

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт
Кафедра «Робототехника и автоматизация производства»

Утверждено на заседании кафедры
«Робототехника и автоматизация
производства»
«14» января 2022г., протокол №6

Заведующий кафедрой



Е.В. Ларкин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических (семинарских) занятий
по дисциплине (модулю)

«Планирование экспериментов и измерений
в научных исследованиях»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы магистратуры

15.04.06

Мехатроника и робототехника

с направленностью (профилем)
Роботы и робототехнические системы

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 150406-02-22

Тула 2022 год

Разработчик методических указаний

Кузнецова Татьяна Рудольфовна, доцент, канд. техн. наук,
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


(подпись)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ.....	4
2. Практическое занятие № 1. Экспериментальное определение характеристик закона распределения производственных погрешностей параметров.....	5
3. Практическое занятие № 2. Экспериментальное определение коэффициентов чувствительности РС-фильтра разностным методом.....	11
4. Практическое занятие № 3. Экспериментальные исследования статических характеристик исполнительных пневмоцилиндров.....	16
5. Практическое занятие № 4. Экспериментальные исследования силы трения на подвижных частях газового регулятора давления.....	22
6. Практическое занятие № 5. Проведение экспериментальных исследований методом полнофакторного эксперимента	27
7. Практическое занятие № 6. Экспериментальные исследования характеристик электромагнитного преобразователя.....	36

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНО- СТЕЙ ПАРАМЕТРОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является проведение статистических исследований производственного разброса параметров элементов систем автоматического управления, построение практической кривой и определение характеристик закона распределения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

При выборе и обосновании метода расчета допусков и метода сборки технических систем необходимо знать законы и характеристики распределения производственных погрешностей параметров элементов. Для этого проводятся статистические исследования точности производства элементов этих систем. Берется однородная представительная выборка, состоящая из N элементов. Обычно N составляет 50–100 элементов. Проводится измерение значений параметров этих элементов. Для измерений используются средства измерений, погрешность которых не должна превышать 0,3 допуска на контролируемый параметр, Результаты измерений заносятся в протокол по форме табл.1.

Таблица 1.

Протокол измерений

№ изме мере ре- ний	Значение па- раметра	№ изме мере ре- ний	Значение па- раметра	№ изме мере ре- ний	Значение па- раметра
1		26		51	
2		27		52	
·		·		·	
·		·		·	
25		50		75	

По протоколу измерений находиться наибольшее x_{max} и наименьшее x_{min} значение параметра, по которым определяется диапазон изменения размеров R по выражению $R = x_{max} - x_{min}$ (1)

Для определения вида закона распределения параметра строиться гистограмма практического распределения. Для ее построения необходимо

диапазон изменения параметров R разбить на ряд интервалов, число которых выбирается в зависимости от величины выборки N . Рекомендуемое число интервалов n определяется по формуле:

$$n = 0,1 \cdot N \quad (2)$$

Далее находят ширину интервала h по выражению:

$$h = \frac{R}{n} \quad (3)$$



После этого производится подсчет частот распределения, для чего заполняется табл.2. Под частотой распределения понимается число измерений параметров попавших в заданный интервал. Подсчет частот удобно производить, используя условное изображение частоты в виде квадрата со сторонами, диагоналями и точками в вершинах . Полностью заполненный квадрат соответствует десяти измерениям, попавшим в заданный интервал.

Таблица 2.

Подсчет частот распределения.

№ интервалов	Границы интервалов		Середина интервала x_i	Подсчет частот	Частота m_i
	От	До (включительно)			
1	x_{min}	$x_{min} + h$	x_1		2
2	$x_{min} + h$	$x_{min} + 2h$	x_2		4
3	$x_{min} + 2h$	$x_{min} + 3h$	x_3		7
...
n	$x_{min} + (n-1)h$	x_{max}	x_n		3

По полученной частоте m_i с учетом интервалов строится гистограмма практического распределения, примерный вид которой представлен на рисунке 1.

Внешний вид гистограммы практического распределения позволяет сделать предварительный вывод о виде закона распределения производственной погрешности параметра. Окончательный вывод о виде закона распределения можно сделать только путем сравнения практического распределения с теоретической кривой на основе различных критериев согласия [1].

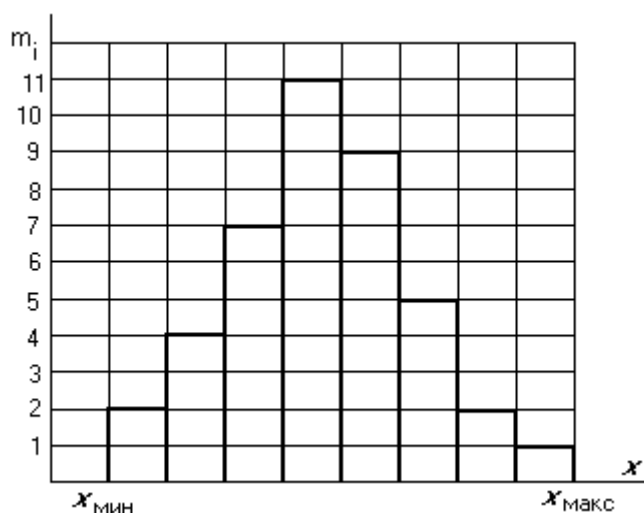


Рисунок 1 - Гистограмма практического распределения

Определение характеристик практического распределения производственных погрешностей производится по выражениям:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{N} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2 \cdot m_i}{N}}$$

где M – математическое ожидание параметра;

σ - среднее квадратическое отклонение параметра.

Для этого заполняется табл.3.

Таблица 3.

Определение характеристик распределения

№ интервалов	$x_i m_i$	$x_i - M$	$(x_i - M)^2$	$(x_i - M)^2 m_i$
1				
2				
3				
....				
n				
	$\sum_{i=1}^n x_i m_i$			$\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2 m_i$

Если вид гистограммы практического распределения соответствует нормальному закону распределения, то по полученным значениям M и σ можно построить теоретическую кривую нормального распределения, используя координаты характерных точек, заполнив табл.4

Таблица 4.

Координаты точек теоретической кривой		
Характерные точки	Абсцисса	Ордината
Вершина кривой	$x = M$	$Y_{max} = 0,4 (Nh/\sigma)$
Точка перегиба 1	$x_1 = M + \sigma$ $x_2 = M - \sigma$	$Y_{1,2} = 0,24 (Nh/\sigma)$
Точка перегиба 2	$X_3 = M + 2\sigma$ $X_4 = M - 2\sigma$	$Y_{3,4} = 0,0544 (Nh/\sigma)$
Точка перегиба 3	$X_5 = M + 3\sigma$ $X_6 = M - 3\sigma$	$Y_{5,6} = 0$

По рассчитанным характерным точкам строится теоретическая кривая распределения погрешностей параметров, примерный вид которой представлен на рисунке 2. На графике теоретического распределения откладываются также значения номинального x_0 , предельных отклонений BO , HO , координаты середины поля допуска Δ и поля допуска δ исследуемого параметра, заданными в технических условиях.

Полученные в результате расчета характеристики практического распределения M и σ сопоставляются с координатой середины поля допуска Δ и допуском δ , заданным в технических условиях на параметр.

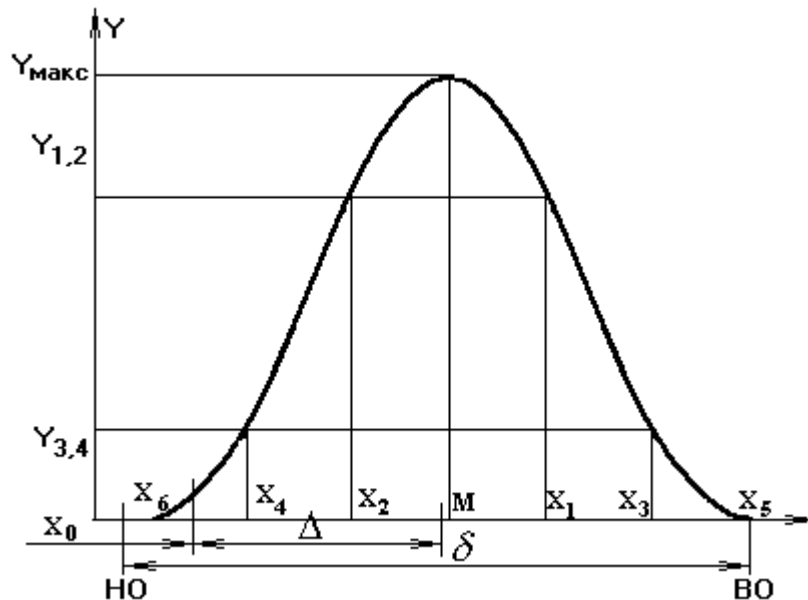


Рисунок 2 - Теоретическая кривая распределения

Наличие существенных отклонений между математическим ожиданием M и координатой поля допуска Δ можно установить с помощью следующего неравенства:

$$|M - \Delta| \leq \frac{z \cdot \sigma}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

где z – уровень значимости, определяемый из условия надежности результатов.

Обычно принимают $z = 3,0$, что соответствует надежности результатов с вероятностью $p=0,9973$ при нормальном распределении. При других значениях надежности результатов p значение z определяют по таблицам табулированной функции Лапласа, которая приводится в литературе [2].

Если условие (6) соблюдается, то коэффициент относительной асимметрии β принимают равным нулю.

Если условие (6) не соблюдается, то рассчитывают значение коэффициента относительной асимметрии по выражению:

$$\beta = \frac{M - \Delta}{0,5\delta} \quad (7)$$

Степень расхождения между заданным полем допуска δ и полем рассеивания оценивается показателем достоверности Θ , который рассчитывается по выражениям:

$$\Theta = \frac{\sigma^2}{\sigma_{my}^2} \quad \text{при } \sigma > \sigma_{my}$$

Или

$$\Theta = \frac{\sigma_{my}^2}{\sigma^2} \quad \text{при } \sigma < \sigma_{my}$$

где $\sigma_{my} = \frac{\delta}{6}$

Этот показатель должен быть меньше заданного граничного показателя Θ_r , зависящего от числа измерений N :

$$\Theta < \Theta_r \quad (8)$$

Значения граничного показателя достоверности Θ_r приведены в табл. 5.

Таблица 5.

Значения граничного показателя достоверности

При $\sigma < \sigma_{my}$										
N	10	20	30	40	50	60	70	80	100	200
Θ_r	2,54	1,84	1,62	1,51	1,44	1,39	1,35	1,32	1,28	1,19
При $\sigma > \sigma_{my}$										
N	10	20	30	40	50	75	100	200		
Θ_r	1,83	1,57	1,46	1,40	1,35	1,28	1,24	1,17		

Если условие (8) выполняется, то коэффициент относительного рассеивания k принимается равным единице.

Если условие (8) не выполняется, рассчитывают значение коэффициента относительного рассеивания k по выражению:

$$K = \frac{3\sigma}{0.5\delta} \quad (9)$$

3. ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Ознакомиться и изучить методику проведения статистических исследований точности производства с целью построения практической кривой и определения характеристик распределения производственных погрешностей параметров.

3.2. Провести измерение параметров на выборке элементов, используя необходимые средства измерения. Измерения каждого параметра провести 3 раза, среднее значение измерений занести в табл. 1

3.3. Провести подсчет частот распределения и построить гистограмму практического распределения.

3.4. Определить характеристики практического распределения производственных погрешностей параметров.

3.5. По координатам характерных точек построить теоретическую кривую распределения.

3.6. Сопоставить характеристики практического распределения с координатой середины поля допуска и допуском, заданным в технических условиях (устанавливается преподавателем) и определить коэффициенты относительной асимметрии и относительного рассеивания параметров.

3.7. Оформить отчет и ответить на контрольные вопросы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. С какой целью проводятся статистические исследования точности производства?

4.2. Что необходимо иметь для проведения статистических исследований?

4.3. Каков порядок проведения статистических исследований?

4.4. Как можно установить вид закона распределения производственных погрешностей параметров?

4.5. Что характеризует математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение практического распределения?

4.6. Какой физический смысл несут коэффициенты относительного рассеивания и относительной асимметрии?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. –М.: Машгиз, 1960. – 174с.
2. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. –М.: Наука, 1969. –384с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РС-ФИЛЬТРА РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью работы является изучение методики определения коэффициентов чувствительности первого и второго порядка РС-фильтра разностным методом.

Задачами работы являются:

ознакомление с методикой определения коэффициентов чувствительности первого и второго порядка разностным методом;

экспериментальное определение коэффициентов чувствительности РС-фильтра;

получение математического уравнения оценки параметрической точности РС-фильтра.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Уравнение параметрической точности любого элемента, блока или технической системы в целом можно представить в виде:

$$\Delta J_{\text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i \quad (1)$$

где $\Delta J_{\text{ВЫХ}}$ – отклонения выходной характеристики; $\Delta \alpha_i$ – погрешности параметров α_i .

Сомножитель $\frac{\partial f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i}$ называется коэффициентом чувствительности и определяет пропорциональность изменения выходной характеристики $J_{\text{ВЫХ}}$ от изменения параметров α_i . Обозначим этот коэффициент A_i ,

$$A_i = \frac{\partial f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} \quad (2)$$

Уравнение (1) удобно для расчетов только тогда, когда параметры α_i и выходная характеристика имеют одну размерность. Однако при расчетах параметрической точности технических систем могут суммироваться погрешности различной физической природы – давление, линейное перемещение и т. п. В этом случае удобнее пользоваться погрешностями, выраженными в относительных безразмерных величинах (например, в про-

центах). Для этого в выражении (1) сделаем небольшие преобразования.

Умножим правую часть на $\frac{\alpha_i}{\alpha_i}$ и разделим обе части на J_{BbIX} .

$$\frac{1}{J_{BbIX}} \Delta J_{BbIX} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_i} \cdot \frac{1}{J_{BbIX}}$$

Введем понятие относительной погрешности параметра $\overline{\Delta \alpha_i} = \frac{\Delta \alpha_i}{\alpha_i}$

и относительной погрешности выходной характеристики $\overline{\Delta J_{BbIX}} = \frac{\Delta J_{BbIX}}{J_{BbIX}}$.

Тогда получим следующее выражение:

$$\overline{\Delta J_{BbIX}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{J_{BbIX}} \cdot \overline{\Delta \alpha_i} \quad (3)$$

Обозначим $\frac{\partial f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{J_{BbIX}} = \overline{A_i}$ - относительный коэффициент чувствительности.

$$\overline{A_i} = \frac{\alpha_i}{J_{BbIX}} \cdot A_i \quad (4)$$

Первый сомножитель (4) показывает удельный вес параметра, а второй – пропорциональность изменения выходной характеристики от изменения параметра α_i .

При оценке погрешностей выходной характеристики от погрешностей параметров в некоторых случаях недостаточна линейная зависимость (1).

В этом случае необходимо учитывать третий член разложения функции $F(\alpha_i)$ в ряд Тейлора, т. е. вторую производную. С учетом этого выражение для погрешностей выходной характеристики от независимых параметров примет вид:

$$\Delta J_{\text{итд}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i + \frac{1}{2!} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i^2} \cdot \Delta \alpha_i^2 \quad (5)$$

Обозначим сомножитель $A_i^2 = \frac{\partial^2 f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i^2}$ и будем называть его ко-

эффициентом чувствительности второго порядка.

Таким образом, расчет отклонений выходных характеристик возможен, если известны отклонения параметров и известны значения соответствующих коэффициентов чувствительности. Значения коэффициентов чувствительности могут быть получены аналитическими или экспериментальными методами.

Методы экспериментального определения коэффициента чувствительности основаны на принципе суперпозиции и состоят в представлении частной производной $\frac{\partial f(\alpha_i)}{\partial \alpha_i}$ в виде отношения приращений выходной характеристики к приращению исследуемого параметра на малую величину $\Delta \alpha_i$, т. е. $A_i \approx \frac{\Delta J_{\text{ВЫХ}}}{\Delta \alpha_i}$.

Экспериментальные значения коэффициента чувствительности могут быть получены как на самом изделии, так и на его физической или математической модели. При этом необходимо обеспечить варьирование α_i , а также располагать методикой и средствами точных измерений $\Delta J_{\text{ВЫХ}}$ и $\Delta \alpha_i$ или их аналогов.

Получим выражение коэффициента чувствительности для так называемого «разностного метода» экспериментального определения. Для этого дадим одному из параметров α_i приращение $+\Delta \alpha_i$ и запишем выражение для выходной характеристики, разложив его в ряд Тейлора.

$$J_{\text{ВЫХ}}^+ = J_{\text{ВЫХ}} + \frac{1}{1!} \cdot \frac{\partial J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i^2} \cdot \Delta \alpha_i^2 + \frac{1}{3!} \cdot \frac{\partial^3 J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i^3} \cdot \Delta \alpha_i^3 + \dots \quad (6)$$

Дадим теперь параметру α_i отклонение $-\Delta \alpha_i$ и запишем выражение выходной характеристики с учетом этого отклонения.

$$J_{\text{ВЫХ}}^- = J_{\text{ВЫХ}} - \frac{1}{1!} \cdot \frac{\partial J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i^2} \cdot \Delta \alpha_i^2 - \frac{1}{3!} \cdot \frac{\partial^3 J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i^3} \cdot \Delta \alpha_i^3 + \dots \quad (7)$$

Вычитая из уравнения (6) уравнение (7) получим:

$$J_{\text{ВЫХ}}^+ - J_{\text{ВЫХ}}^- = 2 \cdot \frac{1}{1!} \cdot \frac{\partial J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i + \frac{2}{3!} \cdot \frac{\partial^3 J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i^3} \cdot \Delta \alpha_i^3 + \dots$$

Отбросив составляющие третьего и большего порядка малости (это методическая ошибка и она близка к нулю) получим:

$$J_{\text{ВЫХ}}^+ - J_{\text{ВЫХ}}^- = 2 \cdot \frac{\partial J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i} \cdot \Delta \alpha_i$$

Разрешим полученное выражение относительно коэффициента чувствительности первого порядка.

$$\frac{\partial J_{\text{ВЫХ}}}{\partial \alpha_i} = A_i = \frac{J_{\text{ВЫХ}}^+ - J_{\text{ВЫХ}}^-}{2 \cdot \Delta \alpha_i} \quad (8)$$

или в безразмерных величинах

$$\overline{A_i} = \frac{J_{\text{ВЫХ}}^+ - J_{\text{ВЫХ}}^-}{2 \cdot \Delta \alpha_i} \cdot \frac{\alpha_i}{J_{\text{ВЫХ}}} \quad (9)$$

Для получения выражения коэффициентов чувствительности второго порядка сложим уравнения (6) и (7). Тогда получим:

$$J_{B\bar{L}X}^+ + J_{B\bar{L}X}^- = 2 \cdot J_{B\bar{L}X0} + \frac{2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 J_{B\bar{L}X}}{\partial \alpha_i^2} \cdot \Delta \alpha_i^2 + \frac{2}{4!} \cdot \frac{\partial^4 J_{B\bar{L}X}}{\partial \alpha_i^4} \cdot \Delta \alpha_i^4 + \dots$$

где $\frac{2}{4!} \cdot \frac{\partial^4 J_{B\bar{L}X}}{\partial \alpha_i^4} \cdot \Delta \alpha_i^4 + \dots$ - методическая ошибка.

Полагая, что методическая ошибка мала и стремится к нулю и разрешая относительно второй производной можно получить выражение для коэффициента чувствительности второго порядка:

$$A_i^2 = \frac{\partial^2 J_{B\bar{L}X}}{\partial \alpha_i^2} = \frac{(J_{B\bar{L}X}^+ + J_{B\bar{L}X}^-) - 2 \cdot J_{B\bar{L}X0}}{\Delta \alpha_i^2}, \quad (10)$$

или в относительных величинах:

$$\overline{A_i^2} = \frac{\partial^2 J_{B\bar{L}X}}{\partial \alpha_i^2} = \frac{(J_{B\bar{L}X}^+ + J_{B\bar{L}X}^-) - 2 \cdot J_{B\bar{L}X0}}{\Delta \alpha_i^2} \cdot \frac{\alpha_{i0}^2}{J_{B\bar{L}X0}} \quad (11)$$

Таким образом, для определения его коэффициентов чувствительности первого и второго порядка разностным методом необходимо на изделии, физической или математической его модели провести измерение выходной характеристики при номинальных значениях параметров и с учетом их отклонений, затем, используя выражения (8)–(11), рассчитать их значения.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Определение коэффициентов чувствительности RC-фильтра разностным методом

Для определения коэффициентов чувствительности необходимо:

1. Собрать схему, представленную на рисунке.

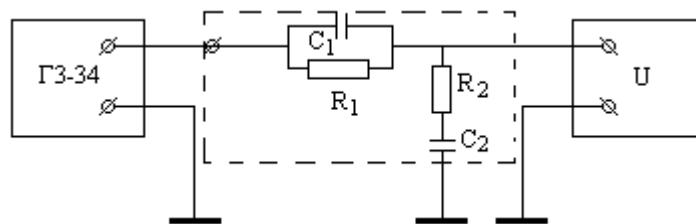


Рисунок - Схема экспериментального определения коэффициентов чувствительности

2. Установить тумблеры в нейтральное положение, соответствующего номинальным значениям параметров, и подать на фильтр с генератора ГЗ-24 напряжение $U_{ex} = 15\text{В}$, $f = 30\text{Гц}$.

3. Измерить по вольтметру напряжение U_{blix} , результат измерения занести в таблицу.

4. Задать приращение одному из параметров $+\Delta\alpha$, измерить значение выходного напряжения U_{blix}^+ . Результат измерения занести в таблицу.

5. Задать приращение $-\Delta\alpha$ этому же параметру и измерить значение выходного напряжения U_{blix}^- . Результат измерения также занести в таблицу.

6. Установить тумблер в нейтральное положение.

7. Повторить пункты 4–6 для остальных параметров α_i .

8. Вычислить по формулам (8)–(11) значения коэффициентов чувствительности первого и второго порядка для каждого параметра α_i . Результаты вычисления занести в таблицу.

Таблица

Параметры	U_{blix0} , В	$U_{\hat{A}\hat{O}\hat{\sigma}}^+$, В	$U_{\hat{A}\hat{O}\hat{\sigma}}^-$, В	A_i	\dot{A}_i^2	\overline{A}_i	\overline{A}_i^2
R_1							
R_2							
C_1							
C_2							

Значения $2\Delta\alpha_i$ определяются следующим образом:

$$2\Delta\alpha_i = \alpha^+ - \alpha^-.$$

Исходные данные:

$$R_{10} = 100\text{кОм}; \quad R_{10}^+ = 110\text{кОм}; \quad R_{10}^- = 91\text{кОм};$$

$$R_{20} = 51\text{кОм}; \quad R_{20}^+ = 56\text{кОм}; \quad R_{20}^- = 47\text{кОм};$$

$$C_{10} = C_{20} = 0,1\text{мкФ}; \quad C_{10}^+ = C_{20}^+ = 0,11\text{мкФ}; \quad C_{10}^- = C_{20}^- = 0,09\text{мкФ}.$$

3.2. Получение уравнения параметрической точности РС-фильтра

По полученным значениям коэффициентов чувствительности первого и второго порядка составить уравнение параметрической точности РС-фильтра вида (5). Провести анализ полученных значений коэффициентов чувствительности и сделать выводы о характере зависимости выходной характеристики от значений и знаков коэффициентов чувствительности параметров.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Что необходимо иметь для определения коэффициентов чувствительности разностным методом?

4.2. Какова методическая ошибка определения коэффициентов чувствительности разностным методом?

4.3. Что показывают коэффициенты чувствительности

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПНЕВМОЦИЛИНДРОВ

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью работы является проведение экспериментальных исследований статических характеристик исполнительных пневмоцилиндров.

Задачами работы являются:

1. Ознакомление с методиками экспериментальных исследований статических характеристик исполнительных пневмоцилиндров.

2. Проведение экспериментальных исследований, включающих в себя: определение максимального хода штока поршня, согласование среднего положения поршня с сигналом потенциометра обратной связи, усилия трогания, проверка пневмоцилиндра на герметичность и расчет величины утечки.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Исполнительные пневмоцилиндры являются основной частью приводов промышленных роботов, от качества изготовления и сборки которых существенно зависят все характеристики привода.

Особенностями техпроцесса сборки исполнительных пневмоцилиндров является обеспечение герметичности подвижных и неподвижных соединений «поршень – цилиндр», «шток – крышка», «корпус – крышка». Уплотнение этих соединений обычно проводится путем подбора резиновых колец или манжет при сборке. Для предотвращения повреждения зеркала цилиндра и манжеты или кольца уплотнения поршня при установке в цилиндр используются специальные технологические втулки. Строгая соосность отверстий крышек обеспечивается совместной чистовой обработкой этих отверстий при сборке.

После установки потенциометра обратной связи согласовывают среднее положение поршня и потенциометра. Для этого проводят измерение выхода штока из корпуса при крайних положениях поршня, по ним определяют максимальную величину хода поршня и рассчитывают значение выхода штока при геометрическом среднем положении поршня. Установив поршень в геометрически среднее положение, регулируют уровень сигнала, снимаемого с потенциометра обратной связи (ПОС). Смещением обмотки потенциометра относительно корпуса цилиндра или подвижного контакта относительно штока уравнивают значение сопротивления на обоих плечах потенциометра.

Собранные исполнительные пневмоцилиндры проверяют на специальных стендах по величине хода штока, усилия трогания, а также на герметичность.

Определение усилия трогания поршня может быть проведено различными способами. Один из них состоит в приложении к штоку параллельно его продольной оси знакопеременного усилия с помощью динамометра. Постепенно увеличивая усилие сначала в одном, а затем в другом направлении, регистрируют усилие, при котором начинается устойчивое движение поршня. Момент движения отмечают по изменению сопротивления ПОС.

Герметичность полостей цилиндра обычно оценивается по величине падения давления в полости за установленное время. Для этого изделие заполняется рабочим телом (воздухом) до получения в проверяемой полости давления на (20 – 30) % больше номинального рабочего давления, после чего отсоединяется от компрессора стенда и выдерживается некоторое время. Падение давления в проверяемой полости регистрируется по манометру. Величина утечки Q может определена по падению давления Δp и времени выдержки t , если известен объем V проверяемой полости, находившейся под давлением, по выражению:

$$Q = \frac{\Delta p}{RT} \cdot \frac{V}{t}$$

где R – газовая постоянная; T – температура воздуха, К

Проверка усилия трогания и герметичности силового цилиндра проводится при различных положениях поршня в пределах его рабочего хода, обычно она проводится при среднем и крайних положениях поршня.

3. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

Для определения статических характеристик исполнительных пневмоцилиндров необходимы следующее оборудование и приборы:

1. Исполнительный пневмоцилиндр в сборе.
2. Специальный пульт для определения герметичности полостей.
3. Стойка для определения усилия трогания.
4. Динамометр.
5. Цифровой вольтметр.
6. Секундомер.
7. Штангенциркуль

4. ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

Ознакомиться с методиками экспериментального исследования и определить следующие статические характеристики исполнительных пневмоцилиндров промышленных роботов:

- максимальный ход штока поршня цилиндра;
- электрические цепи привода;

- согласование среднего геометрического положения штока с ПОС;
- усилие трогания поршня;
- герметичность полостей цилиндра.

4.1. Проверка максимального хода штока поршня исполнительного пневмоцилиндра X_{\max} осуществляется путем измерения выхода штока из корпуса с помощью штангенциркуля при двух крайних положениях поршня.

$$X_{\max} = X_1 - X_2.$$

После измерения величины хода штока X (мм), рассчитывается геометрическое среднее положение штока $X_{\text{ср}}$ по выражению

$$\tilde{O}_{\tilde{N}D} = \frac{\tilde{O}_1 + X_2}{2},$$

где X_1, X_2 – величина выхода штока при крайних положениях поршня.

4.2. Для проверки электрических цепей исполнительного пневмоцилиндра необходимо:

1. Изучить электрическую схему привода, представленную на рисунке 1.
2. Установив поршень в геометрически среднее положение.
3. С помощью цифрового вольтметра провести измерения омических сопротивлений обмоток ЭМП и ПОС при геометрически средних и крайних положениях поршня.

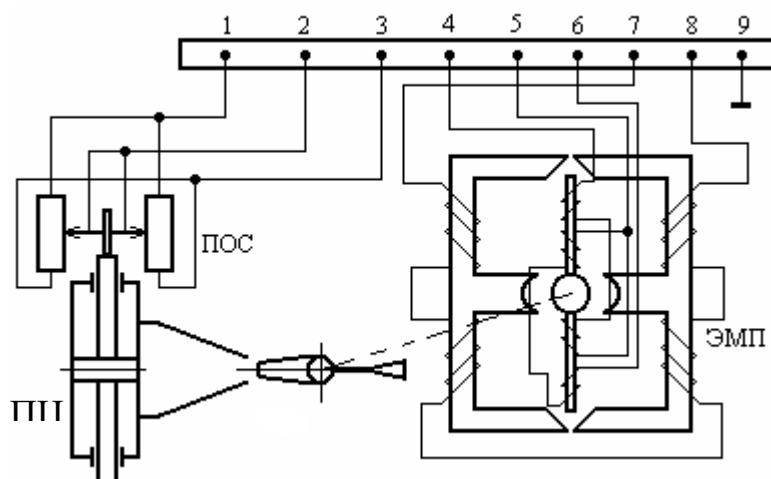


Рисунок 1 - Электрическая схема пневмопривода

4. Результаты измерений занести в табл. 1.

4.3. Проверка согласования среднего геометрического положения штока с ПОС производится путем сравнения измерений сопротивления на лепестках 1-2 и 3-4 при среднем положении поршня. Разность не должна превышать величины 10 Ом.

Если разность показаний превышает эту величину, то путем смещения обмотки ПОС относительно корпуса пневмоцилиндра добиваются равенства показаний.

Таблица 1.

Электрические цепи		ЭМП				ПОС		
Номера лепестков		4-5	5-6	4-6	7-8	1-3	1-2	2-3
Данные измерения сопротивления, Ом	шток в среднем положении							
	шток наружу							
	шток вовнутрь							
Данные сопротивления по ТУ, Ом		50⁺⁴	25⁺²	25⁺²	68±3,4	223±22,5	2-248	2-248

4.4. Определение усилия трогания поршня проводится следующим образом:

1. Перед проверкой корпус рулевого привода закрепить в стойке;
2. Выводы от лепестков 2-3 колодки жгута привода подсоединить к клеммам цифрового вольтметра;
3. Проушину динамометра соединить с серьгой штока;
4. Трижды от упора до упора переместить шток цилиндра с помощью динамометра и затем выставить в среднее положение по показанию сопротивления ПОС;
5. Приложить к штоку с помощью динамометра усилие вдоль продольной оси цилиндра, плавно повышая через каждые 0,25 кг. При каждом значении усилия производить выдержку 2-3 секунды.
6. Отметить значение усилия, при котором начнется устойчивое движение поршня. Начало устойчивого движения поршня определяют по изменению сопротивления ПОС.
7. Измерение повторить три раза, рассчитав среднее арифметическое.
8. Усилие трогания определить в обе стороны движения штока от среднего положения, т.е. при движении штока внутрь и наружу.
9. Определить усилие трогания из двух крайних положений штока, проведя пункты 4 – 7. Каждое измерение также провести три раза и определив среднее арифметическое.
10. Результаты всех измерений занести в табл. 2.

Таблица 2.

Положение поршня	Среднее		Крайнее	
	внутри	наружу	внутри	наружу
Усилие трогания, кг				

4.5. Проверка герметичности полостей пневмоцилиндра производится на специальном пульте. Она основана косвенном методе измерения величины утечки из полостей пневмоцилиндра по падению давления воздуха за определенное время из замкнутого объема. Для этого необходимо:

1. Собрать пневматическую схему, представленную на рисунке 2.

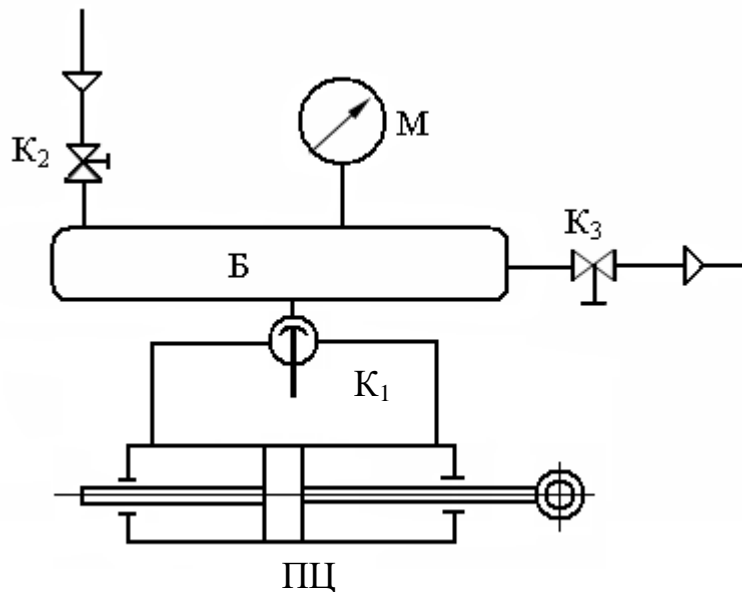


Рисунок 2 - Схема проверки пневмоцилиндра на герметичность
ПЦ – пневмоцилиндр; K_2, K_3 – вентили; М – манометр; K_1 – кран; Б – баллон

2. Закрыть вентили K_2 и K_3 , кран K_1 установить в среднее положение, соответствующее отсутствию воздуха в полостях пневмоцилиндра.
3. Открыть вентиль K_2 и заполнить баллон воздухом до давления 0,6 МПа (примечание: вся шкала манометра 4,0 МПа или 40 кгс/см²).
4. Закрыть вентиль K_2 .
5. Переместить вручную поршень пневмоцилиндра в одно из крайних положений.
6. С помощью крана K_1 подать воздух в полость пневмоцилиндра.
7. После заполнения полости силового цилиндра сжатым воздухом, отметить значение давления в полости пневмоцилиндра и включив секундомер по манометру М определить падение давления в полости пневмоцилиндра за время $t = 60$ сек.
8. Пункты 2–7 повторить для другой полости пневмоцилиндра.
9. Результаты измерений занести в табл. 3.
10. Измерить конструктивные размеры пневмоцилиндра. Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 3.

	Давление до проверки, МПа	Давление через 1 мин, МПа	Δp , МПа	$Q_{ут}$, см ³ /с
1 полость				
2 полость				

Таблица 4.

Результаты измерений конструктивных размеров пневмоцилиндра

№№	Наименование размера	Обозначение	Размерность	Измеренное значение
1.	Диаметр цилиндра	D	м	
2.	Диаметр штока	d	м	
3.	Максимальный ход поршня	X_{max}	м	

11. Рассчитать величину утечки воздуха из полостей по формуле:

$$Q = \frac{\Delta p}{RT} \cdot \frac{V}{t},$$

где Δp —падение давления, Па; $R=287$ Дж/Кмоль·К; $T=300$ К;

V —объем полости, м³; t —время, с.

Объем полости определяется по выражениям:

$$V = V_B + V_{\Pi},$$

где $V_B = 3 \cdot 10^{-3}$ м³,

$$V_{\Pi} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) X_{max},$$

12. Результаты расчета занести в табл. 3.

6. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название, цель и задачи работы;
- методики экспериментальных исследований;
- таблицы 1,2,3,4, с результатами измерений и расчетов.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем вызвана и на что влияет утечка воздуха?
2. Для чего определяют усилие трогания и на что оно влияет?
3. Для чего необходимо согласовывать геометрическое положение поршня с сигналом ПОС?
4. В чем состоит методика определения усилия трогания, какое оборудование необходимо для ее проведения?
5. В чем состоит методика определения герметичности полостей цилиндра, какой метод положен в основу и какое оборудование необходимо для ее проведения?

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ НА ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЯХ ГАЗОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью работы является проведение экспериментальных исследований и получение зависимости силы сухого трения от давления на подвижных соединениях типа «поршень с резиновой манжетой–цилиндр» газовых регуляторов давления.

Задачами работы являются: изучение метода косвенных измерений силы трения на подвижных частях регуляторов давления и проведение экспериментальных исследований с целью получения зависимости силы трения от выходного давления.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время газовые регуляторы давления (ГРД) находят широкое применение в системах подготовки воздуха пневматических роботов. Регулятор давления представляет собой систему автоматического регулирования давления и расхода газа, и предназначен для снижения и поддержания требуемого выходного давления при изменении расхода и входного давления.

Одним из наиболее важных параметров газовых регуляторов давления, оказывающих влияние на его статические и динамические характеристики, является сила трения на подвижных звеньях ГРД.

Величина силы трения зависит от многих параметров и факторов: входного и выходного давлений, температуры, наличия смазки, времени выстоя, наработки и др.

Получение аналитических зависимостей силы сухого трения от перечисленных факторов представляет значительные трудности. Одним из путей определения величины силы сухого трения является проведение статистических экспериментальных исследований на партии изделий. Проведение экспериментальных исследований требует наличия методики определения силы сухого трения. Учитывая большой объем измерений, методика должна отвечать следующим требованиям:

- быть простой и иметь небольшой промежуток времени получения данных;
- проводить измерения в реальных условиях работы изделия без доработки его конструкции.

Существуют различные способы определения силы трения. Рассмотрим некоторые из них:

Существует способ измерения силы сухого трения в ГРД, основанный на принудительном перемещении подвижных частей изделий с по-

мощью специального приспособления и определения силы сухого трения по величине недохода подвижных частей ГРД.

Способ имеет следующие недостатки:

- необходимость доработки конструкции ГРД;
- применение специальных приспособлений для измерения необходимых параметров.

Существует также способ измерения силы сухого трения на подвижных звеньях ГРД с использованием метода косвенных измерений. Сущность способа измерения сводится к снятию статической характеристики газовых регуляторов давления с помощью средств измерения давления во всем диапазоне рабочего входного давления при повышении и понижении его и по величине разности выходного давления ГРД с учетом конструктивных параметров изделия определяется сила сухого трения на подвижных звеньях ГРД.

Самой прогрессивной в настоящее время является методика измерения силы сухого трения, сущность которого состоит в перемещении подвижных звеньев ГРД в различных направлениях вращением настроечного винта изделия и определения, с помощью средств измерения линейных перемещений, разности координат поршня, при движении подвижных частей сверху вниз и снизу вверх /1/.

Величина силы сухого трения рассчитывается по зависимости:

$$F_{тр.} = 0,5 |\Delta X_{cp}| \eta_{\Sigma} \quad (1)$$

где ΔX_{cp} – разность координат поршня при движении подвижных частей в различных направлениях; η_{Σ} – суммарная жесткость упругих элементов.

Эта методика определения силы сухого трения на подвижных звеньях газовых регуляторов давления позволяет быстро и с достаточной точностью получать экспериментальные данные в реальных условиях без доработки конструкции изделия.

В методике используется схема пневматического стенда, приведенная на рисунке 1.

Предлагаемый способ измерения силы сухого трения на подвижных звеньях ГРД позволяет существенно повысить точность измерения за счет определения координаты подвижных частей изделия не в динамическом, а в статическом режиме при помощи индикатора линейных перемещений с ценой деления до 0,001мм. Кроме того, его реализация может производиться одним испытателем, и не требует предварительного измерения большого числа параметров изделия (необходимо знать только суммарную жесткость упругих элементов).

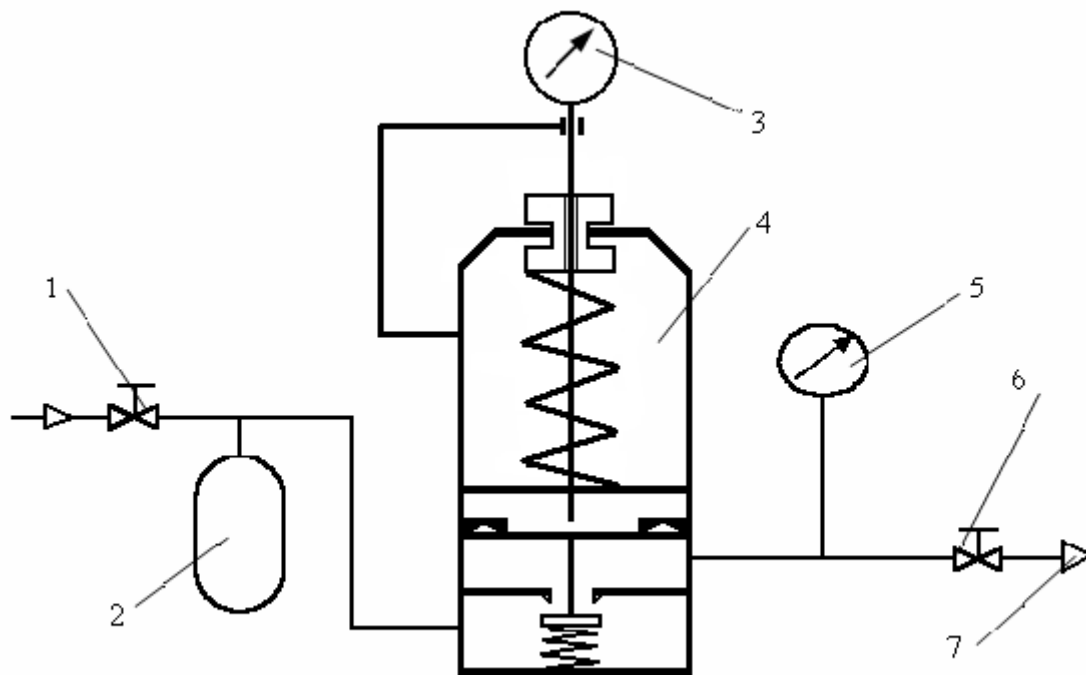


Рисунок 1 - Схема экспериментального определения силы трения на подвижных частях ГРД

1,6 – вентили; 2 – ёмкость; 3 – индикатор; 4 – регулятор давления; 5 – образцовый манометр; 7 – дроссельная шайба

3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Объектом исследования настоящей работы является газовый регулятор давления АР-004 системы автоматического регулирования давления и расхода газа, предназначенный для снижения и поддержания требуемого выходного давления при изменении расхода и входного давления.

Для проведения экспериментальных исследований необходим сжатый воздух до давления 0,6 МПа.

Для испытаний газового регулятора давления используется следующее оборудование и инструменты:

- стенд, состоящий из схемы испытаний, образцового манометра, вентиля, трубопровод и крепления регулятора давления;
- приспособление для измерения координаты подвижных частей регулятора с индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм;
- отвёртка.

4. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

1. Ознакомится с методикой определения силы сухого трения на подвижных частях газовых регуляторов давления.

2. Определить силу сухого трения на подвижных частях газового регулятора давления АР-004.
3. Построить графическую зависимость силы сухого трения на подвижных частях ГРД от выходного давления.
4. Провести анализ результатов измерения и сделать выводы.
5. Ответить на контрольные вопросы и оформить отчёт.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Определение силы сухого трения на подвижных частях газового регулятора давления АР-004 проводится на стенде (рисунок 1).

Для этого необходимо.

1. Исходное состояние схемы: вентили 1 и 6 закрыты.
2. Открыть вентиль 1 и установить выходное давление, равное 0,2 МПа (15 дел.). Вентиль 1 закрыть.
3. Настроить индикатор на середину шкалы грубого отсчета при помощи регулировочного винта регулятора давления.
4. Открыть вентиль 6 и понизить выходное давление до 0,13 МПа (10 дел.). Вентиль 6 закрыть.
5. Открыть вентиль 1 и медленно, без остановок, повысить выходное давление до 0,2 МПа (15 дел.) и снять показания индикатора X_1 .
6. При помощи вентиля 1 установить выходное давление 0,27 МПа (20 дел.). Вентиль 1 закрыть.
7. Открыть вентиль 6 и медленно, без остановок, понизить выходное давление до 0,2 МПа (15 дел.) и снять показания индикатора X_2 .
8. Повторить пункты 2–7 для давления 0,2 МПа три раза. Результаты измерений занести в табл. 1.
9. Провести аналогичные действия для давления 0,4 МПа (30 дел.). Нижнее и верхнее отклонения давления будут соответствовать 0,33 МПа (25 дел.) и 0,47 МПа (35 дел.).
10. Провести аналогичные действия для давления 0,6 МПа (45 дел.). Нижнее и верхнее отклонения давлений будут соответствовать 0,53 МПа (40 дел.) и 0,47 МПа (50 дел.).
11. Определить разность координат поршня $\Delta X = X_1 - X_2$ для каждого значения выходного давления и определить ΔX_{cp} . Занести полученный результат в табл. 1.
12. Подставить полученное ΔX_{cp} и η_{Σ} в формулу (1) и определить силу сухого трения на подвижных звеньях регулятора давления при настройке его на определённое выходное давление.
13. Построить графическую зависимость $F_{TP} = f(P_{BIX})$.
14. Провести анализ результатов и сделать выводы.

Таблица 1.

$P_{\text{вых}}, \text{ МПа}$	$X_1, \text{ мм}$	$X_2, \text{ мм}$	$\Delta X, \text{ мм}$	$\Delta X_{cp}, \text{ мм}$	$\eta_{\Sigma}, \text{ Н/мм}$	$F_{тр}, \text{ Н}$
0,2					300	
0,4					300	
0,6					300	

6. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

1. Отчет о лабораторной работе должен содержать:
2. Название, цель и задачи работы.
3. Схему измерения силы сухого трения на подвижных частях ГРД.
4. Заполненную табл. 1.
5. График зависимости силы трения от давления.
6. Выводы по работе.

7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие методики измерения силы сухого трения ГРД существуют в настоящее время, на чём они основаны?
2. Какие особенности имеет рассмотренная в работе методика, в чём её достоинства и недостатки?
3. Как зависит сила сухого трения ГРД от выходного давления, чем объясняется характер такой зависимости?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С. 197409 (СССР). С.К. Тусюк, И.В. Могильников, В.П. Артёмов, Е.М. Халатов.
2. Сборочный чертёж. Редуктор давления АР–004.–Ковров: КБ «Арматура», 1968. – 38с.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ ПОЛНОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение метода планирования эксперимента для решения интерполяционных задач, приобретение практических навыков в построении плана полнофакторного эксперимента, проведение эксперимента, обработки опытных данных и получении уравнения регрессии исследуемого объекта.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При проведении научных исследований зачастую необходимо решение интерполяционных задач, состоящих в построении математической модели объекта или процесса, т.е. в определении экспериментальной зависимости между характеристикой и параметрами или факторами, влияющими на объект или процесс.

Решение названной задачи может производиться методом планирования эксперимента, состоящем в определении оптимального числа и последовательности проведения опытов, выборе методов математической обработки результатов и построении уравнения регрессии объекта или процесса в виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где y – параметр оптимизации; x_i – переменные факторы; b_i , b_{ij} – коэффициенты регрессии.

Метод планирования эксперимента предполагает варьирование одновременно всех переменных факторов, влияющих на объект или процесс, задавая различные уровни этих факторов из области их определения. Интервалом варьирования фактора называется число (своё для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню даёт верхний уровень фактора, а вычитание – нижний. Интервал варьирования не может быть меньше ошибки, в которой фиксируется уровень фактора, а также он не должен быть настолько большим, чтобы верхний и нижний уровень выходили за область определения фактора. Обычно значение интервала варьирования принимается равным 10% от величины области определения фактора.

При построении плана эксперимента используется кодировка уровней факторов по выражению:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

где \tilde{x}_i – натуральное значение i -го фактора; \tilde{x}_{i0} – натуральное значение основного уровня i -го фактора; ε_i – интервал варьирования i -го фактора; x_i – кодированное значение i -го фактора.

Если число факторов известно и планирование производится на двух уровнях, то число опытов, необходимое для реализации всех возможных комбинаций уровней факторов, определяется по выражению:

$$n=2^k, \quad (3)$$

где k – число факторов; n – число опытов.

Факторный элемент осуществляется с помощью матрицы планирования, в которой используются кодированные значения факторов. Расширенная матрица планирования для двух факторов имеет вид (табл.1)

Таблица 1.

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	Функция отклика.
1	+	+	+	+	y_1
2	+	–	+	–	y_2
3	+	+	–	–	y_3
4	+	–	–	+	y_4

В матрице планирования столбцы x_1 и x_2 задают условия проведения опытов, столбец $x_1 x_2$ оценивают взаимодействие факторов, столбец x_0 – необходим для определения свободного члена уравнения (1), последний столбец содержит результаты опытов (функция отклика).

При построении матрицы планирования полнофакторного эксперимента для различного числа факторов можно воспользоваться следующим приемом: в первом столбце фактора знаки меняются поочередно, во втором – чередуются через два в третьем – через четыре, в четвертом – через восемь и т.д.

После составления плана переходят непосредственно к эксперименту. Для исключения систематических ошибок опыты, предусмотренные матрицей, проводят в случайной последовательности. Порядок проведения опытов выбирается по таблице случайных чисел, распределенных по равновероятному закону (табл.2).

Таблица 2.

Фрагмент таблицы случайных чисел.

87	63	88	23	62	51	07	69	59	02	89	49	14	98	53	41	92	36
07	76	85	37	84	37	47	32	25	21	15	08	82	34	57	57	35	22
03	33	48	84	37	37	29	38	37	89	76	25	09	69	44	61	88	23
13	01	59	47	64	04	99	59	96	20	30	87	31	33	69	45	58	48
10	83	48	94	44	08	67	79	41	61	41	15	60	11	88	83	24	82
24	07	78	61	89	42	58	88	22	16	13	24	40	09	00	65	46	38
61	12	90	62	41	11	59	85	18	42	61	29	88	76	04	21	80	78
27	84	05	99	85	75	67	80	05	57	05	71	70	21	31	99	99	06
96	53	99	25	13	63												

Для плана, приведенного в таблице 1, такой порядок будет (табл.3).

Таблица 3.

Номер опыта в плане	1	2	3	4
Порядок реализации опытов	3	1	2	4

Для компенсации влияния случайных погрешностей каждый опыт дублируется, т.е. повторяется l раз (обычно $l = 2 \div 5$).

Таким образом, проводя по табл.3 опыты, получают l значений функции отклика для каждой строки плана. Обработка результатов эксперимента зависит от варианта дублирования опытов. При равномерном дублировании опытов, когда число параллельных опытов для каждой строки плана одинаково, определяют среднее значение функции отклика \bar{y}_j по формуле:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{l} \sum_{u=1}^l y_{ju}, \quad (4)$$

где: u - номер параллельного опыта.

Далее определяется дисперсия d_j и среднеквадратическая ошибка S_j опыта по выражениям:

$$d_j = \frac{1}{l-1} \sum_{u=1}^l (y_{ju} - \bar{y}_j)^2, \quad (5)$$

$$S_j = \sqrt{d_j}. \quad (6)$$

Для проверки сомнительных, т.е. резковывделяющихся результатов, используются специальные критерии, например отношения U :

$$U_{\max} = \frac{y_{ju \max} - \bar{y}_j}{S_j}, \quad (7)$$

$$U_{\min} = \frac{y_{ju \min} - \bar{y}_j}{S_j}. \quad (8)$$

где $y_{ju \max}$, $y_{ju \min}$ – наибольшее и наименьшее значения функции отклика j -строки плана среди l параллельных опытов.

Полученные значения U_{\max} и U_{\min} сравнивают с величиной взятой из табл. 4 с учетом числа параллельных опытов и принятого уровня значимости α .

Если $U_{\max} > U_{\tau}$, или $U_{\min} > U_{\tau}$, то сомнительный результат необходимо исключить из рассматриваемой выборки, а указанный опыт повторить. Если условия не выполняются, то результат остается в выборке.

Таблица 4.

Объём выборки l	3	4	5	6	7
Предельные значения U при уровне значимости $\alpha=0,05$	1,15	1,46	1,67	1,82	1,94

После вычисления по формуле (5) дисперсий проверяют гипотезу их однородности, используя G – критерий Кохрена, имеющего вид:

$$G_p = \frac{d_{j \max}}{\sum_{j=1}^n d_j}. \quad (9)$$

Дисперсии считаются однородными, если расчетные значения критерия G_p не превышает табличного значения критерия G_{τ} , которое определяется из табл. 5 в зависимости от числа сравниваемых дисперсий n , числа параллельных опытов l и заданного уровня значимости α .

Значения G – критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Таблица 5.

n	$l-1$				
	1	2	3	4	5
4	0,9065	0,7679	0,6341	0,6287	0,5895
5	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447
8	0,6798	0,5757	0,4377	0,3910	0,3595
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029
16	0,4709	0,3346	0,2753	0,2419	0,2195
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735

Если $G_p > G_b$, то дисперсии неоднородны, это указывает на то, что исследуемая величина y не подчинена нормальному закону распределения, и ее следует заменить другой величиной, подчиняющейся этому закону.

Если дисперсии опытов однородны, то определяется дисперсия воспроизводимости эксперимента по зависимости:

$$d_y = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j. \quad (10)$$

Далее по результатам опытов \bar{y}_j вычисляются коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j, \quad (11)$$

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \bar{y}_j, \quad (12)$$

$$b_{ik} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{kj} \bar{y}_j, \quad (13)$$

где i, k – номера факторов, x_{ij}, x_{kj} – кодированное значение факторов i и k в j -ом опыте.

Вычислив коэффициенты управления регрессии, проверяют их значимость с помощью t – критерия Стьюдента, для чего определяют значение t_p по выражению:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}, \quad (14)$$

где $|b_i|$ – абсолютная величина коэффициента регрессии.

$$S\{b_i\} = \sqrt{d\{b_i\}}, \quad (15)$$

$$d\{b_i\} = \frac{1}{l \cdot n} d_j, \quad (16)$$

где l – число параллельных опытов, n – число опытов в матрице.

Значение t_p сравнивается с табличным t_T (табл. 6), которое определяется для заданного уровня зависимости α и числа степеней свободы f , определяемого по выражению:

$$f = n(l - 1) \quad (17)$$

Значение t – критерия Стьюдента для $\alpha=0,05$

f	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_T	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,30	2,26
f	10	11	12	13	14	15	20	30	40
t_T	2,23	2,2	2,18	2,16	2,14	2,13	2,09	2,04	2,02

Коэффициент считается значимым, если $t_p > t_T$. Если это условие не выполняется, то коэффициент регрессии считается статически незначимым и его можно исключить из уравнения.

После расчета коэффициентов уравнения регрессии и проверки их значимости определяется дисперсия адекватности d_{ag} , которая характеризует рассеяние эмпирических значений параметра оптимизации \bar{Y}_j относительно расчетных значений Y_j^* ,

$$d_{ag} = \frac{l \sum_{j=1}^n (\bar{Y}_j - Y_j^*)^2}{n - (k + 1)} \quad (18)$$

где Y_j^* – значение параметра оптимизации, вычисленное по уравнению регрессии для условий j – го опыта; k – число факторов.

После этого проводится проверка гипотезы адекватности найденной модели, которая выполняется по критерию Фишера, для чего находится расчетное значение критерия F_p по выражению:

$$F_p = \frac{d_{ag}}{d_y} \quad (19)$$

Если расчетное значение F_p меньше табличного F_T (табл. 7), для принятого уровня значимости α и соответствующего числа степеней свободы $f_1 = n - (k + 1)$ и $f_2 = l - 1$, то модель считается адекватной, т.е. отражающей реальное влияние факторов на параметр оптимизации.

При $F_p > F_T$ гипотеза адекватности отвергается. В этом случае для получения адекватной модели принимают одно из решений:

1. Переходят к составлению планов второго или более высокого порядка.

2. Уменьшают интервал варьирования и ставят новый эксперимент. Указанные действия повторяют до получения адекватной модели. Следует заметить, что незначимость некоторых коэффициентов может получаться, во-первых, вследствие неудачно выбранных интервалов варьирования, во-вторых, из-за включения факторов, не влияющих на параметр оптимизации, в-третьих, из-за большой ошибки опытов.

Значения F – критерия Фишера при $\alpha=0,05$

Таблица 7.

Число степеней свободы f_2	Значения критерия при числе степеней f_1							
	1	2	3	4	5	6	12	24
1	164,4	144,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	196,4	19,4
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5

Принятие решения в данной ситуации зависит от того, какая из трех причин выбрана. Если принята первая, то изменяют интервалы варьирования по незначимым факторам и ставят новую серию опытов. Если принята вторая, не влияющие факторы стабилизируют и исключают из опытов. Однако увеличение числа опытов в свою очередь приводит к уменьшению дисперсии коэффициентов, в результате чего все или часть коэффициентов могут оказаться значимыми.

Возможен такой случай, когда все коэффициенты, кроме b_0 незначимы, а модель адекватна. Это возникает чаще всего из-за слишком узких интервалов варьирования или вследствие слишком большой ошибки опытов. Здесь возможны два выхода:

1. Расширение интервалов варьирования.
2. Повышение точности экспериментов путем совершенствования методики проведения опытов и увеличения числа параллельных опытов.

Наконец после получения уравнения регрессии в кодированных значениях переменных x_i , необходимо преобразовать его в уравнение с натуральными значениями факторов \tilde{x}_i . Для этого вместо x_i в уравнение подставляют их значения, согласно преобразованию (2).

Таким образом, обработка результатов эксперимента при равномерном дублировании опытов можно представить следующей схемой:

1. Для каждой строки матрицы планирования по формуле (4) вычисляется среднее арифметическое значение \bar{y}_j параметра оптимизации.
2. По формуле (5) определяют дисперсию d_j каждого опыта матрицы планирования.
3. По отношению U проверяются резковыделяющиеся результаты.
4. Используя G –критерий Кохрена, проверяют гипотезу однородности дисперсии d_j опытов.

5. Если дисперсии опытов однородны, то по формуле (10), вычисляют дисперсию воспроизводимости d_j опытов.

6. По выражениям (11)-(13) определяют коэффициенты уравнения регрессии.

7. По выражению (16) находят дисперсию коэффициентов $d\{b_i\}$.

8. По формуле (14) определяют расчетное значение критерия Стьюдента и проверяют статистическую значимость коэффициентов регрессии.

9. По выражению (18) определяют дисперсию адекватности.

10. С помощью F критерия Фишера проверяют гипотезу адекватности модели.

11. С использованием выражения (2) представляют уравнение регрессии в натуральных значениях факторов.

3. ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по организации, проведению и обработки результатов полнофакторного эксперимента.

2. Получить от преподавателя объект исследования, установив параметр оптимизации и влияющие на него факторы.

3. Установить области определения и интервалы варьирования факторов в зависимости от точности регистрирующей аппаратуры.

4. Составить расширенную матрицу планирования эксперимента.

5. Установить порядок проведения опытов и число параллельных опытов.

6. Провести эксперимент и получить значение функции отклика.

7. Провести обработку и анализ полученных результатов.

8. Получить и провести анализ уравнения регрессии объекта в натуральных значениях факторов.

9. Ответить на контрольные вопросы и оформить отчет.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен содержать.

1. Постановку задачи исследования.

2. Описание объекта исследования, параметр оптимизации и факторы, влияющие на него.

3. Расширенную матрицу планирования эксперимента.

4. Результаты эксперимента и их анализ.

5. Уравнение регрессии объекта исследования в кодированных и натуральных значениях факторов.

6. Анализ уравнения регрессии объекта.

7. Ответы на вопросы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как осуществляется выбор интервала варьирования фактора? Его допустимые максимальные и минимальные значения.
2. Какими свойствами обладает матрица планирования?
3. Каким образом формируется матрица планирования при добавлении нового фактора?
4. От чего зависит число уравнений факторов?
5. Что необходимо сделать, если дисперсии опытов не однородна?
6. Что означает статистически значимый и незначимый коэффициенты уравнения регрессии?
7. Что необходимо делать, если модель неадекватна по критерию Фишера?
8. Что такое уровень значимости, число степеней свободы?
9. Какой физический смысл имеет уравнение регрессии объекта в натуральных значениях факторов? Как его использовать в работе?

6. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы научных исследований. Учеб./В.И. Крутов, А.И. Мамай, В.В. Попов и др. – М.: Высшая школа, 1988.
2. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. - М.: Машиностроение, 1981.-184с.

Практическое занятие № 6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью работы является изучение методик экспериментальных исследований и испытаний электромагнитных преобразователей пневмораспределителей систем управления промышленных роботов.

Задачами работы являются проверка качества сборки электромагнитного преобразователя и при необходимости регулирование углов отклонения ротора и осевого зазора, проверка магнитной системы, построение статистической характеристики.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электромагнитные преобразователи (ЭМП) предназначены для преобразования электрического сигнала управления в механическое перемещение – поворот якоря на угол α , пропорциональный току управления J и применяются в пневмораспределителях типа «сопло- заслонка» или «струйная трубка» систем непрерывного управления промышленных роботов.

Угол поворота якоря ЭМП прямо пропорционален ампер-виткам подмагничивающей и управляющей обмоток и обратно пропорционален величинам воздушных зазоров в цепи магнитопровода. Зона нечувствительности зависит от величин момента трения якоря в опорах. Угол поворота и зона нечувствительности обратно пропорциональна жесткости магнитной пружины, которая зависит от числа ампер-витков подмагничивающей обмотки, магнитной проницаемости магнитопровода и величины рассеяния магнитной энергии. Неравенство воздушных зазоров между якорем и полюсами, электрическая или магнитная асимметрия управляющих обмоток приводит к смещению характеристики относительно начала координат.

Основными сборочными единицами преобразователя являются ротор с подшипниками, магнитопровод с обмотками подмагничивания и управления, крышки с клеммными колодками. При сборке изделия необходимо обеспечить требуемые по чертежу величины воздушных зазоров между якорем и полюсами, минимальные зазоры и потери на трение в опорах вала и якоря.

В преобразователях симметричной конструкции величину воздушных зазоров достигают точной обработкой комплекта полюсов и последующей селективной сборкой с якорем. Подшипники на вал якоря устанавливают с натягами, соответствующими посадке седьмого качества точно-

сти. При больших натягах резко возрастают потери на трение. При сборке якоря с крышками осевой зазор регулируют либо подбором прокладок, либо с помощью регулировочного винта. Для того, чтобы управляющие обмотки одного преобразователя были одинаковыми, их намагничивают из провода одной бухты и подбирают по величине омического сопротивления. Катушки размещают на полюсах так, чтобы положение каждой из обмоток относительно магнитопровода было одинаковым.

Собранные преобразователи проверяют по качеству механических и электрических соединений и по параметрам характеристик. Для проверки и испытаний электромагнитов применяются специальные контрольные стенды и приспособления. Электрическая схема одного из них приведена на рисунке 1.

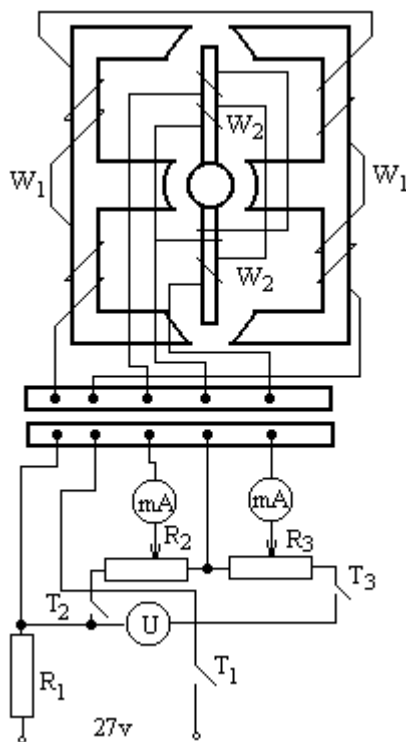


Рисунок 1 - Электрическая схема стенда для испытаний ЭМП:

R_1, R_2, R_3 – потенциометры; mA – миллиамперметры; T_1, T_2, T_3 – тумблеры; W_1 – обмотки подмагничивания; W_2 – обмотки управления.

Для измерения угла поворота якоря применяют автоколлимационный метод, состоящий в отражении луча света от проектора на экран с угловыми делениями при помощи зеркала, установленного на валу якоря ЭМП.

Изменяя с помощью потенциометров токи в управляющих обмотках, получают характеристику, вида $\alpha = f(J)$. Анализируя вид этой характеристик, оценивают качество магнитной системы электромагнитного преобразователя, определяют гистерезис, статический коэффициент усиления, линейность характеристики и т.д.

3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТЫ

Объектом исследования настоящей работы является ЭМП пневмораспределителя типа «струйная трубка».

Для проведения лабораторной работы рабочее место должно иметь:
постоянное напряжение 27 ± 1 В
переменное напряжение 220 ± 10 В, 50 Гц

Для экспериментальных исследований и испытаний ЭМП используется следующее оборудование и инструменты:

- стенд оптический, состоящий из проектора, цангового зажима с поворотным устройством и экрана со шкалой, проградуированной в градусах;
- приспособление для измерения осевого люфта с индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм;
- приспособление для измерения крутящего момента;
- электрический пульт питания электромагнита;
- отвертка;
- специальный ключ для регулировки эксцентриковых упоров.

4. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

4.1. Ознакомиться с методиками экспериментальных исследований, регулирования и испытаний ЭМП с помощью специального оборудования.

4.2. Провести экспериментальные исследования и испытания ЭМП по проверке максимальных углов отклонения ротора, магнитной системы электромагнита, осевого люфта, крутящего момента.

4.3. Сопоставить результаты проверок с требованиями технических условий на изделие и при необходимости провести регулирование электромагнитного преобразователя.

4.4. Построить график статической характеристики электромагнитного преобразователя.

4.5. Провести анализ вида статической характеристики, по которой определить статический коэффициент передачи, величину зоны неоднозначности, линейность характеристики, ток ограничения.

4.6. Определить усилие, прилагаемое к оси электромагнита при проверке осевого люфта.

4.7. Определить жесткость магнитной пружины электромагнита.

4.8. Ответить на контрольные вопросы.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Экспериментальное определение и регулирование максимальных углов отклонения ротора ЭМП.

Определение и регулирование максимальных углов отклонения ротора электромагнита проводится на оптическом стенде, вид которого представлен на рисунке 2.

Для этого необходимо:

электромагнит установить и закрепить в цанговом зажиме оптического стенда;

на роторе электромагнита установить зеркало, на которое направляется луч от проектора;

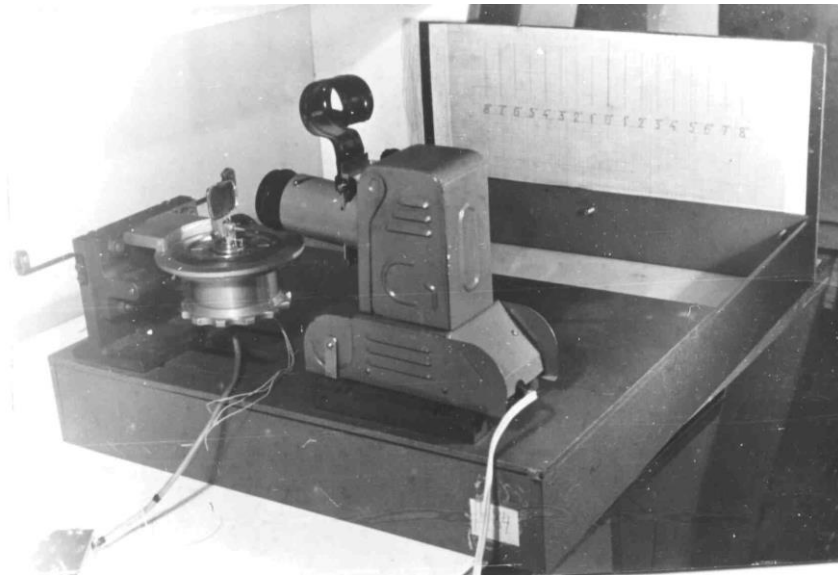


Рисунок 2 - Оптический стенд

направить отраженный луч от проектора на экран со шкалой, проградуированной в градусах;

подключить электромагнит с помощью шнура с разъемом к электрическому пульту;

выключить на электрическом пульте тумблеры T_1 , T_2 , T_3 , и потенциометры R_1 , R_2 , R_3 установить в крайнее левое положение;

подать постоянное напряжение 27В на электрический пульт;

включить тумблер T_1 пульта и с помощью потенциометра R_1 установить по вольтметру 27 ± 2 В;

с помощью винта на цанговом зажиме повернуть электромагнит так, чтобы совместить риску отраженного света с нулевым делением шкалы стенда;

выключить тумблер T_1 ;

поворачивая вручную ротор электромагнита до упора в одну и другую стороны относительно нулевого положения измерить величины максимальных углов поворота ротора, значения которых занести в табл. 1;

сопоставить значения углов поворота с требованиями технических условий; максимальный угол отклонения ротора должен быть в пре-

делах (3,2–3,4) град., разность между углами поворота в обе стороны не должна превышать 0,2 град.;

при невыполнении технических условий провести регулирование с помощью специального ключа, поворачивая эксцентриковые упоры.

5.2. Проверка магнитной системы ЭМП.

Проверка магнитной системы электромагнита проводится на оптическом стенде спустя 3 минуты после подачи напряжения питания на обмотку подмагничивания и состоит в определении остаточного угла и снятии статической характеристики.

Таблица 1.

Максимальные углы поворота ротора, град		$\alpha_{1 \text{ макс}}$	$\alpha_{2 \text{ макс}}$	$ \alpha_1 - \alpha_2 $
Величины токов в обмотках управления, мА		Отклонение ротора электромагнита, град		Разность токов, мА
1 Обмотка	2 Обмотка			
50		+3		
150	150			0
	50	-3		
150	150			0

Для определения остаточного угла необходимо:

собрать схему, аналогичную проверке максимальных углов отклонения ротора;

включить тумблер T_1 и потенциометром R_1 установить 27 ± 2 В по вольтметру пульты;

совместить риску отраженного луча с нулевым делением шкалы стенда путем поворота корпуса электромагнита вокруг вертикальной оси;

включить тумблеры T_2 и T_3 и потенциометром R_2 по миллиамперметру электрического пульты плавно подать ток $J_1 = 50$ мА в первую катушку управления;

потенциометром плавно подать ток во вторую катушку управления до тех пор, пока проекция нити не установится на отметке 3° шкалы стенда, показания величины тока во второй катушке занести в табл.1.

уменьшить ток во второй катушке до 150 мА с помощью потенциометра R_3 , а в первой катушке увеличить ток до 150 мА потенциометром R_2 ;

измерить при этих токах величину остаточного угла, как величину не доходя отраженного угла до нулевого деления шкалы с одной стороны и занести это значение в табл.1

во второй катушке плавно уменьшить ток до 50 мА, а в первой увеличивать до тех пор, пока проекция нити не остановится на отметке 3° по шкале оптического стенда с другой стороны; показания величины тока в первой катушке занести в табл.1;

потенциометром R_2 уменьшить ток в первой катушке до 150 мА, а потенциометром R_3 увеличить ток во второй катушке до 150 мА;

измерить при этих токах управления величины остаточного угла с другой стороны и занести это значение в табл.1;

определить разность значений токов в катушках управления при установке проекции нити на отметке 3° с одной и с другой стороны;

сопоставить значение разности токов и остаточных с требованиями технических условий: разность токов не должна превышать 100 мА, а остаточный угол должен быть не более $0,2^\circ$.

Статическую характеристику электромагнита снимают в последовательности:

потенциометром R_2 устанавливают ток 50 мА в первой катушке управления;

потенциометром плавно с интервалом в 50 мА увеличивают ток во второй катушке от 0 до 350 мА, фиксируя значения углов отклонения ротора по шкале стенда, которые заносятся в табл. 2.

Таблица 2.

Ток в 1 обмотке, мА	50								0	50	100	150	200	250	300	350
Ток во 2 обмотке, мА	0	50	100	150	200	250	300	350	50							
Разность токов																
Угол отклонения ротора, град																

потенциометры R_2 и R_3 выводят в крайнее левое положение;

потенциометром R_3 устанавливают ток 50 мА во второй катушке;

потенциометром R_2 плавно с интервалом в 50 мА увеличивают ток в первой катушке от 0 до 350 мА, фиксируя значения углов отклонения ротора по шкале стенда, которые заносятся в табл.2;

После снятия статической характеристики надо выключить тумблеры T_1 , T_2 , T_3 и вывести ручки потенциометров R_1 , R_2 , R_3 в крайнее левое положение.

Примечание: при снятии статической характеристики недопустимы даже кратковременные уменьшения тока при увеличении его от 0 до 350 мА в обмотках управления.

5.3. Определение и регулирование осевого люфта ротора ЭМП

Определение и регулирование осевого люфта ротора электромагнита проводится в специальном приспособлении, вид которого представлен на рисунке 3.

Методика основана на приложении знакопеременного усилия к оси ротора и измерении при этом его перемещений индикатором часового типа.

Для этого необходимо:

установить и закрепить электромагнит в приспособлении;

подвести индикатор к оси ротора и закрепить его;

проложить осевое усилие, перемещая груз в 0,4 Н по рамке в крайнее правое положение;

по индикатору зафиксировать перемещение ротора;

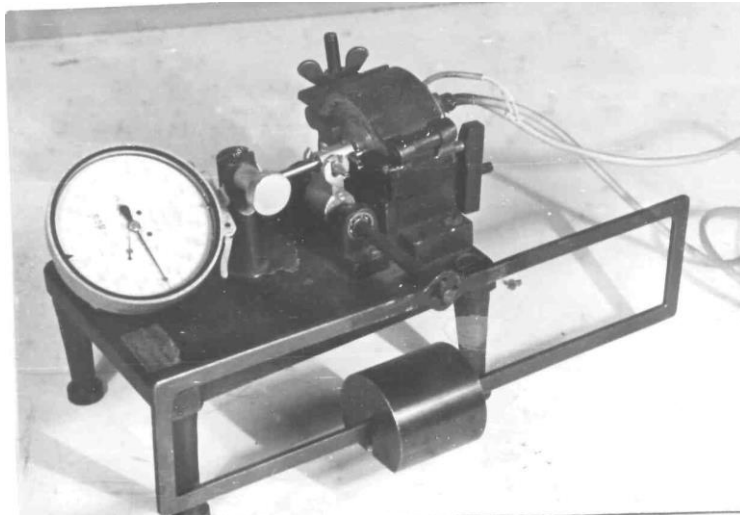


Рисунок 3 - Приспособление для определения осевого люфта ротора ЭМП

проложить осевое усилие другого направления, перемещая груз в 0,4 Н в крайнее левое положение;

по индикатору зафиксировать перемещение ротора;

определить осевой люфт как разность показаний индикатора и занести это значение в табл. 3.

Таблица 3.

Осевой люфт ротора электромагнита, мм	$X_1 =$	$X_2 =$	$ X_1 - X_2 =$
Прилагаемое усилие к ротору при определении люфта, Н	$P =$		

сопоставить значение осевого люфта с требованиями технических условий: осевой люфт должен быть в пределах (0,04 – 0,09) мм;

если значение осевого люфта не удовлетворяет техническим условиям провести регулировку с помощью винта подпятника электромагнита и повторно определить осевой люфт;

рассчитать величину прикладываемого усилия к ротору и занести это значение в табл. 3.

5.4. Определение крутящего момента

Проверка крутящего момента и определение жесткости магнитной пружины электромагнита проводится в приспособлении с использованием электрического пульта, вид которого представлен на рисунке 4.

Порядок проверки следующий:

установить и закрепить электромагнит в приспособлении и подключить с помощью кабеля к электрическому пульта;

к промежуточной втулке ротора с помощью винта прикрепить штангу с грузом;

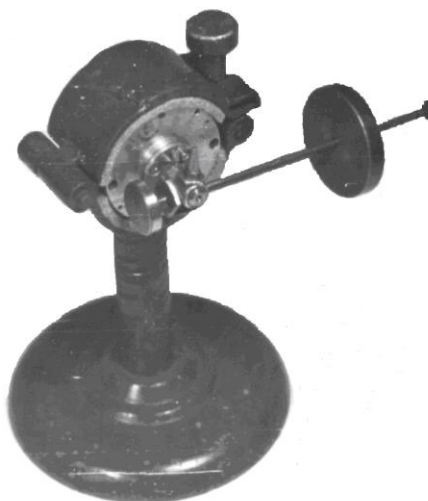


Рисунок 4 - Приспособление для проверки крутящего момента и определения жесткости магнитной пружины ЭМП

включить тумблер T_1 пульта и с помощью потенциометра подать на обмотку подмагничивания напряжение $27 \pm 2В$

перемещая груз по штанге, установить момент, при котором ротор электромагнита ляжет на упор в одну сторону;

по шкале штанги определить крутящий момент с точностью до 50 г/см, который занести в табл.4.

штангу с грузом повернуть на 180° и определить крутящий момент, при котором ротор электромагнита ляжет на упор в другую сторону;

Таблица 4.

Величина крутящего момента Н·см	$M_1 =$	$M_2 =$
Жесткость магнитной пружины Н·см/град	$\eta_1 =$	$\eta_2 =$

определить жесткость пружины электромагнита, как величину крутящего момента, необходимого для поворота ротора на 1° .

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. По каким параметрам проверяется магнитная система электромагнита, что они характеризуют?

6.2. На что влияет осевой люфт электромагнита? В чем суть методики его определения?

6.3. Какой вид регулирования используется при проверке максимальных углов отклонения ротора?

6.4. В чем состоит методика определения крутящего момента? На что влияет жесткость магнитной пружины ЭМП?

Формат бумаги 70x100 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,2

Тираж 30 экз.

Тульский государственный университет
300600, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано на кафедре РТ и АП ТулГУ