

**ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ
ВОРОТ И ЗАТВОРОВ НА СУДОПРОПУСКНЫХ ШЛЮЗАХ**

Экспериментальные исследования электроприводов технологических механизмов в условиях действующего шлюза затруднены и связаны с простоем судов. Учитывая сложность проведения экспериментов и исходя из необходимости получения объективных данных о работе электроприводов в технологических режимах, была поставлена задача проведения экспериментальных исследований по научно обоснованной программе, в значительной мере исключающей интуитивный волевой подход. Эта задача может быть решена с помощью планирования эксперимента. Цель планирования – найти такие условия и правила проведения эксперимента, при которых можно получить наибольшую информацию – надежную и достоверную, осуществляя минимальное число опытов.

Для решения поставленной задачи был выбран наиболее характерный из электроприводов – широко распространённый на строящихся и реконструируемых судопропускных гидротехнических сооружениях электрогидравлический привод. Кроме того, был выбран электрогидравлический привод конкретных технологических механизмов – нижних двустворчатых ворот Волгоградского шлюза №30, работающих в особо сложных и неблагоприятных условиях эксплуатации.

Если в качестве объекта управления выбрать электрогидравлический привод двустворчатых ворот, а в качестве выходных параметров – перепад давления в полостях гидроцилиндра p и время технологической операции t , то математическое описание привода ворот можно представить в виде некоторых полиномов – отрезков ряда Тейлора, в которые разлагаются неизвестные зависимости.

Если в качестве входных независимых переменных (факторов) выбрать величину заглубления створки H_1 и величину перепада уровней на створке H_2 , которые не остаются постоянными в течение эксплуатационного периода на большей части судопропускных шлюзов, то математическое описание привода двустворчатых ворот в окрестности точки базового режима $\vec{H} = (H_1, H_2)$ может быть получено варьированием каждого из факторов H_i на u_i уровнях.

Шаг варьирования ΔH_i по каждой переменной целесообразно выбирать таким, чтобы, во-первых, при вариации переменных от базового уровня на величину шага ни один вариант варьирования не привёл к нарушению технологического процесса шлюзования, во-вторых, приращению величин выходных параметров p и t базовым значениям p и t при реализации шага можно было выделить на фоне «шума» при небольшом числе параллельных опытов. В частности, для нижних двустворчатых ворот Волгоградского шлюза №30 выбраны следующие шаги варьирования: по величине заглубления створки - $\pm H_1 = 2\text{м}$; по величине перепада уровней на створке - $\pm H_2 = 0.05\text{м}$.

Для планирования выбран полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^n , который обычно используют для построения математических моделей объектов. Не останавливаясь на перечислении достоинств планов ПФЭ 2^n , эффективность которых с различных точек зрения достаточно подробно показана в теории планирования эксперимента, отметим, что в этом случае каждая из независимых переменных варьируется на двух уровнях, отличающихся от базового уровня на величину шага варьирования.

В нашем случае число этих комбинаций будет $N = 2^2$.

Матрицу планирования Z полного факторного эксперимента можно представить в виде табл.1.

Таблица 1

ПФЭ типа 2^2

Номер варианта варьирования	Матрица планирования				Наблюдения	
	h_0	h_1	h_2	$h_1 h_2$	p	t
№						
1	+	-	-	+	p_1	t_1
2	+	+	-	-	p_2	t_2
3	+	-	+	-	p_3	t_3
4	+	+	+	+	p_4	t_4

В матрице планирования h_0 – фиктивная переменная; h_1 и h_2 – безразмерные переменные:

$$h_1 = \frac{H_1 - H_1}{H_1}; h_2 = \frac{H_2 - H_2}{H_2}.$$

Матрица составлена по известному правилу:

1. Каждая n -я строчка матрицы представляет собой набор координат точки \vec{Z}_n , в которой проводится эксперимент.

2. Поскольку переменные h_1, h_2 принимают лишь значения «+1» и «-1», то все остальные переменные $h_1 h_2$ могут принимать только такие значения. Это позволяет в целях упрощения записывать в таблицу вместо «+1» и «-1» только их знаки «+» и «-».

3. \vec{Z} выбирается так, чтобы управляемые переменные находились на нижнем уровне, то есть $h_1 = -1, h_2 = -1$. Последующие точки (строки) при составлении матрицы планирования выбираются так, чтобы получить все возможные сочетания уровней в четырех опытах, поэтому при построчном переборе всех вариантов частота смены знака управляемых переменных для каждой последующей переменной вдвое меньше, чем для предыдущей (см. табл. 1).

Два столбца управляемых переменных образуют план эксперимента, а остальные столбцы матрицы получаются перемножением соответствующих значений управляемых переменных.

Поскольку изменение выходных величин p и t носит случайный характер, необходимо в каждой точке \vec{Z}_n проводить m параллельных опытов и результаты наблюдений $P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{nm}$ и $t_{n1}, t_{n2}, \dots, t_{nm}$ усреднять.

В нашем случае $m = 3$. Следовательно, эксперимент делится на три серии опытов, в каждой из которых полностью реализуется матрица планирования (проводится эксперимент в точках факторного пространства).

Различие значений p и t в каждом опыте обусловлено действием случайных, не учитываемых в опытах факторов, или, другими словами, ошибки опыта являются случайными. Однако в условиях шлюза возможны такие ситуации, когда на результатах опытов может заметно сказаться неконтролируемое влияние внешних условий (температуры окружающего воздуха, ветра и др.), порождающее систематические ошибки. Чтобы исключить влияние возникающих при этом систематических погрешностей, целесообразно применить разработанный в теории планирования эксперимента основной прием – это рандомизация опытов по времени, то есть постановка опытов, предписанных планом эксперимента, в случайной последовательности.

Таким образом, перед реализацией плана на объекте (электрогидравлическом приводе двустворчатых ворот) с помощью таблицы равномерно распределённых случайных чисел определяем последовательность реализации вариантов варьирования матрицы планирования в каждой серии опытов.

Порядок реализации вариантов варьирования в каждой из трех серий, а также сведения о базовых значениях, шагах варьирования, верхних и нижних уровнях управляемых переменных для электрогидравлического привода нижних двустворчатых ворот Волгоградского шлюза №30 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Входные переменные	H ₁ (м)		H ₂ (м)	
Базовый уровень	6,8		0,05	
Шаг варьирования	2,0		0,05	
Верхний уровень	8,8		0,10	
Нижний уровень	4,8		0,00	
Номер варианта варьирования	Порядок реализации вариантов варьирования			
	№	k_1	k_2	k_3
1	1	5	3	
2	5	2	6	
3	2	3	4	
4	4	6	1	

После проведения экспериментальных исследований проведена проверка на воспроизводимость эксперимента (проверка выполнения второй предпосылки регрессионного анализа об однородности оценок выборочных дисперсий S_n^2). Задача состояла в проверке гипотезы о равенстве дисперсий $\sigma^2\{p_1\} = \sigma^2\{p_2\} = \dots = \sigma^2\{p_4\}$ и $\sigma^2\{t_1\} = \sigma^2\{t_2\} = \dots = \sigma^2\{t_4\}$ при экспериментах соответственно в точках $\vec{Z}_1, \vec{Z}_2, \vec{Z}_3, \vec{Z}_4$. При проверке значение доверительной вероятности было принято равным 0,95 (уровень значимости 0,05), которое обычно принимают в технических задачах. Проверка на воспроизводимость эксперимента по критерию Кохрена при данном количестве серий опытов на электрогидравлических приводах нижних двустворчатых ворот Волгоградского шлюза №30 дала положительный результат. Полученные экспериментальные данные находятся в доверительных пределах.