УДК 629.124.72
С 60

О ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ СОСТАВНЫМИ ЧАСТЯМИ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ

О. И. Соломенцев, д-р техн. наук

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрены исходные уравнения теории проектирования судов. Показано, что основные соотношения так называемой классической теории проектирования судов и теории оптимального проектирования судов есть частные случаи полученных в данной работе исходных уравнений.

Ключевые слова: теория проектирования судов, исходные уравнения, модель синтеза, модель анализа.

Анотація. Розглянуті вихідні рівняння теорії проектування суден. Показано, що основні співвідношення так званої класичної теорії проектування суден та теорії оптимального проектування являють собою окремі випадки отриманих у даній роботі вихідних рівнянь.

Ключові слова: теорія проектування суден, вихідні рівняння, модель синтезу, модель аналізу.

Abstract. In this work were founded a fundamental equations of the ship design theory. This equations include well-known equations of the classic ship design theory and well-known equations of the theory of optimal ship design.

Keywords: theory of ship design, base equations, synthesis model, analysis model.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

К началу 1960-х годов трудами И.Г. Бубнова, В.Л. Поздюнина, Л.М. Ногида, А.И. Балкашина, В.В. Ашика была создана так называемая классическая теория проектирования судов и кораблей, которая нашла отражение в учебниках и статьях [1, 2, 4, 5, 13, 15, 16]. А начиная со второй половины 1960-х годов в трудах В.С. Дорина, В.М. Пашина, Л.Ю. Худякова, А.И. Гайковича, И.Г. Захарова [1, 8, 9, 11, 16, 18] начала развиваться, и развивается до настоящего времени, теория оптимального проектирования судов, которая основана на современной теории оптимизации и теории больших систем.

Обычно в истории развития науки доброкачественная часть полученного ранее научного знания входит в состав позднее найденного знания как частный случай. К сожалению, в данном случае так не получилось. О возникших здесь проблемах можно судить по учебникам [1, 11, 16]. Попытка установить более органичную связь между двумя частями теории проектирования судов была предпринята в работе [17]. Дальнейший анализ этого вопроса привел автора к выводу о существовании таких уравнений теории проектирования, из которых и классическая теория проектирования, и теория оптимального проектирования вытекают как частные случаи. Эти уравнения автор предлагает назвать исходными уравнениями проектирования судов. Указанные уравнения и являются предметом исследования в данной работе. При этом ограничимся рассмотрением только внутренней задачи теории проектирования.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — вывод и последующий анализ таких исходных уравнений теории проектирования судов, которые включали бы в себя в качестве частных случаев те основные уравнения этой теории, которые применяются как в классической теории проектирования, так и в теории оптимального проектирования.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Введем оператор раскрытия вектора, имеющий вид

$$\{\overline{X}\} = <\textbf{список компонент вектора } \overline{X}> = \\ = x_1, x_2, \ldots, x_N,$$

где N — размерность (количество компонент) вектора $\overline{X}$.

Пусть, далее, $\overline{X}$ — вектор главных элементов проектируемого судна размерностью N, так что $\{\overline{X}\} = x_n, \forall n \in 1, 2, ..., N$; $[G]$ — вектор предъявляемых к судну требований (нормативов); $\overline{G} = \overline{G}(\overline{X})$ — вектор функциональных зависимостей предъявляемых к судну требований от вектора главных элементов $\overline{X}$. При этом $g_\iota(x_n) \in [\overline{G}]$, $\forall \iota \in \mathrm{I}$, $\forall n \in N$ есть нелинейные в общем случае функции $x_n \in \overline{X}$.

Под главными элементами могут пониматься либо так называемые обобщенные главные элементы (обычно это водоизмещение D, полный подпалубный объем W и мощность главных двигателей $N_{\text{ГД}}$ [15]) или главные размерения в сочетании с коэффициентами полноты. Поэтому можно записать

$$X = \overline{X}_1 \wedge \overline{X}_2,\ \{\overline{X}_1\} = D, W, N_{\text{ГД}},\ \{\overline{X}_2\} = \delta, L, B, T,$$

где δ, L, B, T — коэффициент общей полноты, длина, ширина и осадка проектируемого судна и $\wedge$ — логическое «или».

При этом перечни компонент векторов $\overline{X}_1$ и $\overline{X}_2$ на практике могут быть как уже, так и шире. Компоненты векторов $\overline{X}_1$ и $\overline{X}_2$ могут быть нормированы по экстремальным значениям соответствующих переменных, а компоненты вектора $\overline{X}_2$ могут представлять собой не только главные размерения, но и соотношения между ними. Кроме того, все компоненты векторов $\overline{X}_1$ и $\overline{X}_2$ независимы друг от друга. Иными словами,

$$\neg\exists x_n \in \overline{X} : x_n = x_n(x_m),\ n \neq m,\ \forall n, m \in N,$$

где N — размерность вектора $\overline{X}$, а символ $\neg\exists x$ читается как «не существует x, при котором…».

Понятие зависимости компонент векторов $\overline{X}_1$ и $\overline{X}_2$ друг от друга иногда является абсолютным, но чаще оно относительно. Абсолютная зависимость типа $x_n = x_n(x_m)$, $n \neq m, n, m \in N$, x_n, $x_m \in \overline{X}$ имеет место, когда она связана с тем или иным законом природы. Так, в соответствии с законом Архимеда имеем

$$\rho g \sum_{n_2=1}^{4} x_{n_2} = x_{1_1} = D, x_{1_1} \in \overline{X}_1,\ \forall x_{n_2} \in \overline{X}_2, \\ n_1 = 1_1 \in N_1,\ \forall n_2 \in N_2,$$

где ρ, g — плотность воды и ускорение свободного падения, а $N_1 = 3$ и N_2 – размерности векторов $\overline{X}_1$ и $\overline{X}_2$.

Функциональные зависимости этого типа должны безоговорочно учитываться при проектировании. В то же время практически для всех x_n, $x_m \in \overline{X}$, $\forall n$, $m \in N$ на основе методов математической статистики могут быть установлены корреляционные зависимости вида $x_n = x_n(x_m)$ с той или иной мерой колеблемости [1, 2, 5, 11, 13]. Такие зависимости являются относительными в том смысле, что они учитываются в одних задачах, но могут не учитываться в других. Так, на начальных стадиях проектирования применяются статистические зависимости для определения компонент вектора $\overline{X}$, тогда как на последующих стадиях эти же величины могут рассматриваться как независимые. Кроме того, на практике обычно принимается

$$\overline{X}_1, \overline{X}_2 \subset \overline{X} : \overline{X}_1 \cup \overline{X}_2 = \varnothing,$$

где $\varnothing$ — пустое множество.

Иными словами, в одной и той же задаче под вектором $\overline{X}$ понимается или $\overline{X}_1$, или $\overline{X}_2$, но не комбинация компонент этих векторов. Это объясняется тем, что связи типа $x_{n_1} = x_{n_1}(x_{n_2})$ являются либо функциональными, либо корреляционными, но с небольшой мерой колеблемости. Разумеется, что после определения вектора $\overline{X}_1$ ищем вектор $\overline{X}_2 = \overline{X}_2(\overline{X}_1)$ (или наоборот), но операции поиска $\overline{X}_1$ и $\overline{X}_2$ желательно разделить.

Далее в тех случаях, когда изложение в равной мере относится и к $\overline{X} = \overline{X}_1$, и к $\overline{X} = \overline{X}_2$, условимся опустить нижний индекс при $\overline{X}$.

Под требованиями (нормативами) могут, например, пониматься требования к эффективности проектируемого судна, к его стоимости, вместимости, мореходности и прочности. При этом часть нормативов $[\overline{G}_1] \subset [\overline{G}]$ обязательно должна удовлетворяться без избытка и без недостатка, а оставшиеся нормативы $[\overline{G}_2] \subset [\overline{G}]$, $[\overline{G}] = [\overline{G}_1] \cup [\overline{G}_2]$ могут удовлетворяться либо с избытком, либо с недостатком.

Пусть теперь

$$\{\overline{G}_1\} = g_i,\ \{[\overline{G}_1]\} = [g_i],\ i = 1,\ 2,\ ...,\ I,$$

$$\{\overline{G}_2\} = g_j,\ \{[\overline{G}_2]\} = g_j,\ j = 1,\ 2,\ ...,\ J;$$

$$\overline{G}_1 \cup \overline{G}_2 = \overline{G};\ [\overline{G}_1] \cup [\overline{G}_2] = [\overline{G}];\ I + J = \mathrm{I}.$$

Соотношение вида

$$g_i(\overline{X}) = [g_i],\ \forall g_i \in \overline{G}_1,\ \forall [g_i] \in [\overline{G}_1],\ \forall i \in I$$

будем далее называть ***ограничением типа равенства***, а соотношение вид

$$g_j(\overline{X}) \geq [g_j],\ \forall g_j \in \overline{G}_2, \forall [g_j] \in [\overline{G}_2],\ \forall j \in J$$

ограничением типа неравенства, при этом знак «$\geq$» для всякого $j \in J$ всегда может быть заменен знаком «$\leq$».

Функциональные зависимости вида $\forall i \in I : g_i = g_i(\overline{X}) \in \overline{G}_1$ и $\forall j \in J : g_j = g_j(\overline{X}) \in \overline{G}_2$ (или $\forall \iota \in \mathrm{I} : g_\iota = g_\iota(\overline{X}) \in \overline{G}$) будем далее называть ***частными моделями анализа***, которые являются элементами соответствующей ***прямой задачи.*** А прямая задача в целом (***модель анализа***) представляет собой совокупность всех $\iota \in \mathrm{I}$ частных моделей анализа (ограничений типов равенств и неравенств).В прямой задаче для всех $\iota \in \mathrm{I}$ необходимо выяснить, какое значение принимает характеристика ι-го требования к кораблю $g_\iota \in \overline{G}$, $\forall \iota \in \mathrm{I}$ в том случае, когда вектор главных элементов проектируемого судна равен $\overline{X}$.

Искомый в задаче проектирования допустимый (удовлетворяющий всем ограничениям) вектор главных элементов $\overline{X}_д$ найдется в следующей форме:

$$\overline{X} : \overline{G}_1(\overline{X}) = [\overline{G}_1],\ \overline{G}_2(\overline{X}) \geq [\overline{G}_2]; \qquad (1)$$
$$\overline{X} \subset E_N;\ \overline{X}_{\min} \leq \overline{X} \leq \overline{X}_{\max},$$

где E_N — N-мерное нормированное положительное евклидово полупространство; $\overline{X}_{\min}, \overline{X}_{\max}$ — минимальное и максимальное значения вектора $\overline{X}$.

Это соотношение представляет собой ***обратную задачу*** и носит название ***модели синтеза***. Его будем далее называть ***основным исходным уравнением*** теории проектирования судов (в алгебраической форме). В обратной задаче необходимо выяснить, каким должно быть значение вектора $\overline{X}$, чтобы численный показатель соответствующего требования к кораблю g_ι был равен соответствующему нормативу $[g_\iota]$ при $g_\iota \in \overline{G}_1$, $[g_\iota] \in [\overline{G}_1]$, $\iota \in I$ или был не меньше соответствующего норматива $[g_\iota]$ при $g_\iota \in \overline{G}_2$, $[g_\iota] \in [\overline{G}_2]$, $\iota \in J$.

Поскольку найденный из решения обратной задачи вектор главных элементов проектируемого судна $\overline{X}_д \subset \overline{X}$ удовлетворяет нормативам $[\overline{G}] = [\overline{G}_1] \cup [\overline{G}_2]$, но не является наилучшим (оптимальным) по тому или иному критерию (критериям), такая модель синтеза оказывается ненаправленной [11].

Далее необходимо установить условия существования вектора $\overline{X}_д \subset \overline{X}$, а также наметить пути и способы его определения. Иными словами, речь здесь идет о совместности ограничений. Решать эту задачу, в принципе, можно, переведя все ограничения в равенства или в неравенства.

Рассмотрим сначала ***случай перевода всех ограничений в равенства***. Сделать это можно, преобразовав вектор $[\overline{G}_2]$ к вектору той же размерности $[\overline{G}_{2*}]$,

$$\{[\overline{G}_{2*}]\} = [g_{j*}],$$

$$[g_{j*}] = [g_j] + з_j,\ j = 1, 2, ..., J,\ з_j = \{\overline{З}\},$$

где $\overline{З}$ — вектор проектных запасов. Иногда проектные запасы могут вводиться и к ограничениям типа равенств. Тогда искомый вектор $\overline{X}_д$ найдется как

$$\overline{X}_д \subset \overline{X} : \overline{G}(\overline{X}) = [\overline{G}_*],\ [\overline{G}_*] = [\overline{G}_1] \cup [\overline{G}_{2*}] \quad (2)$$

Таким образом, вектор $\overline{X}_д \subset \overline{X}$ должен определяться из системы нелинейных $\mathrm{I} = I + J$ алгебраических уравнений с N неизвестными — формула (2) представляет собой запись этой системы в векторной форме и аналитически формирует модель ненаправленного синтеза. Поэтому совокупность тех алгоритмических методов теории проектирования судов и кораблей, которые посвящены определению главных элементов проектируемого судна на основе системы типа (2) — при всех возможных ее видоизменениях и упрощениях, о которых скажем далее, носит название *алгебраических методов* теории проектирования. Определение главных элементов проектируемого судна из системы типа (2) рассматривалось в работах [4, 8].

Рассмотрим теперь основные частные случаи, относящиеся к указанной системе. Пусть $N = I$. Тогда система может иметь единственное решение — множество $\overline{X}_д \subset \overline{X}$, при этом $\overline{X}_д \neq \varnothing$ при условии сжатости соответствующего отображения [3].

Пусть теперь $N > I$ — тогда система не имеет решения (несовместна). В этом случае из системы ограничений следует выделить ограничения, безусловно обязательные для выполнения, ограничения, которые могут быть выполнены с тем или иным смягчением соответствующего норматива, и, наконец, ограничения, выполнение которых желательно, но не обязательно. Таким образом, можно снизить величину I до величины, отвечающей совместности соответствующей системы, и добиться, чтобы было $\overline{X}_д \neq \varnothing$ [2].

В случае $N >$ I может существовать непустое допустимое множество главных элементов проектируемого судна

$$\overline{X}_д \subset \overline{X}, \overline{X}_д : \overline{G}(\overline{X}) = [\overline{G}_*],$$

такое, что входящие в это множество главные элементы удовлетворяют всем ограничениям.

Но можно свести исходную совокупность ограничений и к системе нестрогих неравенств. В этом случае условия совместности исходной совокупности ограничений определяются соотношениями следующего вида:

$$\begin{gathered}\exists\overline{X} = \overline{X}_д : \{\overline{G}(\overline{X}) \geq [\overline{G}(\overline{X})]\}; \qquad (3)\\ \overline{G}(\overline{X}) = \overline{G}_1(\overline{X}) \cup \overline{G}_2(\overline{X});\\ [\overline{G}(X)] = [\overline{G}_1(X)] \cup [\overline{G}_2(\overline{X})];\\ \{\overline{G}(\overline{X})\} = g_\iota(\overline{X});\\ \{[\overline{G}(\overline{X})]\} = [g_\iota(\overline{X})];\ \forall\iota \in \mathrm{I} = I + J,\end{gathered}$$

где символ $\exists x$ читается как «существует x, при котором…».

Если система ограничений несовместна, то

$$\neg\exists\overline{X} : \{\overline{G}(\overline{X}) \geq [\overline{G}(\overline{X})]\},\ \ \overline{X}_д = \varnothing.$$

Однако в последнем случае, если $N \geq$ I, как правило, постулируется существование вектора) $\overline{\Delta}_{\overline{X}} = \overline{\Delta}_{\overline{X}}(\overline{X})$ размерностью I, такого, что

$$\exists\overline{X} = \overline{X}_д : \{\overline{G}(\overline{X}) \geq [\overline{G}(\overline{X})] + \overline{\Delta}_{\overline{X}}(\overline{X})\}.$$

В этом случае имеем разновидность ***несобственной (не имеющей решения) задачи***. На практике это достаточно обычная ситуация. Несовместность ограничений может быть связана с неточностью исходных данных, с чрезмерным упрощением действительных закономерностей, а также с абсолютизацией некоторых требований (чрезмерно жесткими нормативами). Важно отметить, что несовместность ограничений может быть адекватным отражением действительных противоречий, а те или иные способы ее корректировання — отражением действительных процедур разрешения реальных противоречий.

Разумеется, в этом случае можно, из тех или иных эвристических соображений, снять или ослабить часть ограничений, откорректировать исходные данные и добиться того, что область допустимых решений перестанет быть пустой [2, 18].

Но существуют и объективные (формальные, не эвристические) процедуры для «развязки» (коррекции) такой модели и для преобразования исходно неразрешимой задачи в разрешимую. В теории оптимизации рассматривается общая схема таких формальных процедур, а также устанавливаются условия совместности или несовместности исходной системы ограничений, принятых в форме нестрогих неравенств [6, 10].

Переход от соотношения (1) к соотношению (2) позволяет как установить условия существования допустимого вектора главных элементов $\overline{X}_д \subset \overline{X}$, так и – в случае его существования – найти этот вектор. Если же решения системы (2) не существует, то для получения допустимого решения в рамках перехода от (1) к (2) остается только эвристическая корректировка нормативов. Переход от (1) к (3) позволяет установить только существование решения, а для нахождения этого решения необходимо и в этом случае использовать соотношение (2). Но если пр переходе от (1) к (3) при последующем анализе установлено отсутствие решения, то наряду с эвристической корректировкой нормативов можем использовать также и формальные процедуры корректировки, которые описаны в работах [6, 10], и только затем искать допустимый вектор из соотношения (2). Возможность применения формальных процедур корректировки в ряде случаев оказывается существенной.

Так или иначе, если непустое допустимое множество главных элементов проектируемого судна $\overline{X}_{\text{д}}$ существует, то это обстоятельство позволяет продолжить выбор наилучших для нас главных элементов проектируемого судна. Из числа ограничений можно выбрать одно, которое считается наиболее важным, и произвести окончательный выбор главных элементов из условия, чтобы при удовлетворении всем ограничениям одно выбранное ограничение удовлетворялось бы в наибольшей степени. Этому условию будет отвечать оптимальный вектор главных элементов $\overline{X}_0 \subset \overline{X}_{\text{д}}$. Такое ограничение и представляет собой критерий оптимизации (целевую функцию)

$$F(\overline{X}),\ F \in \overline{G}(\overline{X}),$$

где $\overline{G}(\overline{X})$ — совокупность частных моделей анализа (вектор левых частей ограничений) в исходной модели ненаправленного синтеза (1)–(2).

Такой подход может быть строго обоснован в рамках современной теории полезности с введением понятия функции полезности [18]. Если производится выбор оптимального (наилучшего по какому-либо критерию) вектора $\overline{X}_0 \subset \overline{X}_{\text{д}} \subset \overline{X}$, то такая модель синтеза будет представлять собой модель направленного синтеза [11]. Тогда приходим к общеизвестной постановке однокритериальной задачи оптимального проектирования, когда определяется оптимальный вектор главных элементов проектируемого судна $\overline{X}_0$. Предполагая, что критерий $F(\overline{X})$ минимизируется, находим [9, 11, 18]:

$$\overline{X}_0 \subset \overline{X}_{\text{д}} \subset \overline{X}:$$

$$F(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B}) \le F(\overline{X}, \overline{A}, \overline{B}); \qquad (4)$$

$$\overline{G}_1'(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B}) = [\overline{G}_1'(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B})]; \qquad (5)$$

$$\overline{G}_2'(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B}) \le [\overline{G}_2'(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B})]; \qquad (6)$$

$$\overline{X}_{\min} \le \overline{X}_0 \le \overline{X}_{\max};\ \overline{X},\ \overline{X}_0 \subset E_N;$$

$$\{\overline{X}\} = x_n,\ \forall n = 1, N.$$

Задача (4)–(6) (а это однокритериальная модель направленного синтеза) решалась применительно к судам и кораблям различных классов во многих диссертационных работах по проектированию судов. Величины, входящие в исходное соотношение – модель ненаправленного синтеза – (1) и в однокритериальную оптимизационную задачу (4)–(6), связаны между собой как

$$\overline{G}_1(\overline{X}) \cup \overline{G}_2(\overline{X}) = F(\overline{X}) \cup \overline{G}_1'(\overline{X}) \cup \overline{G}_2'(\overline{X}); \quad (7а)$$

$$[\overline{G}_1(\overline{X})] \cup [\overline{G}_2(\overline{X})] = F(\overline{X}) \cup [\overline{G}_1'(\overline{X})] \cup [\overline{G}_2'(\overline{X})]. \quad (7б)$$

Операция выбора из всех ограничений самого важного является принципиально эвристической (неформальной), и одному и тому же исходному уравнению (1) при условии $N >$ I могут отвечать I однокритериальных оптимизационных задач типа (4)–(6). Совокупность таких задач носит название взаимных оптимизационных задач [7].

К числу наиболее важных и подлежащих удовлетворению в наибольшей степени может быть отнесено и более одного ограничения ($I_F > 1$ ограничений). Тогда получаем многокритериальную задачу, количество критериев в которой $I_F > 1$. Постановка многокритериальной задачи имеет такой вид:

$$\overline{X}_0 \subset \overline{X}_{\text{д}} \subset \overline{X}:$$

$$\Im[\overline{F}(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B})] \le \Im[\overline{F}(\overline{X}, \overline{A}, \overline{B})]; \qquad (8)$$

$$\{\overline{F}\} = f_i,\ \forall i \in I_F; \qquad (9)$$

$$\overline{G}_1''(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B}) = [\overline{G}_1''(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B})]; \qquad (10)$$

$$\overline{G}_2''(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B}) \le [\overline{G}_2''(\overline{X}_0, \overline{A}, \overline{B})]; \qquad (11)$$

$$\overline{X}_{\min} \le \overline{X}_0 \le \overline{X}_{\max};\ \overline{X},\ \overline{X}_0 \subset E_N;$$

$$\{\overline{X}\} = x_n,\ \forall n = 1, N,$$

где $\overline{F}$ — вектор частных критериев f_i, размерность этого вектора равна I_F, а $\Im(\overline{F})$ — оператор скаляризации вектора $\overline{F}$.

Этот класс задач подробно исследовался И.Г. Захаровым [11], а соотношения (7а)–(7б) можно дополнить следующим образом:

$$\overline{G}_1(\overline{X}) \cup \overline{G}_2(\overline{X}) = F(\overline{X}) \cup \overline{G}_1'(\overline{X}) \cup \overline{G}_2'(\overline{X}) = \overline{F}(X) \cup \overline{G}_1''.(X) \cup \overline{G}_2''(\overline{X});$$

$$[\overline{G}_1(\overline{X})] \cup [\overline{G}_2(\overline{X})] = F(\overline{X}) \cup [\overline{G}_1'(\overline{X})] \cup [\overline{G}_2'(\overline{X})] = \overline{F}(X) \cup [\overline{G}_1''.(X)] \cup [\overline{G}_2''(\overline{X})].$$

При этом каждое исходное уравнение (1) при фиксированном значении количества критериев I_F может, очевидно, породить

$$K_1 = K_1(I_F) = C_{\mathrm{I}}^{I_F} = \frac{I!}{I_F!(I - I_F)!}$$

многокритериальных (взаимных) оптимизационных задач типа (8)–(11) (многокритериальных моделей направленного синтеза).

В общем же случае $I_F = 2, 3, \ldots, I$. В последнем случае ограничения отсутствуют. Тогда максимально возможное количество многокритериальных оптимизационных задач, порождаемых системой ограничений размерностью I, – величина $K_2 = K_2(\mathrm{I})$ – определится в форме

$$K_2 = K_2(I) = \sum_{\iota=2}^{I} C_{\mathrm{I}}^{\iota} = \sum_{\iota=2}^{I} \frac{I!}{\iota!(I-\iota)!}.$$

Рассмотрим далее ***соотношение исходных алгебраических уравнений теории проектирования судов (1) с классической теорией проектирования.*** Поиск оптимума упрощается, если имеем хорошее начальное приближение. А чтобы его получить, упростим исходную модель ненаправленного синтеза (1), которая приведена к системе нелинейных алгебраических уравнений (2), к виду

$$\forall n \in N, x_n : g_n(x_n) = [g_n];$$

$$\forall m \in N,\ m \neq n : g_n \neq g_n(x_m).$$

Таким образом, ***все алгебраические уравнения, формирующие исходную систему, в начальном приближении разделяются***. Тогда находим компоненты вектора $x_n, x_n = \{\overline{X}\}$ из очевидных и несложно реализуемых соотношений

$$\forall n \in N : x_n = \overline{g}_n^{(-1)}(1);\ \ \overline{g}_n(\overline{X}) = \frac{g_n(x_n)}{[g_n]},$$

где верхний индекс (–1) означает переход к обратной функции.

Таким образом, как классическая теория проектирования в своей алгебраической части, так и теория оптимального проектирования в этой же своей части получают теперь общую основу в виде соотношения (1). Это отвечает общим закономерностям в части соотношения нового и доброкачественного старого научного знания.

Приняв $\overline{X} = \overline{X}_1$, $N = N_1 = 1$, $x_1 = D$, где D — водоизмещение, и полагая, что условие $g_1(x_1) = 0$ есть уравнение плавучести, получим хорошо известное в теории проектирование уравнение масс (весов) в алгебраической форме. А если $\overline{X} = \overline{X}_1$, $N = N_1 = 1$ и $x_1 = W$, где W есть полный подпалубный объем, и, приняв, что условие $g_1(x_1) = 0$ есть уравнение баланса вместимости, получим также известное в теории проектирования уравнение объемов в алгебраической форме. Пусть теперь $\overline{X} = \overline{X}_2$, $N = N_2 = 1$, $x_1 = B/T$, где B, T — ширина и осадка проектируемого судна, $g_1(x_1)$ есть соотношение для определения начальной поперечной метацентрической высоты, а $[h]$ — нормативное значение минимально допустимой начальной поперечной метацентрической высоты. Тогда приходим к известному уравнению начальной остойчивости вида $g_1(x_1) - [h] \geq 0$.

При практическом проектировании, по крайней мере, часть исходных данных определяется на основе судов-прототипов, которые могут оказаться весьма близкими к проектируемому судну. А это открывает возможность перехода от алгебраических методов для отыскания вектора $\overline{X}$ к более простым (хотя и требующим наличия надежного прототипа) дифференциальным методам.

Так, пусть $\overline{X}^{(0)}$, $\{\overline{X}^{(0)}\} = x_n^{(0)}$, $n = 1, 2, \ldots, N$, есть известный вектор главных элементов судна-прототипа, $\overline{G}^{(0)}, \{\overline{G}^{(0)}\} = g_i^{(0)}$, $i = 1, 2, \ldots, I + J = \mathrm{I}$ есть также известные численные значения вектора левых частей ограничений (результаты подробных расчетов по соответствующим частным моделям анализа либо данные экспериментов) для судна-прототипа.

Предположим здесь для простоты, что все ограничения у нас типа равенств, мы имеем I таких ограничений и всюду ограничиваемся только первым членом разложения в соответствующий степенной ряд. Тогда можно записать альтернативное, по отношению к исходному уравнению (1) в алгебраической форме, новое исходное уравнение теории проектирования судов в дифференциальной (и векторной) форме. Такое уравнение приобретает вид системы линейных алгебраических уравнений относительно размерного вектора приращений главных элементов проектируемого судна по сравнению с прототипом $\Delta_\Sigma \overline{X}$:

$$\overline{G}^{(0)} + \Delta\overline{G}(\Delta_\Sigma \overline{X}) = [\overline{G}]; \tag{12}$$

$$\{\Delta\overline{G}(\Delta_\Sigma \overline{X})\} = \Delta g_\iota(\Delta_\Sigma \overline{X}),\ \forall \iota \in \mathrm{I};$$

$$\Delta g_\iota(\Delta_\Sigma \overline{X}) = \left\langle \overline{\Theta}, \Delta_\Sigma \overline{X} \right\rangle;\ \{\overline{\Theta}\} = \theta_n,\ \forall n \in N;\ x_n = x_n^{(0)} :\ \theta_n = \frac{\partial g_\iota(x_n)}{\partial x_n};\ \forall x_n \in \overline{X};$$

$$\overline{X} = \overline{X}_1 \wedge \overline{X}_2;\ \{\overline{X}\} = x_n;\ \{\Delta\overline{X}) = \Delta x_n;\ \{\Delta_\Sigma \overline{X}\} = \Delta_\Sigma x_n;\ \{\delta\overline{X}\} = \delta x_n;\ \forall n \in N;\ \forall \iota \in \mathrm{I};$$

$$\overline{X} = \overline{X}_1,\ \{\overline{X}_1\} = x_{n_1} :\ \Delta_\Sigma x_{n_1} = \Delta x_{n_1} + \delta x_{n_1} = \eta_{n_1} \cdot \Delta x_{n_1};\ \forall n_1 \in N_1;$$

$$\overline{X} = \overline{X}_2, \{\overline{X}_2\} = x_{n_1} :\ \Delta_\Sigma x_{n_2} = \Delta x_{n_2};\ \delta x_{n_2} = 0;\ \eta_{n_2} = 1;\ \forall n_2 \in N_2,$$

где $\Delta\overline{X}$ — заданные изменения по вектору характеристик для проектируемого корабля (по сравнению с аналогичным вектором $\overline{X}$ для корабля-прототипа); $\delta\overline{X}$ — вынужденные (связанные с изменениями вида $\Delta\overline{X}$) изменения по вектору $\overline{X}$ для проектируемого корабля по сравнению с аналогичным вектором) $\overline{X}^{(0)}$ для корабля-прототипа; $\Delta_\Sigma \overline{X}$ — искомый в данной задаче вектор суммарных (заданных и вынужденных) приращений характеристик проектируемого корабля по сравнению с прототипом;) $\Delta\overline{G}(\Delta_\Sigma \overline{X})$ — вектор приращений ограничений по сравнению с прототипом, зависящий от аналогичного вектора приращений главных элементов $\Delta_\Sigma \overline{X}$; $\eta_n = 1 + \dfrac{\delta x_n}{\Delta x_n}$ — частный коэффициент приращения по компоненте x_n вектора $\overline{X}$; $\left\langle \overline{A}, \overline{B} \right\rangle$ — скалярное произведение векторов $\overline{A}$ и $\overline{B}$; N — размерность векторов $\overline{X}^{(0)}$, $\overline{X}$, $\Delta\overline{X}$ и $\delta\overline{X}$.

Векторы $\overline{X}_1$ и $\overline{X}_2$ имеют указанный выше смысл. При этом компоненты вектора $\Delta\overline{X}$ могут быть заданы как непосредственно, так и через изменение задания на проектирование у проекта по сравнению с прототипом (изменение скорости, дальности плавания и т. д.).

Система (12) в векторной форме относительно приведенных к безразмерному виду оптимизируемых параметров $\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{X}} = \dfrac{\Delta_\Sigma \overline{X}}{\overline{X}^{(0)}}$ приобретает вид

$$\overline{U}(\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{X}}) = \overline{V}; \tag{13}$$

$$\overline{U}(\Delta_\Sigma \overline{X}) = \frac{\Delta\overline{G}(\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{X}})}{\overline{G}^{(0)}};\ \overline{V} = \frac{[\overline{G}]}{\overline{G}^{(0)}} - 1;$$

$$\tilde{\tilde{X}} = \frac{\overline{X}}{\overline{X}^{(0)}};\ \overline{G}(\overline{X}^{(0)}) = \overline{G}^{(0)}.$$

Искомый допустимый вектор главных элементов проектируемого судна $\overline{X}_д \subset \overline{X}$ в обратной задаче ненаправленного синтеза в дифференциальной (и векторной) форме определится из решения систем (12) или (13) в следующем виде:

$$\overline{X}_д = \overline{X}^{(0)} + \Delta_\Sigma \overline{X}_д, \tag{14}$$

где отвечающий допустимому решению размерный вектор приращений главных элементов $\Delta\overline{X}_д \subset \Delta\overline{X}$ и аналогичный безразмерный вектор $\Delta\tilde{\tilde{X}}_д \subset \Delta\tilde{\tilde{X}}$ определяются из систем (12) и (13) соответственно, а сумма двух векторов одной размерности означает покомпонентное их сложение.

В результате анализа системы (12) или (13) на основе известных из линейной алгебры теорем Крамера и Кронекера – Капелли [12] может быть получен один из таких трех результатов:

система (13) несовместна;

система (13) имеет единственное решение;

система (13) имеет некоторую конечную область допустимых решений $\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{X}}_д \subset \Delta_\Sigma \tilde{\tilde{X}}$.

В последнем случае – как и для исходного уравнения в алгебраической форме– можно выделить из области $\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{X}}_д$ оптимальное решение $\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{\overline{X}}}_д \subset \Delta_\Sigma \tilde{\tilde{\overline{X}}}$. Для этого дополним систему (13) оптимизационным условием.

Пусть $F(\overline{X})$ — критерий оптимизации, такой, что для некоторого $\iota = \iota_0 \in I$ имеем $F(\overline{X}) = g_{\iota_0}(\overline{X}) \in \overline{G}$. Тогда в данной задаче будет минимизироваться приращение ΔF критерия оптимизации F при переходе от прототипа к проекту. Приведем критерий F к безразмерному виду, пронормировав его по начальному приближению. Тогда по аналогии с постановкой однокритериальной оптимизационной задачи в алгебраической форме (4)–(6) можно записать:

$$\Delta F(\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{\overline{X}}}_0) \le \Delta F(\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{\overline{X}}}); \qquad (15)$$

$$\overline{U}'(\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{\overline{X}}}) = \overline{V}';$$

$$\Delta F(\Delta \tilde{\tilde{\overline{X}}}) = \sum_{m=1}^{M} a_n \cdot \Delta \tilde{x}_n; \; a_n = \frac{1}{F(\overline{X}^{(0)})} \frac{\partial F(\tilde{\tilde{\overline{X}}})}{\partial \tilde{x}_n}; \; \tilde{x}_n = \{\tilde{\tilde{\overline{X}}}\};$$

$$\overline{U}' = \frac{\Delta \overline{G}'(\Delta_\Sigma \tilde{\tilde{\overline{X}}})}{\overline{G}^{(0)'}}; \; \overline{V}' = \frac{[\overline{G}']}{\overline{G}^{(0)'}} - 1;$$

$$\{\Delta \overline{G}'\} = \Delta g_1, \; \Delta g_2, ..., \Delta g_{\iota_0 - 1}, \; \Delta g_{\iota_0 + 1}, ..., \Delta g_I.$$

Компоненты вектора $\Delta \overline{G}'$ вычисляются по формуле (12). Векторы $\overline{G}^{(0)'}$ и $[G']$ связаны с векторами $\overline{G}^{(0)}$ и $[\overline{G}]$ так же, как вектор $\Delta \overline{G}'$ связан с вектором $\Delta \overline{G}$.

Частные производные вида $\frac{\partial F(\tilde{\tilde{\overline{X}}})}{\partial \tilde{x}_m}$ вычисляются в точке $\overline{X} = \overline{X}^{(0)}$, т. е. при $\tilde{x}_n = 1$ при всех $n \in N$. Соотношение (15) формирует задачу оптимизации главных элементов проектируемого судна в приращениях и представляет собой задачу линейного программирования в канонической форме. Одним из немногочисленных примеров практической реализации соотношения (14) на основе симплекс-метода является диссертационное исследование Ю.Д. Павлова [14].

Далее по аналогии с алгебраическими методами следует рассмотреть ***соотношение исходных дифференциальных уравнений теории проектирования судов (12) с классической теорией проектирования***. Можно показать, что и в этом случае исходное дифференциальное соотношение (12) является основой как для решаемой в приращениях задачи оптимизации (15), так и для некоторых хорошо известных из классической теории проектирования судов уравнений в дифференциальной форме. Это уравнение весов (масс) в дифференциальной форме в функции водоизмещения (уравнение Нормана) и аналогичное уравнение в функции главных размерений (уравнение И.Г. Бубнова).

ВЫВОДЫ

Предложенные в работе исходное алгебраическое соотношение теории проектирования судов (1) и аналогичное исходное дифференциальное соотношение (12) являются основой как для известных задач классической теории проектирования судов, так и для современной теории оптимального проектирования. Это обстоятельство позволяет достаточно органично связать между собой классическую теорию проектирования и теорию оптимального проектирования судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] *Ашик В.В.* Проектирование судов. — 2-е изд. — Л.: Судостроение, 1985. — 318 с.

[2] *Балкашин А.И.* Проектирование кораблей. — М.: Воениздат, 1954. — 390 с.

[3] *Бахвалов Н.С.* Численные методы. — М.: Наука, 1975. — 632 с.

[4] *Бубнов И.Г.* Об одном методе определения главных размеров проектируемого судна // Ежегодник Союза морских инженеров. — Пг., 1916. — Т. 1. — С. 213–256.

[5] *Вашедченко А.Н.* Автоматизированное проектирование судов: Монография. — Л.: Судостроение, 1985. — 210 с.

[6] *Віресков А.Н., Третьяков Н.В.* Об использовании модифицированных функций Лагранжа для корректировки несовместных задач выпуклого программирования // Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика. — М.: Наука, 1988. — № 1. — С. 3–12.

[7] *Влэдуц С.Г., Левнер Е.В.* Соотношения взаимности в многокритериальных задачах математического программирования // Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика. — М.: Наука, 1988. — № 6. — С. 210–214.

[8] *Гайкович А.И.* Проблема поиска допустимого решения в задаче оптимизации элементов судна // Труды ЛКИ. — Л.: ЛКИ, 1975. — Вып. 98. — С. 34–38.

[9] *Гайкович А.И.* Основы теории проектирования сложных технических систем: Монография. — СПб.: Моринтех, 2001. — 340 с.

[10] *Еремин И.И.* Двойственность для несобственных задач линейного и выпуклого программирования и методы их коррекции // Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика. — М.: Наука, 1981. — № 1. — С. 20–32.

[11] *Захаров И.Г., Постонен С.И., Романьков В.И.* Теория проектирования надводных кораблей. — СПб.: Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова, 1997. — 640 с.

[12] *Карпелевич Ф.И., Садовский Л.Е.* Элементы линейной алгебры и линейного программирования. — М.: Физматгиз, 1963. — 276 с.

[13] *Ногид Л.М.* Теория проектирования судов. — Л.: Судпромгиз, 1955. — 480 с.

[14] *Павлов Ю.Д.* Применение метода профессора И.Г. Бубнова для решения задачи проектирования одновинтовых транспортных судов на современном этапе: Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.08.03. — Николаев: НКИ, 1974. — 28 с.

[15] *Поздюнин В.Л.* Теория проектирования судов. Часть 1: Общие вопросы проектирования: Монография: — М.; Л.: ОНТИ НКТП, 1935. — 80 с.

[16] *Раков А.И., Севастьянов Н.Б.* Проектирование промысловых судов. — Л.: Судостроение, 1981. — 376 с.

[17] *Соломенцев О.И., Дам Суан Туан.* Имитационное моделирование как эффективный способ решения проблем исследовательского проектирования кораблей // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2005. — № 2 (395). — С. 3–12.

[18] *Худяков Л.Ю.* Исследовательское проектирование кораблей: Монография. — Л.: Судостроение, 1980. — 240 с.