Ищейкин Г.Ю.

Аппроксимация кривых действия винта

*Мурманский государственный технический университет
(Россия, Мурманск)*

doi: 10.18411/sr-10-06-2018-10

idsp: 000001:sr-10-06-2018-10

Аннотация

В статье рассмотрены отдельные аспекты аналитического представления зависимостей коэффициентов упора и момента гребного винта фиксированного шага от его относительной поступи при переменных режимах движения судна, характерных для условий осуществления сложных манёвров во время выполнения ключевых судовых операций. Аналитическое представление зависимостей коэффициентов упора и момента гребного винта фиксированного шага от его относительной поступи представляет определённый интерес при программной реализации моделирования различных манёвров судна на базе его математической модели, включающей в себя модель работы движительно-рулевого комплекса. Практический смысл представленных результатов исследований определяется отсутствием адекватного аналитического описания регулирования работы движителя (гребной винт фиксированного шага) в режимах реверса.

Ключевые слова: моделирование реверса, универсальная кривая действия винта, аппроксимация, адекватность, тренажерное применение.

Как известно, в качестве переменного параметра, определяющего динамику работы гребного винта, использовалась его относительная поступь (J) как частное от деления скорости обтекающего его потока (v_A) на обороты (n) и диаметр гребного винта (D), т.е.

$$J = \frac{v_A}{nD}. \quad (1)$$

Для прогностических оценок ходкости судна в целом и его манёвренных характеристик в границах ходовых режимов движения, указанных кривых действия гребного винта было вполне достаточно для решения широкого круга практических задач, как в области проектирования судов, так и в области их эксплуатации. Аналитическое представление кривых действия гребного винта ограничивалось полиномами 2-го или 3-го порядка, в том числе, учитывающими геометрические параметры конкретных гребных винтов [5], что в полной мере соответствовало характеру задач, решаемых с их помощью.

Однако и в тот период было понимание, что некоторые характерные, значимые режимы работы гребного винта, например, реверс, приводят к неопределённости при расчёте значения относительной поступи. Учитывая это обстоятельство и используя результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных в 40-х, 50-х и 60-х годах [1], [2], [5], [15] ряд исследователей предложили различные методики определения упора и момента гребного винта при любом режиме его работы, включая, реверс. Однако уже тогда, работа исследователей была направлена на исключение неопределённостей при определении упора и момента в непрерывном режиме их изменения. Результаты указанных выше модельных экспериментов имели определённое графическое представление в виде диаграмм [1], [2],[3] которые отличались видом параметра, служащего аргументом для определения значений коэффициентов упора и момента гребного винта в различных режимах его движения. Преимущественно в качестве аргумента использовались универсальные относительные поступи, имеющие различное представление в интерпретации различных исследователей. В данном случае преследовалась одна цель – исключить неопределённость при определении значения

относительной поступи в двух случаях, т.е. когда обороты гребного винта n или скорость потока натекающего на гребной винт v_A равны нулю, что характерно, например, для режима реверса. В частности, В.Г. Бакаев и В.М. Лаврентьев [1] в качестве аргумента предложили использовать поступь

$$J' = \frac{v_A}{\sqrt{v_A^2 + (nD)^2}}; \quad (2)$$

А.М. Басин и И.Я. Миниович [2]

$$J^0 = \frac{1}{J}. \quad (3)$$

Авторы модельных экспериментов, которые были проведены в Вегенингенском опытовом бассейне [15], в качестве аргумента для определения значений коэффициентов упора и момента гребного винта предложили использовать угол поступи β

$$\beta = \arctg[v_A / (0,7\pi D)]. \quad (4)$$

Более приближенной к реальным условиям работы гребного винта на переходных режимах движения судна, включая режим реверса, является форма представления универсальной поступи, предложенная А.Д. Гофманом [3]

$$J'' = \frac{nD}{\sqrt{v_A^2 + (nD)^2}}, \quad (5)$$

В данной статье представлена, разработанная нами процедура возможных способов аппроксимации кривых, представляющих графический вид зависимостей $KT''(J'')$, $KQ''(J'')$, приведённых в справочнике [3].

Результаты аппроксимации планируется использовать для определения упора и момента гребного винта в тренажерных комплексах по управлению судном, предполагающих симуляцию различных режимов работы гребного винта при выполнении сложных манёвров судна в процессе осуществления ключевых судовых операций. Кроме того, полученные аппроксимации могут быть использованы в математическом моделировании движения судна при решении целого ряда прикладных практических задач в области судовождения.

Материалы и методы

Разработчики компьютерных тренажерных систем (симуляторов) по управлению судном сталкиваются с необходимостью адекватно описать маневрирование судна на малых ходах и смене направления движения [8]. В этом случае обычные диаграммы зависимости от поступи коэффициентов упора и момента винта работают неудовлетворительно вблизи нулевых значений поступи. Именно поэтому, чтобы описать различные режимы работы движителя, вместо привычной поступи J вводятся универсальные поступи J' [1] или J'' [2], которые позволяют сохранить конечным поле динамических характеристик движителя. В рамках специальной программы, разработанной автором настоящей статьи, соответствующие графики для коэффициентов упора и момента оцифровываются и записываются в файлы. Далее с этими файлами оперируют в рамках вычислительной среды MathCad14.

Аппроксимация коэффициента упора винта

В качестве примера работа выполнена для гребного винта с шаговым отношением $P/D = 1.2$ (P – шаг гребного винта), для остальных значений P/D все вычисления выполняются аналогично.

Рисунок 1. Диаграммы для KT и KQ в зависимости от поступи Гофмана JG . В настоящей статье принято: $KT - KT''$; $KQ - KQ''$; $JG - J''$.

Рисунок 2. Выбор порядка аппроксимации и получения коэффициентов степенного ряда для коэффициента упора винта KT'' .

На рисунке 2 представлены результаты аппроксимации при $k = 10$ в среде MathCad. Решение реализуется с помощью встроенной функции $regress(Kt, k)$, аргументами которой являются наши вектора J и Kt , а также порядок аппроксимации k . Функция $regress()$ возвращает вектор $Z1$, содержащий в себе коэффициенты представления Kt по степеням поступи J . Эти одиннадцать коэффициентов приведены как вектор $coeffs$ в правой части рисунка. Вектор выделен с помощью функции $submatrix$ из вектора $Z1$ как часть вектора с 3-ей по 13-ую строки. Порядок аппроксимации выбран путём решения описанной задачи с вариацией порядка аппроксимации k .

Для решения вопроса о достаточности порядка аппроксимации вычисляется показатель адекватности степенного представления исходным данным. Адекватность тем выше, чем ближе это отношение к единице. В нашем случае оно равно 0.999 и мы признаем эту меру достаточной. Если проследить, как меняется мера адекватности при вариации порядка аппроксимации, то получим такие значения: 0.975 при $k = 5$; 0.996 при $k = 7$; 0.998 при $k = 9$. Формально можно остановиться на величине порядка аппроксимации $k = 5$. Однако необходимо учитывать, что показатель адекватности оценивает среднее значение адекватности на всём диапазоне исходных точек, выбранных для аппроксимации. При этом простой просмотр графика аппроксимирующей функции (сплошная линия KT) и исходных данных (квадратики Kt), приведенных на рисунке 3, показывает, что их отклонения разнятся в различных точках J_k . Так, модуль локальной погрешности аппроксимации в точке 6 равен 7×10^{-3} , а в точке 19 – 1×10^{-3} , т.е. в 7 раз меньше. В то же время при порядке аппроксимации $k = 7$ в точке 7 модуль погрешности равен 11×10^{-3} , а в точке 20 он равен 19×10^{-3} . Последняя погрешность почти в три раза

больше, чем при порядке аппроксимации $k = 10$. Все это говорит о том, что лучше сохранить более высокий порядок аппроксимации с тем, чтобы даже её максимальная погрешность укладывалась в рамки допустимых значений.

Полиномиальная аппроксимация для винтов серии В [7] содержит 38 членов коэффициента упора КТ и 45 членов коэффициента момента КQ. Современный компьютер без труда справляется с таким порядком, но это представление не работает при смене направления движения. Поэтому предложенная здесь аппроксимация кривых действия гребного винта полиномом 10-го порядка, допускающим моделирование его динамики в любых режимах работы, в том числе при смене направления движения, приемлема в любых отношениях.

Рисунок 3. Исходные данные (Kt) и результат аппроксимации (KT) для порядка $k = 10$ степенного ряда.

Аппроксимация коэффициента момента винта

Как уже было сказано, аппроксимация для коэффициента момента винта выполняется аналогично приведенным выше процедурам. На рисунке 4 в виде скриншота показаны детали этого процесса. Исходные данные считаны в матрицу dataKqJ размером 61×2 , из которой далее получены два вектора значений коэффициента момента Kq и поступи J. Затем повторяются все действия, выполненные для коэффициента упора. Для порядка аппроксимации $k = 10$ коэффициенты степенного ряда приведены в таблице coeffs в правой части рисунка. Показана также мера адекватности представления, равная 0.998 и под ней приведены значения локальных погрешностей в 13-ой и 45-ой точках аппроксимации. Все эти характеристики для наших целей вполне удовлетворительны.

Рисунок 4. Выбор порядка аппроксимации и получения коэффициентов степенного ряда для коэффициента момента винта.

Полученные аппроксимационные представления коэффициентов упора и момента гребного винта, а также аналогичные им представления для других значений относительного шага гребного винта P/D , вводятся в соответствующий программный модуль. Программный модуль каждый цикл реального времени (скажем, 1 с) перевычисляет значения упора и момента гребного винта через их коэффициенты и вводит полученные значения в уравнения движения, которые актуальны в рамках выбранной математической модели судна.

Рисунок 5. Исходные данные (Kq) и результат аппроксимации (KQ) для порядка $k = 10$ степенного ряда.

Например, для представления коэффициента момента (см. рисунок 4) получен транспонированный вектор коэффициентов: $\text{coeffs}^T = (-0.022; 0.014; -0.311; 0.265; 1.649; -0.61; -3.317; 0.513; 3.133; -0.107; -1.134)$ и как следствие компьютерная формула для вычисления коэффициента момента будет выглядеть так:

$$K_Q'' = -0.022 + x(0.014 + x(-0.311 + x(0.265 + x(1.649 + x(-0.61 + x(-3.317 + x(0.513 + x(3.133 + x(-0.107 + x(-1.134)))))))))) \quad (6)$$

В этой формуле вообще отсутствует возведение в степень, а есть только операции сложения и умножения.

Степенное представление зависимостей $K_T''(J'')$, $K_Q''(J'')$, можно получить также с помощью полиномов Чебышева. Для этого необходимо сформировать произвольный набор данных для аппроксимации, т.е. ординаты графиков функций $K_T''(J'')$, $K_Q''(J'')$ должны быть получены при определённых значениях абсцисс. Как известно, значения абсцисс представляют собой корни многочленов Чебышева, которые рассчитывают в зависимости от выбранного числа контрольных точек. Интересующие нас значения относительной поступи J'' лежат в интервале $(-1.0; 1.0)$, их количество определим значением $(m + 1)$. В этом случае значения относительных поступей J'' могут быть рассчитаны с использованием зависимости:

$$J_k'' = \cos\left(\frac{2k + 1}{2k + 2} \times \pi\right), \quad k = 0, 1, \dots, m \quad (7)$$

К программе оцифровки графиков нами добавлена возможность представления на их изображении вертикальных прямых с определёнными по формуле (7) абсциссами. Таким образом, значения ординат графиков зависимостей $K_T''(J'')$, $K_Q''(J'')$ снимается в точках пересечения указанных вертикальных прямых с графиком соответствующей зависимости.

Когда значения ординат $K''T_k(J''k)$, $K''Q_k(J''k)$ получены, коэффициенты a_j разложения аппроксимирующего выражения по полиномам Чебышева в виде

$$\sum_{j=0}^n a_j \times T_j(x)$$

можно найти по формуле:

$$a_j = \frac{\sum_{k=0}^m y_k \times T_j(x_k)}{\sum_{k=0}^m T_j^2(x_k)} \quad (8)$$

Используя среду MathCad коэффициенты разложения a_j можно найти ещё проще. Для этого достаточно использовать линейную аппроксимацию произвольным набором функций в виде суммы этих функций с некоторыми множителями – коэффициентами. Это делается с помощью простой по виду функции $\text{linfit}(VX, VY, F)$. Здесь VX и VY вектора абсцисс и ординат данных, F – вектор выбранного набора функций. В нашем случае это полиномы Чебышева.

Дальнейшие процедуры показаны в виде скриншотов из среды MathCad. Так на рисунке 6 приведены два вектора: $Jc(J'')$ – вектор абсцисс в интервале $(-1.0; 1.0)$ и $Kqc(KQ'')$ – вектор ординат соответствующих значений коэффициента момента, снятых нами с оцифрованного графика (см. рисунок 1). Вектор функций $FCheb(x)$ составлен из 10-и полиномов Чебышева $Tcheb(j, x)$.

	0		0		$Tcheb(0, x)$
	0	-0.994	0	-0.051	$Tcheb(1, x)$
	1	-0.908	1	-0.035	$Tcheb(2, x)$
	2	-0.756	2	-0.043	$Tcheb(3, x)$
	3	-0.541	3	-0.051	$Tcheb(4, x)$
$Jc =$	4	-0.28	4	-0.041	$Tcheb(5, x)$
	5	$9.606 \cdot 10^{-4}$	5	-0.022	$Tcheb(6, x)$
	6	0.278	6	-0.032	$Tcheb(7, x)$
	7	0.539	7	-0.013	$Tcheb(8, x)$
	8	0.758	8	0.013	$Tcheb(9, x)$
	9	0.908	9	0.034	
	10	0.988	10	0.049	

$FCheb(x) :=$

Рисунок 6. Исходные данные и выбор функций для аппроксимации коэффициента момента.

На рисунке 7 показан вектор коэффициентов Kq , полученный с помощью функции $\text{linfit}()$, аргументами которой взяты вектора Jc и Kqc . Видно, что коэффициенты убывают с ростом порядка полиномов Чебышева. Это говорит о хорошей сходимости разложения. В следующей строке получена сама аппроксимирующая функция $KQcheb(x)$ как произведение вектора функций Чебышева $FQcheb(x)$ на вектор коэффициентов Kq . После этого на графическом поле приведены снятые значения ординат Kqc и график построенной аппроксимирующей функции $KQcheb(x)$. Видно, насколько хорошо функция представляет снятые значения коэффициента момента KQ'' . В строке ниже графика произведено сравнение обычного степенного представления, как сделано выше, и представления полиномами Чебышева (которые тоже являются степенными). Для этого найден Δs – средний квадрат отклонения друг от друга этих двух представлений в 100 точках интервала $(-1.0; 1.0)$. Он равен 3.582×10^{-6} , извлекая корень квадратный, получим среднее квадратическое отклонение, которое равно 1.878×10^{-3} .

Это означает, что эти два представления (оба по существу степенные и одного порядка) практически совпадают. Тогда, какой смысл представления по Чебышеву? Дело в том, что у него есть два преимущества перед обычным степенным. Во-первых, для него понадобилось существенно меньше исходных данных – 11 вместо 61 для степенного представления при одинаковом конечном эффекте. Более того, представление по Чебышеву позволяет оценить погрешность представления. Она не превышает по модулю значение коэффициента при первом отброшенном полиноме Чебышева. Конкретно, мы взяли для аппроксимации десять полиномов. Если же мы возьмём их равным девяти, то эта погрешность окажется равной значению

коэффициента при полиноме девятого порядка, т.е. 2.352×10^{-4} (последняя строка вектора Kq). К тому же, аппроксимация по Чебышеву минимизирует не среднюю квадратическую погрешность, как в степенном представлении, а максимальную погрешность на интервале $(-1.0; 1.0)$.

Рисунок 7. Определение коэффициентов аппроксимации и представление ее результатов.

Расчет упора и момента винта

После того, как найдены коэффициенты упора и момента, расчёт текущих значений упора гребного винта T и его момента Q не представляет трудностей. Для этого используются известные формулы [3]:

$$T = K_T'' \rho D^2 [\nu^2 + (nD)^2]; Q = K_Q'' \rho D^3 [\nu^2 + (nD)^2] \quad (9)$$

Таблица 1.

Результаты расчёта упора и момента гребного винта в переходных режимах близких к режиму реверса $J'' = +0.996$ на переднем ходу и $J'' = -0.996$ на заднем ходу

$\nu = 1 \text{ м/с}$ $D = 6.1 \text{ м.}$ $P/D = 1.2$	$n = +110 \text{ об/мин} \Rightarrow J_T = +0.996$			
	$K_T'' = 0.433$	$T = 2080 \text{ кН}$	$K_Q'' = 0.072$	$Q = 2102 \text{ кНм}$
	$n = -110 \text{ об/мин} \Rightarrow J_T = -0.996$			
	$K_T'' = -0.357$	$T = -1716 \text{ кН}$	$K_Q'' = -0.074$	$Q = -2166 \text{ кНм}$

Таблица 2.

Результаты расчёта с исходными данными, соответствующими среднему режиму между швартовным режимом работы гребного винта и режимом с застопоренным гребным винтом

$\nu = 2 \text{ м/с}$ $D = 6.1 \text{ м.}$ $P/D = 1.2$	$n = +10 \text{ об/мин} \Rightarrow J_T = +0.453$			
	$K_T'' = -0.122$	$T = -23.5 \text{ кН}$	$K_Q'' = -0.019$	$Q = -22.0 \text{ кНм}$
	$n = -10 \text{ об/мин} \Rightarrow J_T = -0.453$			
	$K_T'' = -0.360$	$T = -69.2 \text{ кН}$	$K_Q'' = -0.061$	$Q = -71.8 \text{ кНм}$

Таблица 3.

Результаты расчёта упора и момента гребного винта для режима, близкого к режиму с застопоренным гребным винтом

$\nu = 6 \text{ м/с}$ $D = 6.1 \text{ м.}$ $P/D = 1.2$	$n = +5 \text{ об/мин} \Rightarrow J_T = +0.084$			
	$K_T'' = -0.157$	$T = -219.9 \text{ кН}$	$K_Q'' = -0.023$	$Q = -193.5 \text{ кНм}$
	$n = -5 \text{ об/мин} \Rightarrow J_T = -0.084$			
	$K_T'' = -0.170$	$T = -235.6 \text{ кН}$	$K_Q'' = -0.026$	$Q = -216.1 \text{ кНм}$

Представленные значения упора и момента гребного винта достаточно убедительно иллюстрируют адекватность представленного метода аппроксимации кривых действия гребного винта.

Исследована возможность представления универсальных кривых действия гребного винта с аргументом – универсальной поступью, предложенной А.Д.

Гофманом, в виде степенных функций. Порядок представления подобран рядом аппроксимаций в среде MathCad. Представлен алгоритм выполнения аппроксимаций и конкретные её результаты с оценкой степени адекватности. Выполнен показательный расчёт упора и момента гребного винта для нескольких наиболее значимых режимов работы гребного винта, близких к режиму реверса.

1. Бакаев, В.Г. Расчёт пути и времени разгона и торможения судна под действием гребного винта/Бакаев В.Г., Лаврентьев В.М. – Труды ЦНИИМФ, т. 1, вып. 1, «Морской транспорт», 1955. С.71.
2. Басин, А.М. Теория и расчёт гребных винтов/ Басин А.М., Миниович И.Я. – Л.: Судпромгиз, 1963. С. 760.
3. Гофман, А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна/Гофман А.Д., Справочник. – Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
4. Гречин, М.А.Расчёт манёвренных характеристик судна, связанных с действием гребного винта/Гречин М.А. Труды ЦНИИМФ, вып. 165 – Л.: Транспорт, 1973, с. 38 – 55.
5. Мишкевич В.Г. Машинная обработка результатов испытаний систематических серий моделей гребных винтов в «свободной воде». – В сб.: Средства и методы натурных исследований мареходных качеств судов. Материалы по обмену опытом, НТО Судпрома, Л., Судостроение, 1979, вып. 296, с. 61 – 68.
6. Небеснов, В.И. Вопросы совместной работы двигателей, винта и корпуса судна / В.И.Небеснов. - Л. : Судостроение, 1965. - С. 247.
7. Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я. И. Войткунского. – Л. : Судостроение, 1985. – 768 с.
8. Юдин Ю.И., Пашенцев С.В., Мартюк Г.И., Юдин А.Ю. Теоретические основы безопасных способов маневрирования при выполнении точечной швартовки / Мурманск, МГТУ, 2009, 152с.
9. Delefortrie, G., Vantoree, M., - “Modeling the Maneuvering Behavior of Container Carriers in Shallow Water”, Journal of 1.20 35 Turning Test at H/d-1.24Ship Research, vol.51, No.4, December – 2007, pp.287-296.
10. Li, Ye; Çalıřal, Sander M. Numerical Simulation of Ship Maneuverability in Wind and Current, With Escort Tugs Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME)Marine Technology, Volume 42, Number 4, October 2005, pp. 159-176(18)
11. K. Kijima, et. al., “Prediction Method of Ship Maneuverability in Deep and Shallow waters”, MARSIM & ICSM, June, 4-7, 1990
12. Kruger, S.; Urban, A. (2000), Abschätzung der Manovriereigenschaften von Aazimuth Antrieben in der Projektphase, Handbuch der Werften XXV, Hansa-Verlag.
13. “The Maneuvering Booklet in Resolution A.601(15)”, IMO. Sub-committee on Ship and Design and Equipment –32 Session Agenda Item 4, 1988,11
14. Y. Yoshimura, K. Nomoto, “Modeling of Maneuvering Behavior of Ships with Propeller Idling, Boosting and Reversing”, JSNAJ, Vol.144, 1978
15. Van Lammeren, W.; Van Manen,; Oosterverld, M.(1969), The Wageningen B-Screw Series, Trans. SNAME 77, pp. 269-317.
16. Viviani M, Depascale R, Sebastiani L, et al. Alternative methods for the identification of hydrodynamic coefficients from standard manoeuvres [C]// Proceedings of MARSIM’03. Kanazawa Japan: [s.n.], 2003: RC-5-1-9.