Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Лабораторная работа

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Детали машин и основы конструирования»
для студентов направлений

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Энгельс 2024

Введение

Планетарный редуктор — один из классов механических редукторов. Редуктор называется планетарным из-за планетарной передачи, находящейся в редукторе, передающей и преобразующей крутящий момент. Планетарный редуктор может быть с одной или более планетарными передачами. Планетарные редукторы имеют самую большую популярность среди механических редукторов. Она достигается благодаря малым габаритам планетарных редукторов, высокому КПД, большому передаточному числу. Планетарные редукторы благодаря своим достоинствам нашли довольно широкое применение в станкостроении, транспортном машиностроении, приборостроении.

1. Цель работы

Изучить устройство и принцип действия планетарного редуктора, определить его коэффициент полезного действия (к.п.д.), исследовать зависимость к.п.д. от величины нагрузки и частоты вращения.

2. Основные понятия

Основными характеристиками механического редуктора для передачи вращательного движения являются передаваемая им мощность, передаточное отношение и к.п.д. Они характеризуют непроизводительные затраты энергии в передаточном механизме, а также косвенно нагрев и износ передачи.

К планетарным передачам относят передачи с зубчатыми колесами, оси которых совершают вращательное движение.

2.1 Кинематические схемы планетарных редукторов

Наиболее часто употребляемые кинематические схемы планетарных передач показаны на рис. 1 - 4.

Рис. 1. Это наиболее простая и часто применяемая схема. Конструктивно реализуются передаточные отношения $U = \frac{n_{BX}}{n_{BЫX}} = 2{,}8 \div 8.$ Для этой передачи

$$U = \frac{n_{BX}}{n_{BЫX}} = 1 + \frac{z_3}{z_1} \qquad (1)$$

где: z_1 – число зубьев центрального колеса, z_3 – число зубьев неподвижного колеса с внутренним зацеплением.

Выходной вал связан с водилом, к которому крепятся оси сателлитов z_2, совершающих планетарное движение относительно центрального колеса z_1. Ориентировочное значение к.п.д. для одноступенчатого редуктора по схеме рис.1, выбираемое для проектных расчетов равно $\eta = 0{,}96 \div 0{,}98$.

Рис. 2. В данном случае показана схема образования многоступенчатых передач с использованием механизма по рис.1. Во многих подобных передачах числа зубьев центральных колес делают равными, например $z_1 = z_3$, неподвижное колесо с внутренними зубьями получается общим для всех ступеней, сателлиты по числу зубьев и модулю также получаются одинаковыми для всех ступеней. Для того, чтобы зубчатые колеса последней ступени могли передать повышенное значение момента, их делают шире, чем колеса в первой ступени. Такие меры упрощают изготовление и сборку планетарного редуктора.

Для редуктора в соответствии со схемой рис. 2

$$U = U_1 \times U_2 = \frac{n_{BX}}{n_{BЫX}} = (1 + \frac{z_5}{z_1}) \times (1 + \frac{z_5}{z_3}) \qquad (2)$$

Коэффициент полезного действия соответственно вычисляется как для последовательно располагающихся механизмов

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2 = 0{,}92 \div 0{,}96 \qquad (3)$$

Рис. 3. Здесь приведена схема двухрядного планетарного механизма для реализации относительно больших передаточных чисел. Передаточное число механизма согласно рис.3 в случае передачи движения от ведущего колеса z_1 к водилу В равно

$$U = \frac{n_{BX}}{n_{BЫX}} = 1 - \frac{z_2 \times z_4}{z_1 \times z_3} \qquad (4)$$

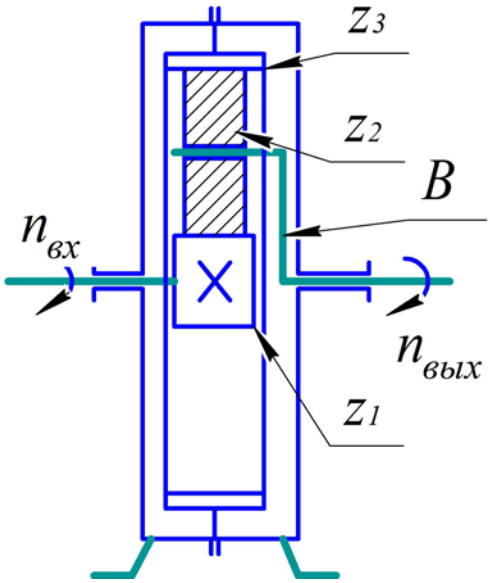

Рис.1

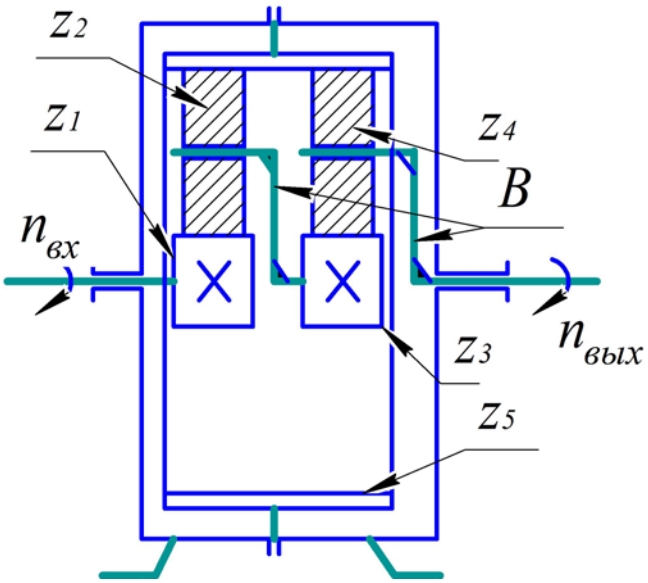

Рис.2

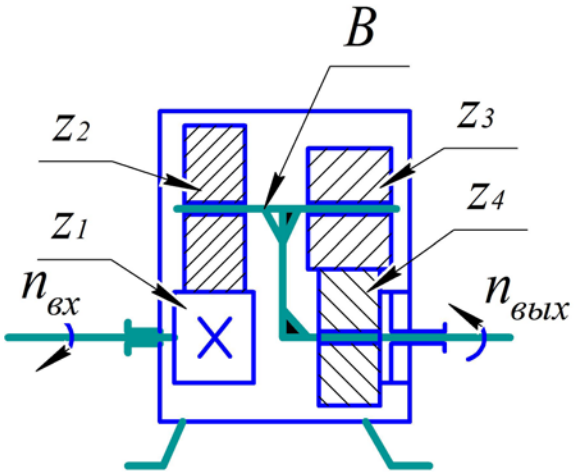

Рис.3

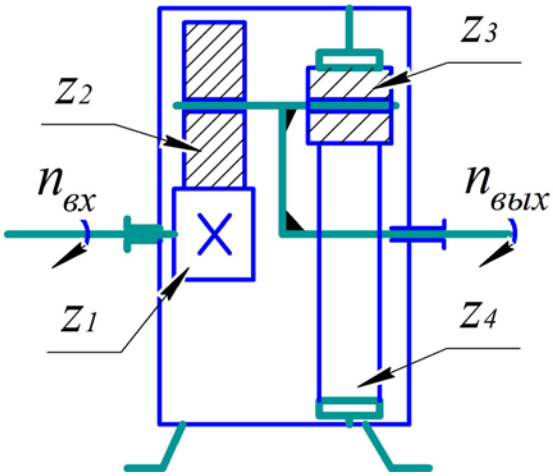

Рис.4

Если передаточное число не превышает $U = 50$, то ориентировочное значение к.п.д. зубчатой передачи лежит в пределах $\eta = 0{,}92 \div 0{,}96$.

При некотором соотношении чисел зубьев колес z_1, z_2, z_3, z_4 можно получить передаточное число непосредственно в данном механизме $U = 10\,000$, но тогда нужно использовать обращенный механизм, в котором ведущим будет, водило, а ведомым колесо z_1. В таком случае передаточное число рассчитывается

$$U = \frac{z_1 \times z_3}{z_1 \times z_3 - z_2 \times z_4} \qquad (5)$$

<u>Пример.</u> Принимаем числа зубьев колес в механизме (рис. 3): $z_1 = z_3 = 100$, $z_2 = 101$, $z_4 = 99$. Рассчитываем передаточное отношение обращенного механизма

$$U = \frac{z_1 \times z_3}{z_1 \times z_3 - z_2 \times z_4} = \frac{100 \times 100}{100 \times 100 - 99 \times 101} = 10000$$

С ростом передаточного числа значительно уменьшается к.п.д. передаточного механизма, поэтому устройства с большим передаточным числом как силовые передачи не применяются. К.п.д. механизма в рассмотренном примере приблизительно равно 0,01. Такие механизмы нашли применение в передачах с ручным приводом, в которых внешняя нагрузка отсутствует, т.е. передача является чисто кинематической.

Рис. 4. Двухрядный планетарный механизм, в котором неподвижное колесо Z4 имеет внутренние зубья. Для проектирования обычно выбирают передаточное число $U \le 16$. Подбор чисел зубьев осуществляют с использованием зависимости для передаточного числа U

$$U = \frac{n_{BX}}{n_{BЫX}} = 1 + \frac{z_2 \times z_4}{z_1 \times z_3} \qquad (6)$$

Для проектировочных расчетов можно принять к.п.д. подобного механизма $\eta = 0{,}96 \div 0{,}98$.

2.2 Устройство и принцип действия лабораторной установки для исследования к.п.д. передачи с планетарным редуктором.

Блок-схема лабораторной установки для исследования к.п.д. передачи с планетарным редуктором при различных условиях работы показана на рис. 5.

2.2.1 Устройство лабораторной установки.

На общем основании 1 размещаются тахометр 2 (прибор для измерения частоты вращения), муфта 3, соединяющая тахометр с электрическим двигателем 5, корпус которого соединяется со стойками корпуса 1 с помощью подшипниковых опор 4, редуктор 6 планетарного типа,

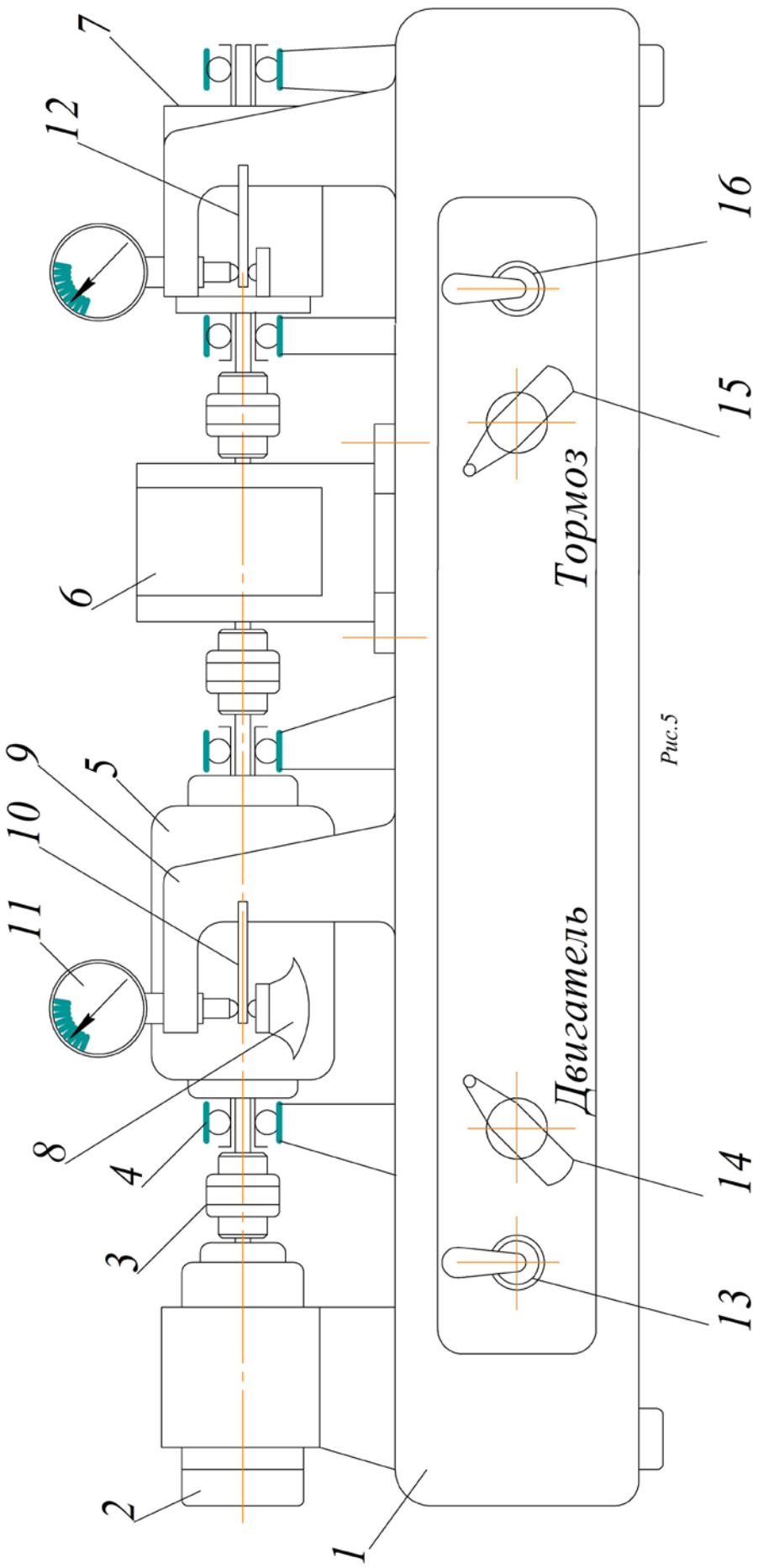

Рис.5

нагрузочное устройство (тормоз) 7. На корпусе двигателя 5 имеется лапка 8, которая касается свободного конца плоской пружины 10, защемленной одним концом в кронштейне 9 корпуса 1. В кронштейне 9 укреплен индикатор 11, с помощью которого измеряется деформация пружины 10. Около тормозного устройства имеется также стойка с индикатором, в которой защемлена плоская пружина 12 большей толщины, чем пружина 10. В качестве нагрузочного устройства 7 применен порошковый электромагнитный тормоз.

Тахометр 2, двигатель 5, планетарный редуктор 6 и нагрузочное устройство 7 соединяются между собой одинаковыми муфтами 3.

В корпусе 1 располагаются системы питания и управления двигателем 5 и тормозом 7. На передней панели корпуса 1 имеются: 13 – выключатель питания двигателя 5; 14 – ручка управления частотой вращения двигателя; 16 – выключатель питания электромагнитного порошкового тормоза 7; 15 – ручка управления и установки требуемого тормозного момента.

2.2.2 Принцип действия установки.

В начале работы ручки управления 14 и 15 соответственно двигателя и тормоза повернуть против часовой стрелки до упора и выключателями 13 и 16 включить питание двигателя и тормоза. Двигатель начнет работать с минимальной частотой вращения, тормозной момент электромагнитного тормоза будет также минимальным. Тахометр 2 покажет частоту вращения двигателя 5.

Двигатель 5 имеет механическую характеристику, зависимую от момента нагрузки, т.е., если ток питания неизменен, то при увеличении момента нагрузки частота вращения двигателя будет уменьшаться, и, наоборот, при уменьшении момента нагрузки частота вращения будет увеличиваться. Электромагнитный порошковый тормоз 7 позволяет плавно менять момент нагрузки механизма за счет изменения величины тока питания при вращении ручки 15.

2.2.3 Устройство и принцип работы узла для измерения вращающего момента

Корпусы двигателя и электромагнитного порошкового тормоза закреплены в кронштейнах корпуса установки на подшипниках качения поз. 4 рис.5 и могут свободно поворачиваться. На корпусах двигателя и тормоза имеются лапки, которые упираются в свободные концы плоских пружин поз. 10 и 12 рис. 5. Другие концы пружин жестко заделаны в кронштейны. Реактивные моменты двигателя и тормоза при работе устройства воспринимаются пружинами. Деформацию пружин, пропорциональную действу-

ющим моментам измеряется индикаторами ИЧ-10 часового типа поз. 11 рис.5. Тарировочная характеристика устройства для измерения вращающих моментов определяется тарировочными коэффициентами:

$K_1 = 1{,}5\times10^{-3}$ (Нм/деление) - для измерителя момента двигателя;

$K_2 = 1\times10^{-2}$ (Нм/деление) - для измерителя момента тормоза.

{*Принимая во внимание, что одно деление шкалы индикатора соответствует 0,01 мм, можно использовать тарировочные коэффициенты несколько в другом виде, например, K_1 = 0,15 (Нм/мм); K_2 = 1,0 (Нм/мм)*}.

Пример. Если при конкретном измерении моментов показание индикатора измерителя момента двигателя $n_1 = 10$, (ρ_1 - *величина деформации пружины, пропорциональная моменту, равна 0,1 мм*) , показание индикатора измерителя момента тормоза $n_2 = 29$ (ρ_2 - *величина деформации пружины, пропорциональная моменту на валу тормоза, равна 0,29 мм*), то момент на валу двигателя

$$T_1 = K_1 \times n_1 = 1{,}5\times10^{-3}\times10 = 1{,}5\times10^{-2}\ \text{Нм},$$

момент на валу тормоза

$$T_2 = K_2 \times n_2 = 1{,}0\times10^{-2}\times29 = 0{,}29\ \text{Нм}$$

Такие же результаты получим, воспользовавшись тарировочными коэффициентами другого вида, т.е.: $T_1 = K_1 \times \rho_1 = 1{,}5\times10^{-2}$ Нм;

$$T_2 = K_2 \times \rho_2 = 0{,}29\ \text{Нм}$$

2.3 Определение к.п.д. передаточного механизма.

При исследовании к.п.д. реально действующего передаточного механизма необходимо учитывать все потери мощности, которые происходят в узлах устройства. При последовательном соединении узлов в передаточном механизме общее к.п.д. η передачи определяется

$$\eta = \frac{N_П}{N_{ДВ}} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \ldots \times \eta_i, \qquad (7)$$

где: η_i - к.п.д. i – го узла механизма передачи,

$N_П$ – полезная мощность (под полезной мощностью по условиям эксперимента понимается мощность тормозного устройства),

$N_{ДВ}$ – мощность двигателя.

Обозначим: T_1 – момент, развиваемый двигателем,

T_2 – тормозной момент,

$n_{ДВ}$ – частота вращения вала двигателя (частота вращения входного вала редуктора),

$n_{ВЫХ}$ – частота вращения выходного вала редуктора и, соответственно, частота вращения вала тормозного устройства, поскольку они связаны между собой соединительной муфтой.

U = 25 – передаточное отношение планетарного редуктора (это его паспортная величина). Здесь $U = \frac{n_{ДВ}}{n_{ВЫХ}}$.

Момент, частота вращения и мощность связаны между собой зависимостью

$$N(Вт) = \frac{T \times (\pi \times n)}{30} \text{ (Нм/сек).} \qquad (8)$$

Соответственно : $N_{ДВ} = \frac{T_1 \times (\pi \times n_{ДВ})}{30}$

$$N_{П} = \frac{T_2 \times (\pi \times n_{ВЫХ})}{30}$$

Используя выражение 7, можно определить к.п.д. передаточного механизма

$$\eta = \frac{N_{П}}{N_{ДВ}} = \frac{T_2 \times (\pi \times n_{ВЫХ})}{T_1 \times n_{ВХ}} = \frac{T_2}{T_1 \times U} \qquad (9)$$

<u>Пример</u>. *Если в соответствии с примером раздела 2.2.3:*
$T_1 = 1{,}5 \times 10^{-2}$ *Нм,* $T_2 = 0{,}29$ *Нм,* $U = 25$.

К.п.д. равно $\eta = \frac{T_2}{T_1 \times U} = \frac{0{,}29}{1{,}5 \times 10^{-2} \times 25} = 0{,}7733$.

Перед началом эксперимента можно ориентировочно определить к.п.д. передаточного механизма, пользуясь рекомендациями по выбору к.п.д. из литературных источников, на основании выражения 7. Для данного механизма общее к.п.д. равно, (потерей мощности для привода тахометра пренебрегаем)

$$\eta = (\eta_M)^3 \times \eta_P \times (\eta_П)^3, \qquad (10)$$

где: η_M = 0,95 – к.п.д. соединительной муфты,

η_P = 0,94 – среднее значение к.п.д. для редукторов подобного типа,

$\eta_П$ = 0,985 – к.п.д. одной пары подшипников.

Подставляем рекомендованные значения к.п.д. в формулу 10 и получаем η = 0,77. Это будет вероятное значение к.п.д. Результаты подсчетов к.п.д. по ходу проведения исследований на данной установке, возможно будут отличаться от этой цифры.

3. Методика эксперимента

Включаем лабораторную установку и устанавливаем минимальное значения частоты вращения двигателя и минимальное значение тормозного момента вращением ручек 14, 15 (рис. 5).

3.1 Определение к.п.д. механизма при постоянной частоте вращения вала двигателя

1) Устанавливаем стрелки индикаторов на ноль.

2) Производим включение и устанавливаем частоту вращения вала двигателя в пределах (800÷1000)об/мин, опираясь на показания тахометра, при некотором небольшом моменте нагрузки, который соответствует холостому ходу механизма.

3) Выбираем шаг прибавления тормозного момента по показаниям индикатора тормоза в пределах (5÷15) делений.

4) Последовательно прибавляем тормозной момент, вращая ручку 15 (рис. 5), согласно выбранного шага по показаниям индикатора, делаем 4÷6 измерений. По условиям пункта 3.1 необходимо поддерживать принятую частоту вращения вала двигателя вращением ручки 14 (рис. 5).

5) Показания обоих индикаторов заносим в таблицу 1, производим расчет моментов T_1 и T_2, получаем ряд значений к.п.д. в зависимости от переменного значения момента T_2 нагрузки и строим график зависимости к.п.д. в координатах T_2 - η. Откладываем к.п.д. η по оси ординат.

Таблица 1

№	1	2	3	4	5	6
n_1(дел.)						
n_2(дел.)						
T_1 Нм						
T_2 Нм						
η						

Примечание. $n_{ДВ}$ = const; n_1, n_2 – показания индикаторов (к-во делений).

3.2 Определение к.п.д. механизма при постоянном моменте нагрузки

1) Стрелки индикаторов установить на ноль.

2) Произвести включение и установить некоторое значение тормозного момента T_2 несколько менее среднего значения при частоте вращения вала двигателя (600÷1000)об/мин.

3) Выбрать шаг изменения частоты вращения двигателя (50÷100)об/мин.

4) Изменяя частоту вращения двигателя сделать (4 – 6) измерений, поддерживая постоянным тормозной момент .

5) Показания индикаторов и тахометра занести в таблицу 2, произвести расчет моментов T_1 и T_2, вычислить к.п.д., построить график зависимости к.п.д. η от частоты вращения вала двигателя.

Таблица 2

№	1	2	3	4	5	6
$n_{ДВ}$ об/мин						
n_1(дел.)						
T_1 Нм						

Примечание. $T_2 = K_2 \times n_2 = const$

4. Методика определения точности измерения линейных величин

При проведении измерений необходимо получить значение измеряемой величины с заданной точностью.

Результат измерения должен быть выражен двумя числами, первое из которых соответствует показанию прибора, а второе – возможному диапазону погрешности, обусловленной классом точности *К* прибора. Различают классы точности *К*: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0, которые указываются на шкале прибора.

В настоящей лабораторной работе проводятся прямые измерения с помощью часового индикатора ИЧ-10, имеющего класс точности *К* = 1,0.

При выполнении данной работы принимается, что измерения текущего значения момента проводятся однократно и случайные погрешности малы, т.е. они не учитываются.

Различают точность прибора и точность измерения определенной величины.

Точность прибора оценивается следующими погрешностями:

абсолютной погрешностью $\pm \Delta = X - Xo$, разность между измеренной прибором величиной X и истинным значением измеряемой величины Xo, под которым может пониматься результат измерения образцовым прибором;

приведенной погрешностью $\Upsilon = \pm (\Delta/Xн)$, здесь Xн – предел измерения прибора.

Точность измерения оценивается относительной погрешностью

$$\delta = \pm\left(\frac{\Delta}{X}\right) \times 100\%, \qquad (11)$$

где δ - предел допускаемой относительной погрешности в % от значения X измеряемой величины.

Зная класс точности прибора *К* можно определить относительную погрешность: $\delta = \pm K \times \left(\frac{X_H}{X}\right)$, так как всегда [X<Xн], то δ > ϒ и потому для повышения точности необходимо, чтобы предел измерения прибора был близок к измеряемому значению.

Результат измерения в общем виде выражается формулой:

$$X = x \pm \delta\% \left(\frac{x}{100}\right) \qquad (12)$$

Приведенной погрешностью оценивается результат только прямых измерений. Результат косвенных измерений следует вычислять по формулам, зависящим от функциональной связи между искомой величиной и величинами, являющимися результатом прямых измерений.

Так при измерении к.п.д. механизма передачи $\eta = \frac{T_2}{T_1 \times U}$.

В этом случае получим

$$\delta_\eta = \frac{\Delta T_2}{T_2} + \frac{\Delta T_1}{T_1} = \delta_{T2} + \delta_{T1}.$$

<u>Пример</u>. Индикатор ИЧ-10 с классом точности *К* = 1,0 показал значение крутящего момента $T_1 = x_1 = 0{,}4$ мм, индикатор тормозного устройства показал $T_2 = x_1 = 0{,}6$ мм, номинальный предел измерения шкалы индикатора Xн = 1 мм. Определим к.п.д. редуктора.

$$\eta = \frac{T_2}{T_1 \times U} \pm \delta_\eta = \frac{x_2 \times K_2}{x_1 \times K_1 \times U} + \delta_\eta.$$

$$\delta_{T1} = K \times \left(\frac{X_H}{x_1}\right)\% = 1{,}0 \times \left(\frac{1{,}0}{0{,}4}\right)\% = 2{,}5\%$$

$$\delta_{T2} = K \times \left(\frac{X_H}{x_2}\right)\% = 1{,}0 \times \left(\frac{1{,}0}{0{,}6}\right)\% = 1{,}65\%$$

$$\delta_\eta = 2{,}5\% + 1{,}65\% = 4{,}15\%$$

$$\eta = \frac{0{,}6 \times 1{,}0}{0{,}4 \times 0{,}1 \times 25} \pm 4{,}15\% = 0{,}4 \pm 4{,}15 \times \frac{0{,}4}{100} = 0{,}4 \pm 0{,}0174.$$

5. Содержание и оформление отчета по работе

Отчет должен содержать:

1. название лабораторной работы;
2. развернутую формулировку цели работы;
3. кинематическую схему установки;
4. необходимые расчетные формулы;
5. результаты исследований в виде таблиц и графиков;
6. расчет точности приведенных результатов.

6. Вопросы для самопроверки

1. Основные кинематические схемы планетарных передач, применяемые в промышленности?
2. Опишите принцип построения лабораторной установки для исследования к.п.д. механических передач?
3. По результатам проведенных испытаний дайте анализ влияния нагрузочного момента и передаваемой скорости на к.п.д. механической передачи.
4. Дайте характеристику изучаемого редуктора с точки зрения к.п.д.
5. Опишите метод измерения крутящих моментов, используемый в лабораторной установке.
6. Какие классы точности измерительных приборов существуют в промышленности?
7. Какой класс точности имеет индикатор ИЧ-10?
8. Как вычисляется погрешность измерения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов М.Н. Детали машин: учебник для машиностроительных специальностей вузов /М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. – 9-е изд., испр. – М.: Высш. Шк., 2005. – 408 с.: ил. 21 см.
2. Иванов М.Н. Детали машин: Учебн. Для втузов/ Под ред. В.А. Финогенова, - 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1998. – 383 с.
3. Колокольцев В.А. Основы применения конечных элементов в расчетах деталей машин: Учебн. Пособие по курсу Детали машин для студентов машиностроительных спец. / В.А. Колокольцев: Сарат. гос. техн. ун-т. – Саратов: СГТУ, 2003. – 84 с.; 21 см.
4. Курмаз Л.В. Детали машин. Проектирование: справочное учебно-методическое пособие / Л.В. Курмаз, А.Т. Скобейда, - 2-е изд., исправ. – М.: Высшая школа 2005. – 309 с.: ил. 21 см.
5. Расчет деталей машин на ЭВМ / Под ред. Н.Д. Решетова: Уч. пос. для вузов. – М.: Высш. шк., 1985, - 368 с.

6. Тимофеев С.И. Детали машин: учеб. пособие /С.И. Тимофеев, - Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 416 с.; 21 см.

ВРЕМЯ, ОТВЕДЕННОЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Подготовка к работе	0,75 акад. ч.
Выполнение работы	0,5 акад. ч.
Обработка результатов эксперимента и оформление отчета	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА

Руководство к лабораторной работе по курсу «Детали машин и основы конструирования»

Составили: ПОТЕХИНА Лариса Николаевна
САВРАСОВ Генрих Андреевич