} \text{ или } Y = F(X), \quad (1)$$

где F – так называемая передаточная функция, или математическая модель.

Для получения оптимального сочетания компонентов вектора x необходимо записать задачу исследования в терминах теории оптимизации. В этих терминах задача оптимизации задается тройкой [1–3]

$$(F, g, \{X^f\}), \quad (2)$$

где F – множество математических зависимостей, определяющих связи между независимыми и зависимыми переменными; $\{X^f\}$ – множество переменных,

определяющих область допустимых решений; g – функция качества или целевая функция задачи $g = \{X\} \times \{Y\} \rightarrow \{V\}$; $\{X\}$ – множество решений; $\{V\}$ – множество оценок ТЭХ дизелей, которое предполагается линейно или частично упорядоченным отношением вида $\leq$ или $\geq$. Сужение множества $\{X\}$ обусловлено необходимостью удовлетворить системе ограничений, обеспечивающих содержательность математической модели оптимизации. К ограничениям в нашем случае могут относиться ограничения по габаритам и массе дизеля, по ресурсу, по агрегатной мощности и др.

Функцию $g(x)$ называют также *критерием оптимальности*, определяя ее как количественную меру качества различных способов импортозамещения двигателя, образующегося в каждой точке варьирования характеристик [1–3].

Функцию g можно представить в виде

$$g(x) = g[x, F(x)]. \quad (3)$$

С учетом вышеизложенного, задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: для данного подмножества $\{X^f\} \subset \{X\}$ требуется найти такое $\hat{x} \in \{X^f\}$, которое обращает в экстремум критерий эффективности:

$$g(\hat{x}) = \text{extr} g(x) \text{ или } g(\hat{x}) \leq g(x), \forall x \in \{X^f\}. \quad (4)$$

Решением задачи оптимизации, в данном случае однокритериальной, заданной тройкой (2), называется элемент $\hat{x} \in \{X^f\}$, удовлетворяющий условию (4) и представляющий собой l -мерный вектор, компонентами которого являются наиболее предпочтительные значения характеристик создаваемых легких высокооборотных дизелей при их использовании в составе ЭУ скоростных катеров.

Особое место при постановке задачи оптимизации ТЭХ занимает процедура выделения подмножества $\{X^f\}$ допустимых решений задачи из множества $\{X\}$ всех решений. В общем виде система ограничений, определяющая границы множества $\{X^f\}$, представляет собой совокупность ограничений, накладываемых на область изменения независимых переменных x (так называемых, *тривиальных ограничений*) и ограничений, накладываемых на область изменения функции F (*функциональных ограничений*). В данном случае систему ограничений можно записать в виде

$$\begin{aligned} x_i &\leq x_{i0}, \forall x \in \{X\}, i \in \{I\}; \\ y_j &\leq y_{j0}, \forall y \in \{Y\}, j \in \{J\}. \end{aligned} \quad (5)$$

При обосновании наиболее предпочтительных способов импортозамещения дизелей, множество $\{X\}$ может быть задано либо в виде дискретного конечного набора векторов x (т.е. задано конечное значение количества цилиндров создаваемого дизеля), либо в виде непрерывного замкнутого ограниченного множес-

тва значений варьируемых компонентов вектора x (например, значений развиваемой мощности дизеля в зависимости от скорости хода катера). При дискретном способе задания множества $\{X\}$ оптимизацию характеристик ДВС называют сравнительной оценкой вариантов, при непрерывном – оптимизацией в пространстве технико-экономических характеристик ДВС или свойств, составляющих качество дизеля [1].

Из вышеизложенного следует, что основной задачей, которая решается при обосновании способов импортозамещения ДВС скоростных катеров, является поиск компромисса между различными их свойствами. Наиболее полно вопросы теории компромиссных решений при проектировании кораблей изложены в [1–3] и поэтому, опуская эти подробности, ограничимся рамками нашей задачи.

Наиболее полно идее поиска компромисса отвечают многокритериальные задачи оптимизации (МКЗО). При решении МКЗО кроме аксиомы выбора добавляется еще одно условие, определяющее вид используемой для решения функции выбора. Наиболее часто вид указанной функции принимается в форме свертки частных критериев эффективности.

МКЗО, отвечающая идее поиска компромисса, может задаваться четырьмя множествами [2]

$$\{F\}, \{g\}, G, \{X^\pi\}, \quad (6)$$

где $\{F\}$ – множество математических моделей, определяющих альтернативные варианты системы и её элементов; $\{g\}$ – множество частных критериев эффективности; $\{X^\pi\}$ – множество сочетаний значений управляемых переменных, принадлежащих области Парето; G – свертка частных критериев.

Сверткой критериев называют монотонную функцию от их значений, с помощью которой от векторного критерия переходят к скалярному.

В отличие от однокритериальной задачи оптимизации здесь рассматривается множество моделей формирования альтернативных вариантов системы, множество частных критериев эффективности, и не просто область допустимых решений $\{X^f\}$, а ее сужение – область Парето $\{X^\pi\}$. Кроме того, дополнительно вводится вид свертки частных критериев G .

Решением МКЗО будет сочетание управляемых переменных, принадлежащих области Парето:

$$\begin{aligned} \hat{X} &\in \{X^\pi\}; \\ G(X) &= G\{g_i(X)\}, i \in \{I\}; \\ G(\hat{X}) &= \text{extr} G(X). \end{aligned} \quad (7)$$

Понятие об области Парето и методах решения МКЗО также достаточно полно изложены в [1–3].

Одним из наиболее важных этапов решения задачи оптимизации характе-

ристик легких высокооборотных дизельных двигателей является выбор критерия оптимальности g , выполнение для которого условия $g(\hat{x}) \leq g(x)$, $\hat{x}, \forall x \in \{X^f\}$ обеспечит получение оптимального вектора $\hat{x}$ варьируемых переменных. Поскольку импортозамещение дизельных двигателей осуществляется с вполне определенной целью, то указанный критерий должен характеризовать степень достижения ЭУ катера своего целевого предназначения, т.е. обеспечения поступательного движения и маневренности, а также проектной дальности плавания. Степень достижения цели обычно определяется как эффективность, количественной мерой которой является показатель эффективности. Принцип выбора показателя эффективности состоит в установлении строгого соответствия между целью, которая должна быть достигнута, и избираемым показателем эффективности [1 – 3].

С учетом особенностей использования скоростных катеров силовых структур России, а также особенностей построения критерия оптимальности наиболее предпочтительным вариантом формулировки задачи оптимизации по обоснованию способов импортозамещения дизельных двигателей может быть многокритериальная задача оптимизации, сформулированная так: «Обоснование способа импортозамещения дизельных двигателей скоростных катеров, которые при наименьшем значении стоимости их разработки и создания обеспечивали бы катерам наибольшие значения скоростей полного и максимального ходов (т.е. имели бы высокую агрегатную мощность, не уступающую зарубежным аналогам) при минимальных значениях массы и минимальных значениях удельных расходов топлива».

Для сформулированного критерия эффективности на первое место в качестве определяющего обосновывается затратный показатель, т.е. стоимость разработки, создания и эксплуатации дизельных двигателей в составе скоростных катеров

$$E_1(X) = C^{\Gamma\Delta}(X) = f(C_{\text{ОКР}}^{\Gamma\Delta}, C_{\text{С}}^{\Gamma\Delta}, C_{\text{экспл}}^{\Gamma\Delta}) \rightarrow \min.$$

Такое решение обусловлено ограниченностью финансовых ресурсов государства на реализацию подобных ОКР. Остальные показатели эффективности по приоритетности можно соответственно ранжировать как:

$$E_2(X) = \sum_{i=1}^n Ne_i \rightarrow \max;$$

$$E_3(X) = \sum_{i=1}^n M_{\Gamma\Delta} \rightarrow \min;$$

$$E_4(X) = b_{ei}^{\Gamma\Delta} \rightarrow \min,$$

или максимизация агрегатной мощности и минимизация массогабаритных характеристик и удельного расхода топлива.

Соответственно частные (локальные) критерии, или целевые функции, могут быть записаны следующим образом:

$$g_1(X) = C^{\Gamma\Delta} \rightarrow \min;$$

$$g_3(X) = \sum_{i=1}^n M_{\Gamma\Delta} \rightarrow \min;$$

$$\text{и } g_4(X) = b_{ei}^{\Gamma\Delta} \rightarrow \min.$$

С учетом ограничений МКЗО имеет вид

$$\left. \begin{aligned} G(X) &= g_1(X) - \lambda_1 \cdot g_2(X) + \\ &+ \lambda_2 \cdot g_3(X) + \lambda_3 \cdot g_4(X); \\ g_1(X) &= C_i^{\Gamma\Delta} \rightarrow \min; \\ g_2(X) &= \sum_{i=1}^n Ne_i \rightarrow \max; \\ g_3(X) &= \sum_{i=1}^n M_{\Gamma\Delta} \rightarrow \min; \\ g_4(X) &= b_{ei}^{\Gamma\Delta} \rightarrow \min; \\ \hat{X} &\in \{X^{\pi}\}; \\ G(\hat{X}) &= G\{g_i(X)\}; i \in \{I\}; \\ G(\hat{X}) &= \text{extr}G(X); \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$G(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_{i-1} g_i(X), \quad \lambda_0 = 1; \quad (9)$$

$$g_1(\hat{x}) = \lambda_1 g_2(\hat{x}) = \dots = \lambda_{n-1} g_n(\hat{x}), \quad (10)$$

где $g_1(\hat{x})$ и $g_2(\hat{x})$ – значения целевых функций в точках локальных оптимумов,

$$\text{откуда } \lambda_1 = \frac{g_1(\hat{x})}{g_2(\hat{x})}; \lambda_2 = \frac{g_1(\hat{x})}{g_3(\hat{x})}; \lambda_3 = \frac{g_1(\hat{x})}{g_4(\hat{x})}.$$

Здесь целевая функция $G(X)$ представлена в виде линейной свёртки частных критериев с неопределёнными коэффициентами. Множитель λ_i (коэффициенты приведения) приводит критерии g_1, g_2, g_3 и g_4 к единой размерности и определяет меру компромисса между результатами оптимальных решений. Ко-

Расчетные значения локальных критериев $g_i(X)$ и значений целевой функции $G(X)$ позволят конструкторам определиться с выбором наиболее предпочтительных способов импортозамещения дизельных двигателей различных производителей.

С этой целью для каждого из способов импортозамещения дизельных двигателей, удовлетворяющих условиям ограничений задачи оптимизации, расчетным путем находится рациональное сочетание основных технико-экономических характеристик двигателей и вычисляется значение целевой функции, значение которой и определяет наиболее предпочтительный способ их импортозамещения.

Ниже, в таблице, представлен пример расчета локальных критериев, коэффициентов приведения и целевой функции решения МКЗО вида (8) для пяти различных способов импортозамещения дизельных двигателей, позволяющих определить наиболее предпочтительный способ импортозамещения, значение целевой функции для которого минимально.

Таким образом, выше рассмотрены особенности постановки и решения задачи математического моделирования технико-экономических характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей для использования в составе энергетических установок скоростных катеров и судов, позволяющие конструкторам расчетным путем обосновывать наиболее предпочтительные способы их импортозамещения на ранних этапах постановки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Таблица
Расчетные значения локальных критериев, коэффициентов приведения и целевой функции

Способы импортозамещения дизельных двигателей	Значения локальных критериев $g_i(X)$, коэффициентов λ_i и целевой функции $G(X)$							
	$g_1(X)$	$g_2(X)$	$g_3(X)$	$g_4(X)$	λ_1	λ_2	λ_3	$G(X) = g_1(X) - \lambda_1 g_2(X) + \lambda_2 g_3(X) + \lambda_3 g_4(X)$
1	2000	1470	3100	0,218	0,63	0,43	6097,0	3 736
2	20 000	2000	3500	0,205				21 495
3	1 250	1950	4267	0,205				3 106
4	20 000	2000	3500	0,22				21 586
5	6 000	1500	2900	0,22				7 643

эффицент приведения находится из граничного условия Рассматриваемые функции показателей эффективности $g_1(X), g_2(X), g_3(X)$ и $g_4(X)$ являются вогнутыми возрастающими функциями переменных X , изменяющимися от 0 до своих предельных значений, что позволяет говорить о наличии оптимальных решений. Следовательно, решение задачи с целевой функцией вида (8) будут Парето – оптимальными.

ЛИТЕРАТУРА

- Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. – СПб.: Судостроение, 2001.
- Захаров И.Г. Теория компромиссных решений при проектировании корабля. – Л.: Судостроение, 1987.
- Попов Г.И., Захаров И.Г. Теория и методы проектирования корабля: Учебник. – Л.: ВМА, 1985. ■