

## Применение методов планирования активного эксперимента для идентификации комплекса "судно-трал"

В.С. Солодов<sup>1</sup>, Ю.И. Юдин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматики и вычислительной техники

<sup>2</sup> Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения

**Аннотация.** В статье рассмотрены статистические методы построения математических моделей промышленно-энергетического комплекса "судно-трал", включающего дизель, винт регулируемого шага, трал, траловую лебёдку. В качестве основного метода исследования используется активный эксперимент. Предложен план проведения и обработки результатов натурных испытаний комплекса, расчёта коэффициентов математических моделей, проверки значимости коэффициентов и адекватности моделей.

**Abstract.** The paper considers the statistical methods of constructing of mathematical models of the "ship-trawl" complex consisting of a diesel engine, variable-pitch propeller, trawl, trawl winch. An active experiment is used as a basic method. The plan of holding and processing of the complex full-scale tests results, the calculation of mathematical models coefficients, coefficients value and model adequacy have been proposed.

### 1. Введение

Практика эксплуатации промышленных судов показывает, что эффективность работы энергетической установки и промышленного судна в целом в значительной мере зависит от того, насколько правильно выбран режим работы дизеля, винта регулируемого шага (ВРШ), траловой лебедки. С целью выяснения взаимосвязей различных параметров, их влияния друг на друга проводятся различные испытания. Результатом этих испытаний, как правило, является множество статических характеристик, каждая из которых связывает два, три, иногда четыре параметра. Сделать содержательный анализ работы всей системы по отдельно взятым характеристикам, количество которых иногда исчисляется десятками, практически невозможно. Поэтому отчетные документы по испытаниям энергетической установки, траловой лебедки, тралов и комплексные испытания судов имеют множество экспериментальных кривых и весьма скромные анализ и выводы.

Несмотря на наглядность графического представления взаимосвязей между отдельными параметрами системы, полный их анализ и определение оптимальных режимов работы системы невозможны без использования ЭВМ.

Для анализа работы комплекса "дизель – ВРШ – судно – трал – траловая лебедка" ("судно-трал") по экспериментальным статистическим характеристикам необходима их математическая модель.

В статье предлагается методика проведения натурных испытаний комплекса, позволяющая получить его математическую модель, построить универсальные статические характеристики, использовать математическую модель для управления судном в режиме траления.

Промышленное судно может работать как с тралами с известными тарифовочными характеристиками, так и с вновь разработанными, характеристики которых ещё предстоит получить. Поэтому ставится задача с наименьшими затратами с единых позиций получать адекватные математические модели элементов этого комплекса, применимые для ЭВМ и удобных для их физической интерпретации.

В качестве основного метода исследования комплекса используется активный эксперимент.

### 2. Методика натурных испытаний судового комплекса

При использовании методов планирования активного эксперимента (МПАЭ) для построения математических моделей судового энергетического комплекса учтены следующие требования к варьируемым (входным) параметрам: их управляемость, измеряемость и высокая точность замера факторов, а также требования, предъявляемые к совокупности факторов: их совместимость и некоррелированность.

В качестве варьируемых факторов были приняты:

- положение рукоятки управления шагом винта, контролируемое выносным указателем шага (ВУШ);
- длина вытравленных ваеров, контролируемая датчиком длины ваеров;
- курс судна относительно ветра или течения, контролируемого датчиком курса.

Совместимость факторов обеспечена тем, что первым проводился опыт, соответствующий максимальной глубине трала и минимальному значению  $V_{VII}^{abc}$ . Второй опыт проводится с учётом

ограничения по мощности. При таких условиях все остальные опыты реализуемы – отсутствует опасность посадки трала на грунт. Шаг винта, длина вытравленных ваеров и курс судна устанавливаются независимо друг от друга, т.е. являются некоррелированными.

Основными выходными параметрами, характеризующими процесс наведения трала на скопление рыбы и определяющими энергетические возможности судна вести траление на больших скоростях и глубинах, являются:

- глубина хода трала  $h$ , м;
- скорость судна (скорость буксировки трала)  $V_c$ , м/с;
- тяговое усилие в ваерах (суммарное)  $2T$ , Н;
- мощность, потребляемая гребным винтом  $N_{г.в.}$ , кВт.

Натурные испытания промысловых судов, впервые работающих с новыми тралами, предлагается проводить по трехфакторному плану Бокса-Бенкина, особенностью которого является целочисленность матрицы. Целочисленность матрицы необходима ввиду того, что в качестве варьируемого параметра (фактора) принято положение выносного указателя шага винта, которое устанавливается дискретно. Курс судна относительно ветра или течения удобнее варьировать также на трёх уровнях: по течению, против течения и лагом.

Ввиду того, что план Бокса-Бенкина почти ротатабельный, для статистической оценки проводятся три опыта в центре плана. Матрица плана в каждом опыте имеет отличные от нуля только два фактора, что весьма удобно для его реализации. Таким образом, по плану требуется провести 15 опытов. Ротатабельность плана дает возможность предсказывать значения функций отклика с дисперсией, почти одинаковой на равных расстояниях от центра плана, что облегчает регрессионный анализ.

Для регрессионного анализа модели в центре плана проводятся повторные опыты. Рекомендуется (Вознесенский, 1973) при количестве факторов  $K = 3$  и  $K = 4$  проводить три повторных опыта. Общее число опытов составляет для  $K = 3$   $N_{общ} = N + n_o = 12 + 3 = 15$ ; для  $K = 4$   $N_{общ} = 24 + 3 = 27$ . Коэффициенты квадратичного полинома и ошибки их определения рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} b_0 &= y_{0m}; & s\{b_0\} &= T_6s_3; \\ b_i &= T_2(iY); & s\{b_i\} &= T_7s_3; \\ b_{ii} &= T_3(iiY) + T_4\sum(iiY) - T_1(0Y); & s\{b_{ii}\} &= T_8s_3; \\ b_{ij} &= T_5(ijY); & s\{b_{ij}\} &= T_9s_3. \end{aligned} \quad (1)$$

В формулах (1) обозначены:  $0Y$  – сумма измеренных значений выходного параметра по всем 13 опытам;  $iY$  – сумма произведений выходного параметра на соответствующий столбец плана эксперимента (см. табл. 2);  $iiY$  – сумма произведений выходного параметра на квадраты столбцов плана эксперимента;  $ijY$  – сумма произведений, характеризующих эффект взаимодействия параметров.

Расчет коэффициентов модели удобнее проводить с помощью ЭВМ. Пример составления бланка-алгоритма для расчета коэффициентов трехфакторного квадратичного полинома приведен в (Ивоботенко и др., 1975).

После определения коэффициентов модели проводится ее регрессионный анализ, при котором оценивается среднеквадратичная ошибка воспроизводимости эксперимента, ошибки в определении коэффициентов регрессии. Проводится анализ значимости коэффициентов регрессии, проверяется гипотеза об адекватности полиномиальной модели со всеми значимыми коэффициентами регрессии.

### 3. Пример проведения и обработки результатов натурных испытаний судового энергетического комплекса

Построение математической модели комплекса рассмотрим на примере натурных испытаний БМРТ. Согласно плану эксперимента, все факторы варьировались на трех уровнях: +1, 0, -1.

Для определения верхних и нижних уровней факторов в натуральных единицах измерения и обеспечения реализуемости плана перед его выполнением проведены пробные траления при минимальной скорости буксировки трала из условия устойчивого его движения в воде и максимальной скорости буксировки с учётом ограничения по мощности.

Максимальная длина ваеров выбрана с учетом глубины моря.

В результате приняты:

$$\begin{aligned} BVIII_{\max} &= 17 \text{ дел}; & BVIII_{\min} &= 11 \text{ дел}; & BVIII_{\text{cp}} &= 14 \text{ дел}; & \Delta BVIII &= 3 \text{ дел}; \\ L_{\max} &= 1800 \text{ м}; & L_{\min} &= 300 \text{ м}; & L_{\text{cp}} &= 1050 \text{ м}; & \Delta L &= 750 \text{ м}. \end{aligned}$$

Значения параметров в кодированных и натуральных величинах представлены в табл. 1, результаты опытов – в табл. 2.

Таблица 1. Значения параметров в кодированных и натуральных величинах

Факторы	Уровни факторов		
	+1	0	-1
$BVШ$ , дел	17	14	11
$L$ , м	1800	1050	300
$q_R$	против ветра	лагом	по ветру

Таблица 2. Результаты эксперимента

№ опыта	План эксперимента			Результаты опыта			
	$BVШ$	$L$	$q_R$	$2T$ , кН	$v_c$ , м/с	$N_{э.в.}$ , кВт	$h$ , м
1	+1	+1	0	310	2,60	2050	560
2	+1	0	-1	305	2,85	2010	280
3	+1	0	+1	320	2,70	2080	295
4	+1	-1	0	280	2,90	1910	85
5	0	-1	+1	250	2,50	1220	130
6	0	-1	-1	240	2,60	1200	120
7	0	0	0	260	2,43	1250	440
8	0	+1	+1	270	2,30	1310	690
9	0	+1	-1	285	2,40	1240	670
10	-1	+1	0	230	2,00	760	800
11	-1	0	+1	225	2,00	750	445
12	-1	0	-1	216	2,10	680	425
13	-1	-1	0	205	2,15	640	160

Полное уравнение регрессии второго порядка имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 BVШ + b_2 L + b_3 q_R + b_{11} BVШ^2 + b_{22} L^2 + b_{33} q_R^2 + b_{12} BVШ \cdot L + b_{13} BVШ \cdot q_R + b_{23} L \cdot q_R.$$

В уравнении все независимые переменные  $BVШ$ ,  $L$ ,  $q_R$  даны в относительных единицах.

В результате расчёта коэффициентов и проверки их значимости по критерию Стьюдента ( $t$ -критерию) получены полиномы

$$\begin{aligned} 2T &= 260 + 42,4BVШ + 15L - 4,5L^2 + 5,75q_R^2, \text{ кН}; \\ V_c &= 2,43 + 0,35BVШ - 0,11L - 0,06q_R - 0,03BVШ^2 + 0,01L^2 - 0,04BVШ \cdot L, \text{ м/с}; \\ N_{э.в.} &= 1250 + 653BVШ + 49L + 29q_R + 114BVШ^2 - 24L^2, \text{ кВт}; \\ h &= 445 - 77,5BVШ + 277,5L - 36,2BVШ \cdot L - 12,5BVШ^2 - 57,5L^2, \text{ м}. \end{aligned}$$

Остальные коэффициенты признаны незначимыми. Адекватность модели проверялась по  $F$ -критерию (критерию Фишера). Гипотеза адекватности неполных квадратичных полиномов не отвергается.

#### 4. Построение математической модели ваерной лебёдки

Математическая модель комплекса "судно-трал" была бы неполной без математического описания ваерной лебёдки, установленной на судне.

Для описания механической характеристики ваерной лебёдки использовался двухфакторный ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП) второго порядка (Ивоботенко и др., 1975). Он весьма удобен для рассматриваемой задачи, так как позволяет очень просто найти коэффициенты (Солодов, 1980).

Модель для случая двух факторов имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2.$$

Коэффициенты модели рассчитываются по формулам:

$$b_0 = (1/9) \sum_{u=1}^9 y_u - 2/3(b_{11} - b_{22}); \quad b_{ii} = (1/2) \sum_{u=1}^9 (x_{iu}^2 - 2/3)y_u; \quad b_i = (1/6) \sum_{u=1}^9 x_{iu} y_u; \quad b_{ij} = (1/4) \sum_{u=1}^9 x_{iu} x_{ju} y_u. \quad (3)$$

Построение математической модели ваерной лебёдки рассмотрим на примере лебёдки WTJ12,5W290. Исходные данные для построения модели:

- передаточное число между валом двигателя и валом барабана лебёдки  $i = 20,06$ ;
- механический к.п.д. передачи от вала двигателя к валу барабана  $\eta = 0,85$ ;
- механическая характеристика привода ваерной лебёдки в режиме "Выбирать" представлена на рис. 1 в виде  $n = f(PV, M)$ , где  $n$  – частота вращения электродвигателя ваерной лебёдки;
- зависимость диаметра навивки от длины ваера на барабане лебёдки  $D = f(L_6)$ .

Используя ОЦКП второго порядка, получим математическое описание наиболее существенной её части – области номинальных значений частоты вращения:

$$n = b_0 + b_1 \cdot ПУ + b_2 \cdot M + b_{12} \cdot ПУ \cdot M + b_{11} \cdot ПУ^2 + b_{22} \cdot M^2,$$

где  $ПУ$  – положение рукоятки управления командоконтроллера в кодированных переменных,  $M$  – значение момента на валу в кодированных переменных.

Коэффициенты модели рассчитывались по формулам (2):

$$b_{11} = -18,3; \quad b_{22} = 21,7; \quad b_0 = 699; \quad b_1 = 165; \quad b_2 = -225; \quad b_{12} = 22,5.$$

Для ваерной лебёдки WTJ 12,5 W290 получим полином:

$$n = 699 + 165ПУ - 225M + 22,5ПУ \cdot M - 18,3ПУ^2 + 21,7M^2, \text{ об/мин}$$

или

$$n = 11,7 + 2,75ПУ - 3,75M + 0,38ПУ \cdot M - 0,3ПУ^2 + 0,36M^2, \text{ об/с}$$

при диапазоне варьирования факторами в следующих пределах:

$$\begin{array}{llll} ПУ^{\min} = 5; & ПУ^{\max} = 7; & ПУ^0 = 6; & \Delta ПУ = 1; \\ M^{\min} = 1500 \text{ Нм}; & M^{\max} = 5500 \text{ Нм}; & M^0 = 3500 \text{ Нм}; & \Delta M = 2000 \text{ Нм}; \end{array}$$

кодированные значения переменных:

$$ПУ = (ПУ^{\text{абс}} - ПУ^0) / \Delta ПУ = ПУ - 6; \quad M = (M^{\text{абс}} - M^0) / \Delta M = (M^{\text{абс}} - 3500) / 2000.$$

Зависимость линейной скорости выбирания от диаметра навивки ваера на барабан и частоты вращения приводного двигателя лебёдки:

$$V_n = (\pi/i)nD = 0,157 nD \text{ м/с.}$$

Зависимость момента на валу приводного двигателя от диаметра навивки и тягового усилия в ваере:

$$M = (1/2i\eta)TD = 2,93 \cdot 10^{-2} TD \text{ Нм.}$$

Зависимость диаметра  $D$  навивки ваеров на барабане лебёдки является ступенчатой. Высота каждой ступеньки составляет приблизительно диаметр ваера. Ступенчатую зависимость заменяем гладкой кривой (рис. 2). Погрешность от такой замены составляет менее половины диаметра ваера  $d$ . Например, для диаметра ваера  $d = 28$  мм погрешность не превышает 2,8 % от среднего диаметра навивки  $D_{\text{ср}} = 1,05$  м.

Аппроксимируя кривую по пяти равноотстоящим точкам (Прохоренков и др., 1992), имеем

$$D = 1,05 + 0,44L_6 - 0,09L_6^2 \text{ м.}$$

Здесь  $L_6$  – длина ваера на барабане в относительных единицах.

Таким образом, тягово-скоростные свойства ваерной лебёдки WTJ12,5W290 в режиме выбирания ваеров описываются следующими математическими выражениями:

$$\begin{aligned} D &= 1,05 + 0,44L_6 - 0,09L_6^2 \text{ м.} \\ L_6 &= (L_6^{\text{абс}} - 2000) / 2000; \quad M^{\text{абс}} = 2,93 \cdot 10^2 TD \text{ Нм}; \quad T = 3,41(M^{\text{абс}} / D) \text{ Н}; \\ n &= 11,7 + 2,75ПУ - 3,75M + 0,38 ПУ \cdot M - 0,3 ПУ^2 + 0,36 M^2, \text{ об/с}; \\ M &= (M^{\text{абс}} - 3500) / 2000; \quad ПУ = ПУ^{\text{абс}} - 6; \\ V_n &= 0,157 nD \text{ м/с.} \end{aligned}$$

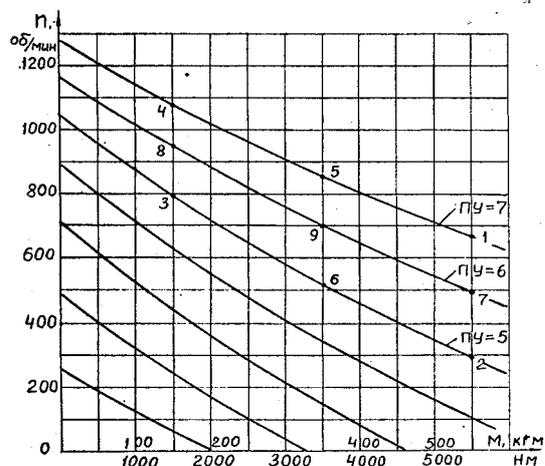


Рис. 1. Механическая характеристика ваерной лебёдки

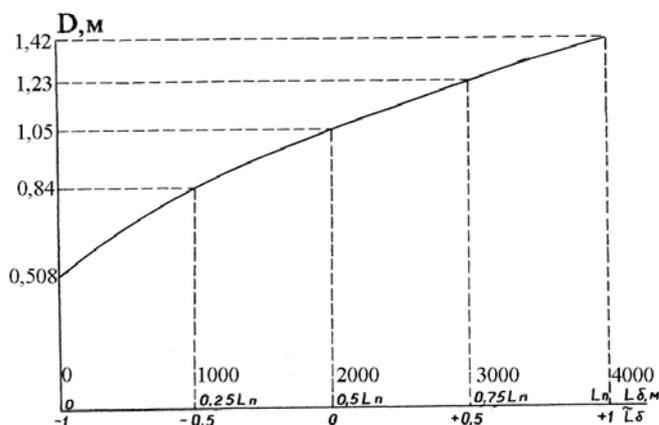


Рис. 2. Зависимость диаметра навивки от длины ваера на барабане

Совмещённые тягово-скоростные характеристики комплекса "судно-трал" (или его математическая модель) позволяют судоводителю, задавая глубину хода трала (исходя из данных о скоплении рыбы) и скорость траления (она должна быть по возможности большой), определить длину ваеров  $L$  и положение рукоятки поста управления винтом регулируемого шага. При этом можно определить тяговое усилие в ваерах, мощность на гребном валу, момент на валу двигателя ваерной лебёдки. Следовательно, будет известна начальная скорость выбирания ваеров. При положительной начальной скорости отсутствует опасность увеличения глубины хода трала при включении ваерной лебёдки. В противном случае, при ограниченной глубине моря возможен задев тралом за грунт и потеря дорогостоящего оборудования.

## 5. Заключение

Использование методов планирования активного эксперимента для проведения и обработки результатов испытаний позволило сократить объём испытательных работ на 30 %, трудозатраты на обработку материалов испытаний снизились в шесть раз. Испытания и обработка результатов по данной методике дали возможность построить математические модели и универсальные статические характеристики комплекса и, тем самым, существенно повысить качество проведения испытаний в целом. Проведение испытаний в едином технологическом цикле позволило путём преобразования полиномиальных моделей получить управляющие воздействия на элементы судового комплекса. Появилась возможность разработки программы для судоводителя, облегчающей его работу по управлению промысловым судном и повышающей безопасность мореплавания.

## Литература

- Вознесенский В.А.** Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М., *Статистика*, 192 с., 1973.
- Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П.** Планирование эксперимента в электромеханике. М., *Энергия*, 184 с., 1975.
- Прохоренков А.М., Солодов В.С., Татьяначенко Ю.Г.** Судовая автоматика. М., *Колос*, 448 с., 1992.
- Солодов В.С.** Испытание, построение математических моделей и статических характеристик энергетических комплексов промысловых судов. *Двигателестроение*, № 5, с.5, 1980.