

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА СУДНА

В. В. Медведев, Р. О. Голубев (Санкт-Петербург)

1. Имитационное моделирование как инструмент повышения эффективности принимаемых решений на ранних стадиях проектирования

Пропульсивный комплекс (ПК), включающий в свой состав корпус судна, движители, главные двигатели (ГД) и систему преобразования и передачи механической энергии, является наиболее важным и энергоёмким на любом судне.

Выше перечисленные элементы, входящие в состав ПК, практически однозначно определяют облик будущего проекта, в частности:

1. принятые обводы корпуса однозначно определяют скорость хода, эксплуатация судна с которой будет экономически целесообразной;
2. форма кормовой оконечности корпуса во многом определяются типом и количеством применяемых движителей;
3. применяемый тип ГД определяет, в первую очередь, экономичность проекта по топливу и его автономность, а также накладывает ограничения на высоту борта судна, пространство, занимаемое газоходами, численность экипажа и прочие аспекты, формирующие специфические черты СЭУ с каждым конкретным типом ГД;
4. используемый тип главной передачи во многом определяет расположение машинного отделения (МО) по длине судна, влияя на грузоподъемность проекта;
5. от принятой системы преобразования энергии, вырабатываемой ГД, в значительной степени зависит облик системы регулирования ПК.

Приведённый краткий обзор иллюстрирует сложную структуру взаимосвязей между элементами ПК и их неоднозначное и при том всестороннее влияние на очертания проекта судна. Несмотря на всю сложность рассматриваемого объекта, уже на самых ранних стадиях создания проекта (разработка концепта, формирование технического задания, эскизное проектирование) проектант должен принимать однозначные обоснованные решения по структуре и характеристикам будущего энергетического (и в т.ч. пропульсивного) комплекса. Этим фактом объясняется узкая специализация проектных организаций – на отдельных типах, а порой и на отдельных классах судов, что позволяет переводить количественно накопленный опыт в качество новейших проектов. Однако, недостаточность модельного сопровождения проводимых расчётов всегда остаётся ощутимой, а действительные характеристики судна удаётся установить лишь после проведения натурных испытаний (например, на мерной миле).

Сопровождение расчётов, проводимых на ранних стадиях проектирования, имитационным моделированием (ИМ) должно снизить риски при принятии тех или иных проектных решений и повысить обоснованность последних [1]. Высокая энергоёмкость ПК обеспечивает наглядный эффект от применения ИМ. В первую очередь, предполагаемой эффективностью ПК определяется потребная мощность ГД по формуле (с последующим выбором конкретных типоразмеров) [2]:

$$N_e = \frac{N_R}{\eta_{\Pi} \cdot \eta_{ВП} \cdot \eta_D}, \quad (1)$$

где N_R – буксировочная мощность; η_{Π} – КПД главной передачи (эффективность преобразования вырабатываемой ГД механической энергии); $\eta_{ВП}$ – КПД валопровода; η_D – пропульсивный коэффициент. Дополнительно, N_e влияет на потребную мощность электростанции, паропроизводительность котельной установки, размеры МО и т.д.

Сами риски, возникающие при проектировании, объяснимы обработкой эмпирических численных диапазонов и графических данных, создающих, при расчёте тех или иных элементов энергетического комплекса перманентный эффект накопления

погрешности. Например, ниже приведена формула расчёта пропульсивного коэффициента (η_D):

$$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R, \quad (2)$$

η_H – коэффициент влияния корпуса; η_0 – КПД гребного винта в свободной воде; η_R – коэффициент влияния закручивания потока перед винтом.

Допустим, необходимо определить η_D для проекта с винтом, расположенным в диаметральной плоскости (либо имеющего скеговую форму кормы). В этом случае, в соответствии с [3], значение η_H может быть принято из диапазона 1,1÷1,4. Допустим, что по результатам модельных испытаний в опытовом бассейне этот диапазон удалось сократить до 1,2÷1,3. Значение η_0 примем равным 0,65, в этом случае, если КПД винта определялся по диаграмме винта с ценой деления для шкалы η_0 в одну сотую, то прогнозируемое значение η_0 может находиться в диапазоне 0,647÷0,653. Значение η_R для рассматриваемого случая в [3] предлагается принимать из диапазона 1÷1,07. Тогда пропульсивный коэффициент будет находиться в диапазоне 0,776÷0,908. Таким образом, даже при ограниченном числе факторов, влияющих на эффективность ПК, определение последней происходит с погрешностью порядка 15%. Реальный диапазон будет даже шире, т.к. необходимо учитывать изменения в потоке перед винтом при волнении моря, обрастание корпуса судна и винта и прочие факторы. Степень влияния которых может быть проанализирована, в т.ч. и с помощью ИМ. Таким образом, если коэффициенты η_H и $\eta_{ВП}$, приведённые в формуле (1), однозначно определяются конструкцией ПК и производителями соответствующих элементов комплекса, то η_D изменяется в широком диапазоне. Далее в проекции на η_D будут рассмотрены возможности применения ИМ.

2. Аппаратные средства имитационного моделирования работы ПК

Возможность применения ИМ в обозначенной сфере будет рассмотрена на базе программы проектного расчёта СЭУ СПГ-танкера [4]. Описание реализованного в программе алгоритма расчёта ходкости судна приведено в [5]. В [6] приведены примеры исследования влияния характеристик ПК на вспомогательную энергетическую установку. В данной статье излагается пример использования модификации вычислительного комплекса [4], выполненного в среде программирования Borland Delphi, позволяющей определять значения пропульсивного коэффициента из допустимого диапазона и изменение пропульсивной мощности для нормального закона распределения (с учетом примера программ из [7] и методических рекомендаций [1], в которых определено место и алгоритм проведения ИМ применительно к процессу проектирования СЭУ). Далее будет дан краткий обзор интерфейса окон программы, необходимых при ИМ. Стартовое окно приведено на рис. 1.

В окне вводятся исходные данные, а именно: полная грузоподъемность; доля парового пространства танков; интенсивность испарения груза (суточная доля выпара); плечо рейса; скорость хода; водоизмещение; дедвейт; размерения корпуса судна; потребность в паре общесудовых параметров; вальность пропульсивной установки; её запас мощности; применимость установки повторного сжижения газа (УПСГ) на проекте. Данные на рис. 1 соответствуют СПГ-танкеру класс Large conventional (Большой стандартный) [8]. Далее пользователь переходит в окно расчёта проекта с конкретным типом СЭУ – в данном случае СЭУ с малооборотными ДВС (рис. 2).

Непосредственно для расчёта характеристик СЭУ пользователем в окне вводятся дополнительно следующие данные: допустимое отклонение КПД гребных винтов от оптимального; их серия; типоразмерный ряд ГД; необходимые типоразмеры ГД из

этого ряда; ширина машинного отделения; типоразмер вспомогательных двигателей; тип утилизационных турбогенераторов (при наличии); применимость валогенераторов.

В правой верхней части окна вводятся исходные данные для проведения статистических испытаний, а именно: их число и коэффициент вариации.

Основные исходные данные:	
Полная грузоподъемность, м куб.	180000
Доля парового пространства танков, %	1,5
Суточная доля выпара груза, %	0,1
Плечо рейса, морские мили	5000
Скорость хода, уз	20
Дополнительные исходные данные:	
Водоизмещение, тонны	135000 <input checked="" type="checkbox"/> Неизвестно
Дедвейт, тонны	90000 <input checked="" type="checkbox"/> Неизвестен
Длина между перпендикулярами, м	296,2 <input checked="" type="checkbox"/> Неизвестна
Расчётная ширина на миделе, м	47,5 <input checked="" type="checkbox"/> Неизвестна
Расчётная осадка, м	12 <input checked="" type="checkbox"/> Неизвестна
Потребность в паре общесудовых параметров, кг/ч	5177 <input checked="" type="checkbox"/> Неизвестна
Условия расчёта:	
<input type="radio"/> Одновальная ПУ	<input checked="" type="radio"/> Двухвальная ПУ <input checked="" type="checkbox"/> УПСГ
25% (ИМО - МОД)	
<input type="button" value="Ввод данных"/>	
<input type="button" value="СЭУ с малооборотными ДВС"/> <input type="button" value="СЭУ со среднеоборотными ДВС (ЕЭЭС)"/>	
<input type="button" value="Расчёт энергетической эффективности проекта"/>	

Рис. 1. Стартовое окно программы

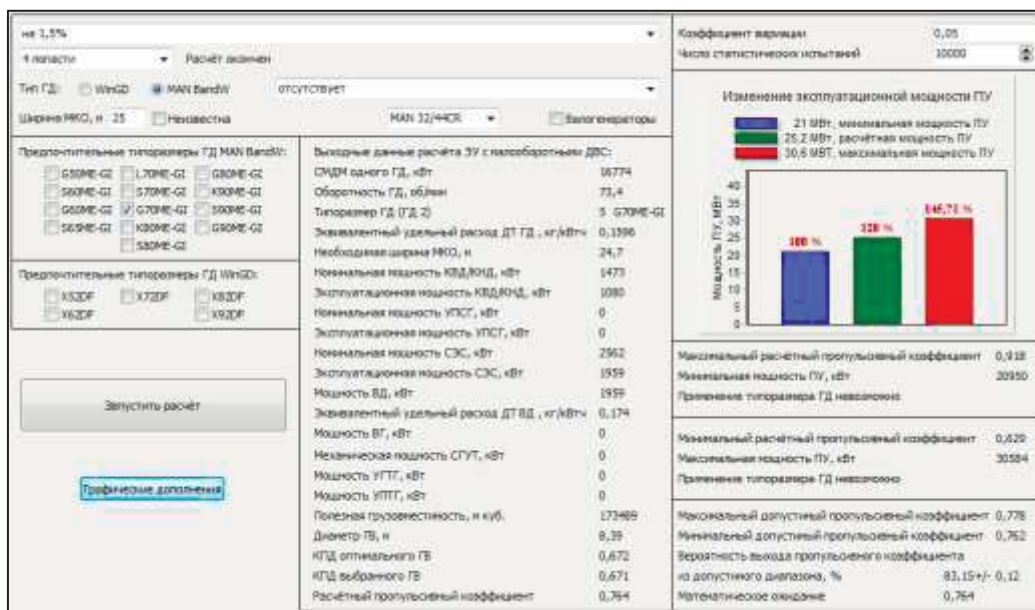


Рис. 2. Окно расчёта характеристик СЭУ с МОД

Программа обладает дополнительными возможностями по визуализации расчётных данных (графические дополнения). Помимо прочего, в окне графических дополнений выводятся: диаграмма винта с оптимальной и проектной точками и диаграмма совместной работы двигателя и движителя (рис. 3).

В результате расчёта пользователь получает некоторый объём данных о режиме работы СЭУ (средняя часть окна). Результаты статистических испытаний, выполняемых методом Монте-Карло, выводятся в правой части. В частности, пользователь получает информацию о том, какова вероятность выхода значения пропульсивного коэффициента из допустимого диапазона и как сильно будет

изменяться пропульсивная мощность при предельных отклонениях η_D от математического ожидания (величины, полученной при автоматизированном проектировании винта). Допустимый диапазон значений пропульсивного КПД определяется программой самостоятельно, в зависимости от выбранного типоразмера ГД и положения винтовых характеристик относительно его рабочего поля. КПД самих винтов в программе выводится с поправкой η_R . На рис. 3 точки на диаграмме справа, находящиеся за пределами рабочего поля ГД, соответствуют режимам работы ПК (нижняя – эксплуатационный режим с “лёгким” винтом; верхняя – номинальный режим) при максимальных отклонениях η_D .

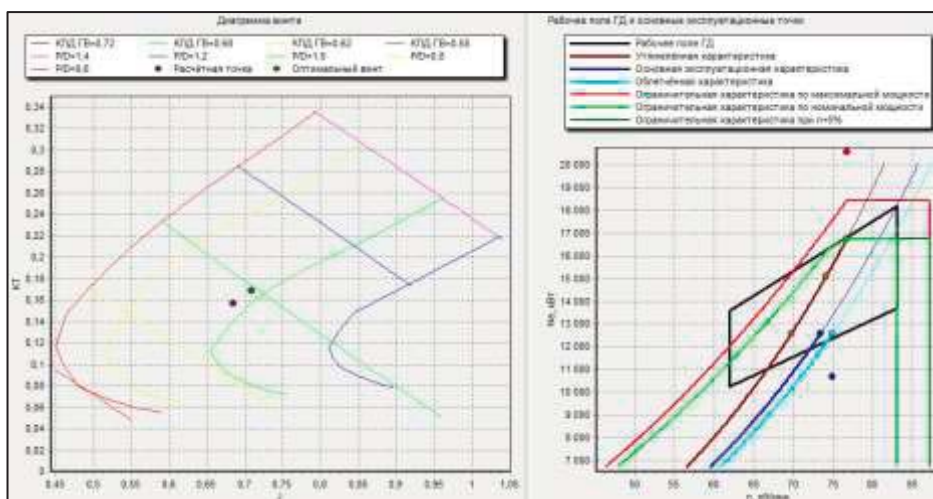


Рис. 3. Примеры графических дополнений

3. Применение имитационного моделирования при проектировании ПК

Из рис. 2 видно, что, даже при очень малом значении коэффициента вариации ($V = 0,05$), возникающие предельные отклонения мощности ПК приводят к значительным сложностям в использовании ранее выбранного типоразмера ГД (графики на рис. 3 соответствуют характеристикам на рис. 2). Предполагается, что коэффициент вариации должен вводиться в программу проектантом исходя из предполагаемой точности проведённого расчёта ходкости. Тогда ИМ позволит оценить риск выхода эксплуатационных точек за пределы рабочего поля ГД при той или иной принятой схеме комплектации ПК. Например, на рис. 4 приведены результаты ИМ эксплуатационных режимов ПК СПГ-танкеров грузоместимостью $145 \div 215$ тыс. m^3 , оснащённых главными двигателями MAN B&W G70ME-GI [9].

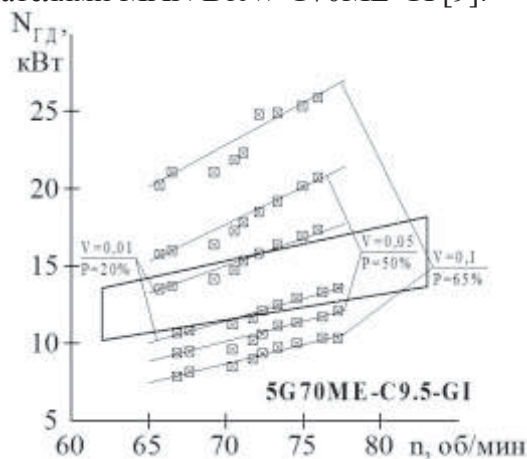


Рис. 4. Диапазоны эксплуатационной мощности ПК при разных коэффициентах вариации

Были проведены серии расчётов в выше рассмотренной программе при различных значениях коэффициента вариации. Запас мощности пропульсивной установки во всех случаях был принят равным 15%, число статистических испытаний – 10 тыс. Фиксировались варианты расчёта, в которых принимаемые коэффициенты вариации обеспечивали попадание расчётных режимов работы ПК в рабочее поле ГД и вероятность нахождения расчётного режима вне необходимой области.

Выводы

1. Очевидна необходимость повышения точности расчёта пропульсивного коэффициента на ранних стадиях проектирования судовых энергетических комплексов.

2. Применение для этой цели имитационного моделирования способно дать вероятностную оценку эффективности принятой схемы комплектации пропульсивного комплекса.

3. Оценка эффективности принятых решений в области проектирования ПК посредством проведения ряда статистических испытаний методологически проста и не требует дополнительных исходных данных о его режиме работы.

4. Эффективное применение предложенного подхода видится возможным, лишь при автоматизации всей системы расчётов. В этом случае становится возможной оперативная многовариантная проработка схем комплектации ПК.

5. Задаваемый проектантом коэффициент вариации должен объективно отражать степень точности расчётов, проведённых до начала ИМ. В рассмотренной программе возможность его варьирования была предусмотрена в демонстрационных целях. В действительности полная автоматизация расчёта снимает с проектанта ответственность за объективный выбор коэффициента.

Литература

1. **Медведев В.В.** Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013. 352 с.
2. **Артёмов Г.А., Волошин В.П., Захаров Ю.В., Шквар А.Я.** Судовые энергетические установки. Л.: Судостроение, 1987. 480 с.
3. Basic principles of ship propulsion. Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2011. 45 с.
4. **Голубев Р.О.** Программа расчёта характеристик энергетической установки СПГ-танкера / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019611761. М.: 2019.
5. **Голубев Р.О.** Система автоматизированного проектирования энергетической установки СПГ-танкера // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. 2018. №5. С. 466-470.
6. **Голубев Р.О.** Автоматизированная оптимизация комплектации генераторными агрегатами электростанции СПГ-танкера // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. 2018. №6. С. 213-217.
7. **Шеннон Р.Дж.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
8. Propulsion Trends in LNG Carriers. – Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2013. 20 с.
9. MAN B&W G70ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. – Копенгаген: MAN Diesel & Turbo, 2017. 456 с.