УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

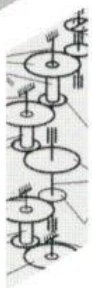
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРНЫХ РЕДУКТОРОВ

Многоступенчатый цилиндрический редуктор







BAUMANPRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Исследование приборных редукторов

Многоступенчатый цилиндрический редуктор

Учебно-методическое пособие

BAUMANPRESS

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2023

УДК 62-231.1
ББК 34.445
И88

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://press.bmstu.ru/catalog/item/8079/

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кафедра «Элементы приборных устройств»

Рекомендовано Научно-методическим советом МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия

Авторы:
А.Н. Викулов, В.А. Городничев, С.Е. Иванов,
М.Б. Михайловская, Е.А. Перминова

Рецензент
д-р техн. наук, профессор *М.Л. Белов*

И88 **Исследование приборных редукторов. Многоступенчатый цилиндрический редуктор** : учебно-методическое пособие / [А. Н. Викулов и др.] — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. — 22, [2] с.: ил.

ISBN 978-5-7038-6173-8

Приведены материалы для освоения студентами методов измерения крутящих моментов на валах, определения коэффициента полезного действия многоступенчатой передачи и его зависимости от величины нагрузки при постоянной скорости. Особое внимание уделено конструктивным особенностям многоступенчатого редуктора и устройству лабораторной установки.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплину «Основы конструирования приборов».

УДК 62-231.1
ББК 34.445

Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: press@bmstu.ru

ISBN 978-5-7038-6173-8

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Предисловие

Учебно-методическое пособие подготовлено в соответствии с программой дисциплины «Основы конструирования приборов» и предназначено для выполнения студентами лабораторной работы.

Целью лабораторной работы является изучение студентами основных принципов работы приборного многоступенчатого цилиндрического редуктора и формирование у студентов практических навыков работы с данным устройством.

Задачи лабораторной работы

1. Изучение конструкции многоступенчатого цилиндрического редуктора.
2. Освоение принципов градуировки измерительных устройств.
3. Применение теоретических навыков для экспериментального и аналитического определения коэффициента полезного действия многоступенчатого редуктора.

План проведения лабораторных занятий

1. Освоение теоретической части.
2. Предварительное изучение порядка выполнения эксперимента.
3. Непосредственное выполнение эксперимента в лаборатории на основе представленных указаний.
4. Освоение и выполнение расчетов, представленных в экспериментальном и теоретическом разделах.
5. Графическое оформление результатов расчетов и их анализ.

Контроль полученных студентами знаний и компетенций осуществляется посредством защиты лабораторной работы. Для контроля после выполнения лабораторной работы необходимо наличие отчета, оформленного в соответствии с требованиями, указанными в п. «Требования к отчету по лабораторной работе».

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МНОГОСТУПЕНЧАТОГО РЕДУКТОРА

В приборостроении широкое применение нашли устройства, называемые электроприводами. Они состоят из источника энергии (электродвигателя), редуктора и аппаратуры управления. Данные устройства согласуют угловую скорость и крутящий момент между электродвигателем и нагрузкой. Многоступенчатая передача предназначена для последовательного ступенчатого изменения частоты вращения с соответствующим изменением момента от ведущего вала к ведомому посредством нескольких пар зубчатых колес. По характеру изменения частоты вращения выходного вала различают редукторы (передачи, работающие на замедление вращения) и мультипликаторы (передачи, работающие на ускорение вращения). Итак, редуктором называется передача, которая уменьшает скорость и увеличивает крутящий момент на выходном валу.

Одна ступень редуктора представляет собой кинематическую пару, состоящую из двух зубчатых колес, находящихся в зацеплении. Меньшее из двух колес в зацеплении называют шестерней, а большее — колесом. В редукторе ведущей является шестерня, а ведомым — колесо.

Кинематическая характеристика, показывающая, во сколько раз передача изменяет скорость вращения, называется передаточным отношением и обозначается латинской буквой i. В передачах, в которых движение преобразуется во вращательное, передаточным отношением i называется отношение угловых скоростей ведущего и ведомого звеньев передачи:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

Таким образом, скорость вращения зубчатых колес в зацеплении отличается на величину передаточного отношения i. Зубча-

тые колеса, закрепленные на одном валу, имеют одинаковую скорость вращения:

$$\omega_2 = \omega_3.$$

Главным преимуществом многоступенчатых передач являются простота конструкции и возможность получения больших передаточных отношений при сравнительно небольших габаритах устройства.

Многоступенчатые передачи-редукторы наиболее распространены. Они применяются, когда необходимо передать вращение между параллельными валами, при больших скоростях вращения и при необходимости иметь очень большие передаточные отношения. Также многоступенчатые передачи дают возможность получить несколько выходных валов с разными угловыми скоростями.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Редуктор лабораторной установки имеет шесть ступеней с цилиндрическими прямозубыми колесами. Кинематическая схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

Момент от двигателя через вал I, который вращается со скоростью ω_1, передается на шестерню Z_1. Зубчатым зацеплением $Z_1 - Z_2$ момент повышается и передается на вал II. Скорость вращения при этом понижается передачей, и вал II вращается со скоростью ω_2. Скорость вала II будет меньше скорости вала I на величину передаточного отношения i_{1-2} зубчатого зацепления $Z_1 - Z_2$:

$$\omega_2 = \omega_1 i_{1-2}.$$

Далее передача момента осуществляется аналогичным образом для каждой ступени и каждой передачи. Общее передаточное отношение редуктора лабораторной установки определяется через произведение передаточных отношений каждой передачи:

$$i_0 = i_{1-2}\, i_{3-4}\, i_{5-6}\, i_{7-8}\, i_{9-10}\, i_{11-12}. \qquad (1)$$

Зубья колес редуктора лабораторной установки имеют эвольвентный профиль. Модуль зубчатого колеса m является основной

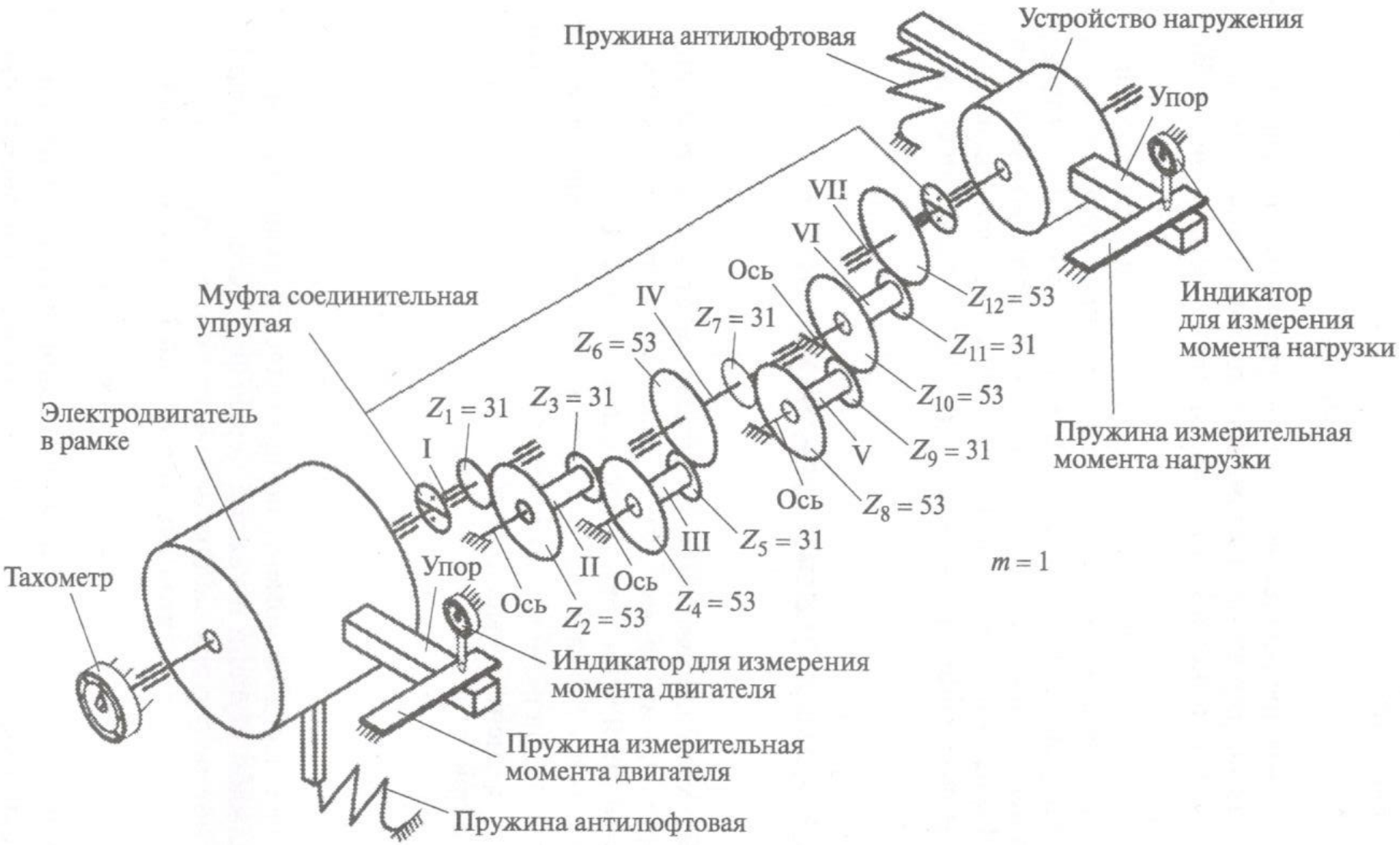


Рис. 1. Кинематическая схема лабораторной установки

характеристикой колес с таким профилем. Модуль связывает в прямой зависимости значение делительного диаметра колеса d и число зубьев Z по формуле

$$d = mZ. \tag{2}$$

Передаточное отношение одной ступени может быть определено как отношение числа зубьев ведомого колеса к числу зубьев ведущего:

$$i_{1-2} = \frac{Z_2}{Z_1}. \tag{3}$$

Выразив каждое передаточное отношение каждой ступени через число зубьев колес, получим выражение общего передаточного отношения

$$i_0 = \frac{Z_2}{Z_1}\frac{Z_4}{Z_3}\frac{Z_6}{Z_5}\frac{Z_8}{Z_7}\frac{Z_{10}}{Z_9}\frac{Z_{12}}{Z_{11}}. \tag{4}$$

Общая конструктивная схема лабораторной установки представлена на рис. 2, *а*, схема устройства для выполнения градуировки на валу электродвигателя — на рис. 2, *б*, схема устройства выполнения градуировки на валу порошковой муфты — на рис. 2, *в*.

Рассмотрим общую конструктивную схему установки. Лабораторная установка имеет основание *1*, на котором установлены:

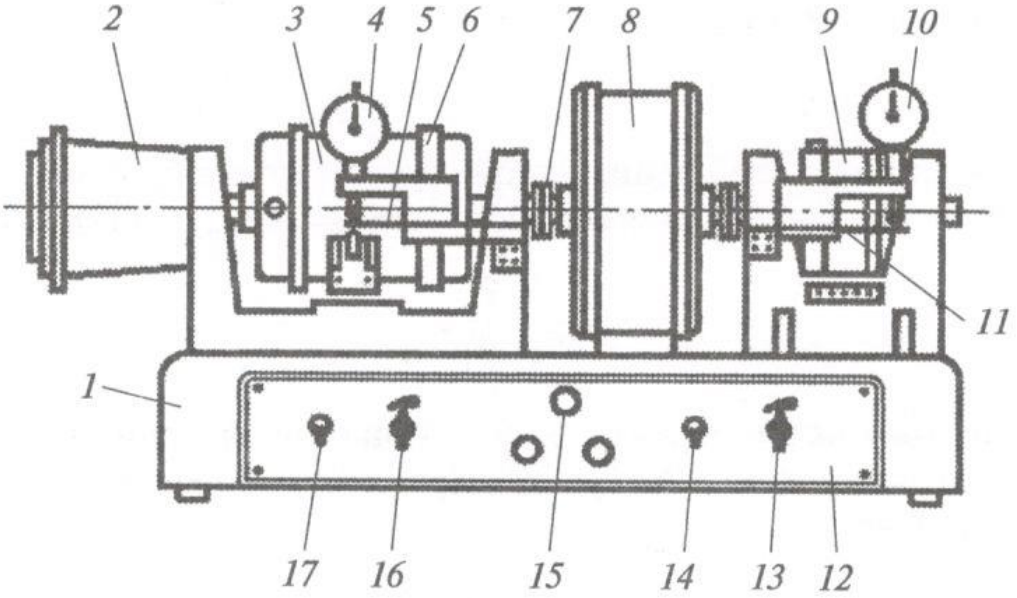
- электрический двигатель *3* внутри поворотной рамы *6*;
- цилиндрический многоступенчатый редуктор *8*;
- порошковый тормоз (регулируемая нагрузка) *9*;
- пульт управления *12*;
- тахометр *2*, позволяющий определить частоту вращения.

На пульте управления *12* находятся следующие элементы:

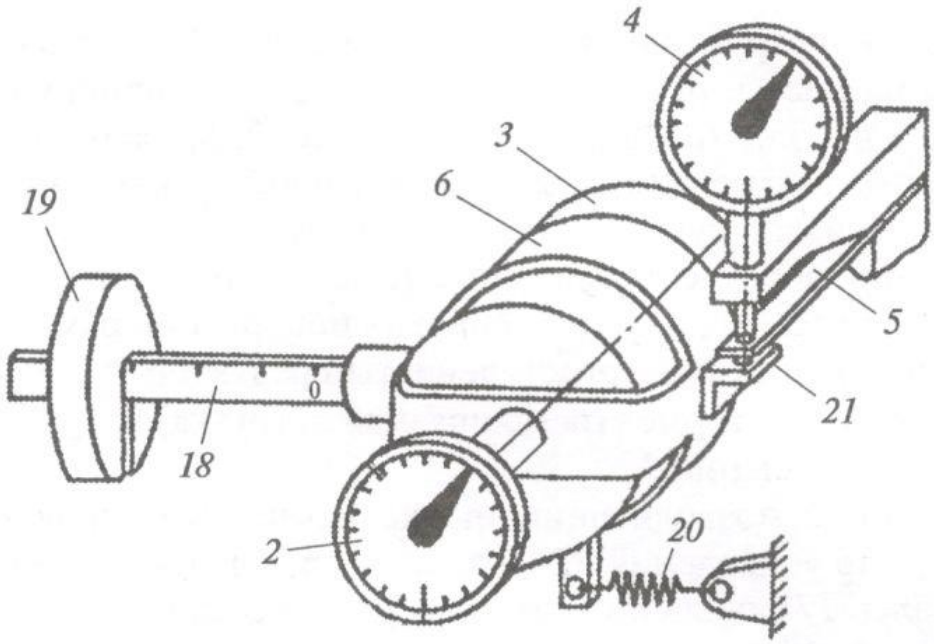
- тумблер *17* включения/выключения двигателя;
- тумблер *16* со встроенным переменным сопротивлением, регулирующий частоту вращения двигателя;
- сигнальная лампа *15* (на некоторых установках отсутствует);
- тумблер *14*, включающий нагрузку (порошковый тормоз *9*);
- тумблер *13* также со встроенным переменным сопротивлением, плавно регулирующий нагрузку.

Момент двигателя и момент нагрузки контролируются с помощью следующих измерительных приборов:

- пружина *5* и шкала индикатора *4* для измерения числа делений на валу двигателя;



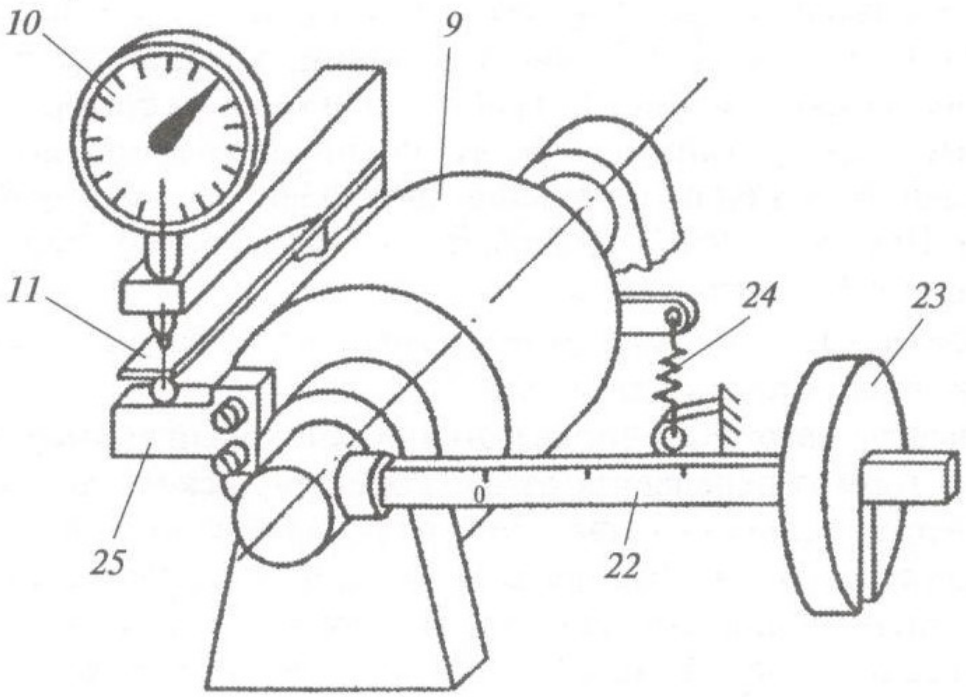
а



б

Рис. 2 (начало). Схема лабораторной установки:

а — общая конструктивная схема; *б* — схема устройства измерения скорости вращения и момента электродвигателя; *1* — основание; *2* — тахометр; *3* — электродвигатель; *4*, *10* — шкалы индикаторов для измерения числа делений на валу двигателя и на валу тормоза; *5*, *11* — измерительные пружины; *6* — поворотная рама; *7* — соединительная муфта; *8* — редуктор; *9* — порошковый тормоз; *12* — пульт управления; *13* — тумблер регулирования нагрузки; *14* — тумблер включения/выключения нагрузки; *15* — сигнальные лампы; *16* — тумблер регулирования оборотов двигателя; *17* — тумблер включения/выключения двигателя; *18*, *22* — рычаги; *19*, *23* — грузы; *20* — винтовые пружины; *21* — выступ рамы *6*; *25* — рама



в

Рис. 2 (окончание). Схема лабораторной установки:

в — схема устройства измерения и задания момента нагрузки; *1* — основание; *2* — тахометр; *3* — электродвигатель; *4*, *10* — шкалы индикаторов для измерения числа делений на валу двигателя и на валу тормоза; *5*, *11* — измерительные пружины; *6* — поворотная рама; *7* — соединительная муфта; *8* — редуктор; *9* — порошковый тормоз; *12* — пульт управления; *13* — тумблер регулирования нагрузки; *14* — тумблер включения/выключения нагрузки; *15* — сигнальные лампы; *16* — тумблер регулирования оборотов двигателя; *17* — тумблер включения/выключения двигателя; *18*, *22* — рычаги; *19*, *23* — грузы; *20* — винтовые пружины; *21* — выступ рамы *6*; *25* — рама

• пружина *11* и шкала индикатора *10* для измерения числа делений на валу тормоза (нагрузки). Измерительные пружины *5* и *11* снабжены тензодатчиками, которые также могут быть использованы для измерения. Для их подключения на задней панели предусмотрены клеммовые зажимы.

Электродвигатель *3* соединен с редуктором *8* с помощью соединительной муфты *7*. Мощность электрического двигателя составляет 20 Вт. Установка подключается к сети переменного тока 50 Гц напряжением 220 В.

Рассмотрим схему устройства измерения скорости вращения и момента электродвигателя, представленную на рис. 2, *б*.

Электродвигатель *3* подвешен на собственной оси в поворотной раме *6* (см. рис. 2, *а*). В специальное отверстие рамы вставляется рычаг *18*, а на рычаг устанавливается груз *19* (см. рис. 2, *б*). Этот груз перемещают по рычагу, создавая точно известный

момент для градуировки измерительной пружины *5* и шкалы индикатора *4* (см. рис. 2, *а*) в числе делений, которое пропорционально значению момента. При работе двигателя на статор действует реактивный крутящий момент, который уравновешивается противодействием силы натяжения антилюфтовой винтовой пружины *20*. Пружина *20* поддерживает в непрерывном поджатии выступ *21* рамы *6* электродвигателя.

Рассмотрим схему устройства измерения и задания момента нагрузки, представленную на рис. 2, *в*.

В качестве нагрузки используется порошковый тормоз *9*. Движение на тормоз передается от вала электрического двигателя *3* через соединительную муфту *7* и редуктор *8*. Сам порошковый тормоз состоит из статора и ротора. Зазор между статором и ротором заполнен жидкой смесью ферритового порошка и масла. Статор снабжен обмоткой, через которую течет электрический ток. Изменение тока в обмотке приводит к изменению магнитного поля в зазоре и связанной с ним вязкостью жидкой смеси ферритового порошка и масла. При изменении вязкости жидкости и происходит изменение значения момента нагрузки. Ток в обмотке статора регулируется поворотом тумблера *13* со встроенным переменным сопротивлением (см. рис. 2, *а*).

Величина момента контролируется с помощью устройства, состоящего из измерительной плоской пружины *11* и шкалы индикатора *10*, принцип работы аналогичен устройству измерительной системы установки для произведения градуировки на валу электродвигателя. Рычаг *22* и установленный на нем груз *23* предназначены для градуировки в составе измерительной системы. Винтовая пружина *24* служит для силового замыкания кинематической цепи и поддерживает в поджатом состоянии раму *25* и плоскую пружину *11* (см. рис. 2, *а*).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Подготовка и техника безопасности при работе с лабораторным оборудованием

Градуировка должна осуществляться при выключенных двигателе и порошковом тормозе.

При включении и работе на установке прозрачная крышка редуктора должна быть закрыта.

Нельзя оставлять установку в заторможенном состоянии с включенным электрическим двигателем, так как в этом случае двигатель может перегореть.

Когда ручки тумблеров *16* и *13* (см. рис. 2, *а*) дошли до упоров, их не следует поворачивать чрезмерным усилием руки — это может вывести их из строя.

Если увеличение момента нагрузки вызвало остановку двигателя, то последний необходимо немедленно выключить тумблером *17* либо с помощью тумблера *14* и ручки *13* уменьшить нагрузку (см. рис. 2, *а*). Остановка включенного двигателя может привести к выходу его из строя. При обнаружении неисправностей установки следует немедленно обратиться к учебному мастеру или к преподавателю.

Градуировка измерительных приборов

Перед проведением эксперимента необходимо провести градуировку измерительных приборов. Процедуре градуировки подлежат следующие приборы:

1) измерительная пружина *5* (см. рис. 2, *а*) и шкала индикатора *4* устройства измерения момента двигателя (см. рис. 2, *б*);

2) измерительная пружина *11* и шкала индикатора *10* устройства измерения момента нагрузки (см. рис. 2, *в*).

Процесс градуировки измерительных устройств двигателя и нагрузки аналогичен. Схема измерительной системы для выполнения градуировки представлена на рис. 3.

Груз определенного веса на некотором плече устанавливают на рычаг, создавая момент. Возникает прогиб измерительной

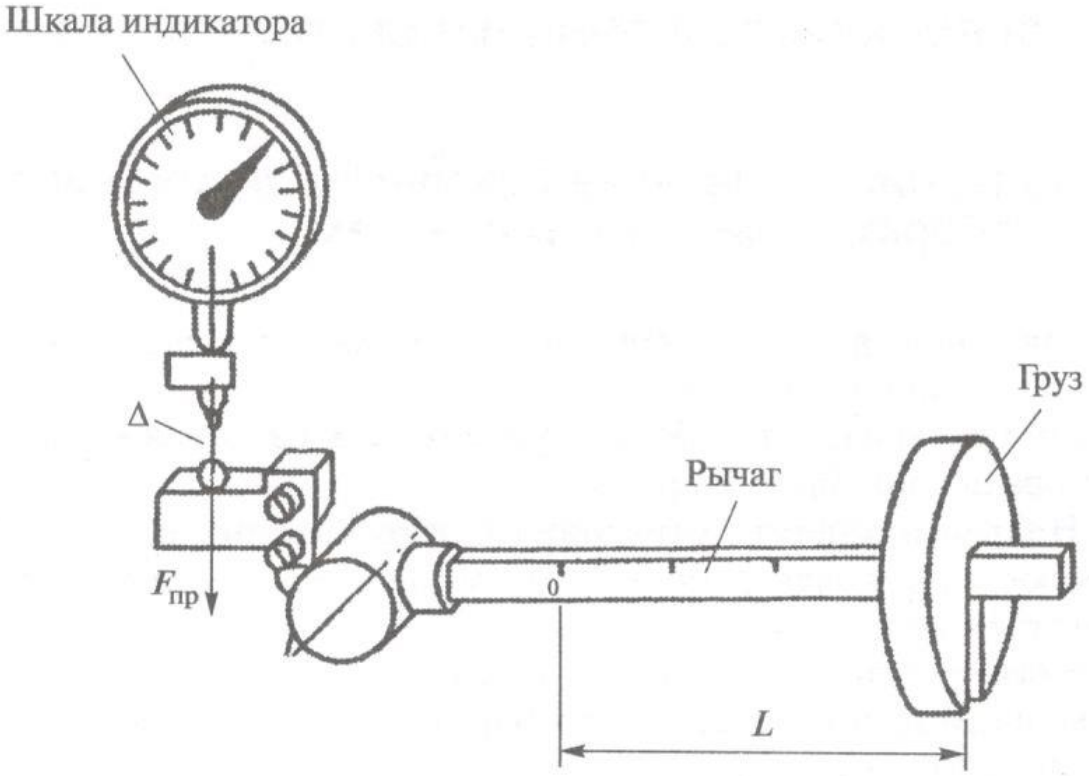


Рис. 3. Схема градуировки измерительных устройств лабораторной установки

пружины Δ и на пружине возникает сила $F_{пр}$, которая уравновешивает момент на рычаге (см. рис. 3). По закону Гука она пропорциональна силе, а следовательно, и моменту двигателя или нагрузки. Разделив известное значение момента, установленного на рычаге, на число делений индикатора, можно получить значение градуировочного коэффициента в размерности момента.

Перед градуировкой следует определиться с весом груза и плечом, на которое этот груз будет устанавливаться. Рекомендуемые для данной лабораторной установки (см. рис. 3) значения веса градуировочных грузов F_m указаны в табл. 1. По указанию преподавателя эти значения могут быть изменены.

Таблица 1

Рекомендуемый вес градуировочных грузов

Название величины	Обозначение	Значение, Н
Вес градуировочного груза устройства измерения момента двигателя	$F_m^{дв}$	3
Вес градуировочного груза устройства измерения момента нагрузки	$F_m^{н}$	8

Рекомендуемые для данной лабораторной установки (см. рис. 3) изменения плеча Δl_j указаны в табл. 2. Данные значения также могут быть изменены по указанию преподавателя.

Таблица 2

Рекомендуемые значения изменения плеча

$\Delta l_j^{\text{дв}}$, см	$\Delta l_j^{\text{н}}$, см	$\Delta l_j^{\text{дв}}$, см	$\Delta l_j^{\text{н}}$, см
8	8	16	16
10	10	18	18
12	12	20	20
14	14		

Момент для устройств измерения двигателя и нагрузки рассчитывается по формуле

$$\Delta M_j = F_{mj}\Delta l_j. \tag{5}$$

Градуировочные коэффициенты устройств измерения двигателя и нагрузки вычисляют по формуле

$$K_j = \frac{\Delta M_j}{\nu_j}. \tag{6}$$

Средний градуировочный коэффициент определяют как среднее арифметическое коэффициентов при каждом проведенном замере:

$$K_{\text{ср}} = \frac{K_1 + K_2 + \cdots + K_J}{j}. \tag{7}$$

Градуировка устройства измерения момента двигателя

Порядок градуировки устройства измерения момента двигателя следующий.

1. Вставьте рычаг *18* в отверстие, находящееся сзади установки в раме двигателя (см. рис. 2, *б*). Широкая грань рычага должна быть расположена вертикально.

2. Установите градуировочный груз *19* на рычаг *18* таким образом, чтобы одна из его граней находилась напротив нулевой отметки шкалы рычага. Вес груза $F_m^{дв}$ определяется согласно рекомендациям, приведенным в табл. 1, или указывается преподавателем. Значение веса необходимо занести в табл. 3.

Таблица 3

Градуировка измерительной системы двигателя

Величина плеча $\Delta l_j^{дв}$, см	Изменение момента градуировочного груза $\Delta M_j^{дв} = F_m \Delta l_j^{дв}$, Н·см	Число делений индикатора $\upsilon_j^{дв}$	Градуировочный коэффициент $K_j^{дв}$, Н·см/дел.
Для индикатора 12: F_m = 3Н (см. рис. 2, *б*)			
8			
10			
12			
14			
16			
18			
20			
Среднее значение градуировочного коэффициента двигателя: $K_{ср}^{дв}$ = _____ Н·см/дел.			

3. Поворотом шкалы индикатора *4* установите его нулевое значение.

4. Перемещайте градуировочный груз *19* по рычагу *18* на величину $\Delta l_j^{дв}$.

5. Для каждого значения $\Delta l_j^{дв}$ снимите показания измерительного прибора в делениях $\upsilon_j^{дв}$. Занесите значения $\Delta l_j^{дв}$ и $\upsilon_j^{дв}$ в табл. 3. Проведите семь измерений в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 2, или указаниями преподавателя.

6. По формуле (5) рассчитайте момент двигателя $\Delta M_j^{дв}$ для каждого значения $\Delta l_j^{дв}$. Занесите полученные значения момента в табл. 3.

7. Для каждого значения момента двигателя $\Delta M_j^{\text{дв}}$ и согласно показаниям прибора в делениях $\upsilon_j^{\text{дв}}$ рассчитайте градуировочные коэффициенты по формуле (6). Полученные значения занесите в табл. 3.

8. Рассчитайте средний градуировочный коэффициент двигателя $K_{\text{ср}}^{\text{дв}}$ по формуле (7) и занесите результат в табл. 3.

Градуировка устройства измерения момента нагрузки

Градуировка устройства измерения момента нагрузки аналогична градуировке измерительного устройства момента двигателя.

Порядок градуировки следующий.

1. Вставьте рычаг *22* в отверстие консоли вала статора тормоза *9* (см. рис. 2, *в*). Широкая грань рычага должна быть расположена вертикально.

2. Установите градуировочный груз *23* на рычаг *22* таким образом, чтобы одна из его граней находилась напротив нулевой отметки. Вес груза $F_m^{\text{н}}$ определяется согласно рекомендациям, приведенным в табл. 1, или указывается преподавателем. Значение веса необходимо занести в табл. 4.

3. Поворотом шкалы индикатора *10* установите его нулевое значение.

4. Перемещайте градуировочный груз *23* по рычагу *22* на величину $\Delta l_j^{\text{н}}$. Значения изменения плеча $\Delta l_j^{\text{н}}$ определяются согласно рекомендациям табл. 2 или указываются преподавателем.

5. Для каждого значения $\Delta l_j^{\text{н}}$ снимите показания измерительного прибора в делениях $\upsilon_j^{\text{н}}$. Занесите значения $\Delta l_j^{\text{н}}$ и $\upsilon_j^{\text{н}}$ в табл. 4. Проведите семь измерений в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 2, или указаниями преподавателя.

6. Для каждого значения $\Delta l_j^{\text{н}}$ рассчитайте момент нагрузки $\Delta M_j^{\text{н}}$ по формуле (*5*). Занесите полученные значения моментов в табл. 4.

7. Для каждого значения момента нагрузки $\Delta M_j^{\text{н}}$ и показаний прибора в делениях $\upsilon_j^{\text{н}}$ рассчитайте градуировочные коэффициенты по формуле (6). Полученные значения занесите в табл. 4.

8. Рассчитайте средний градуировочный коэффициент нагрузки $K^{н}_{ср}$ по формуле (7) и занесите результат в табл. 4.

Таблица 4

Градуировка измерительной системы нагрузки

Величина плеча $\Delta l^{н}_{j}$, см	Изменение момента градуировочного груза $\Delta M^{н}_{j} = F_m \Delta l^{н}_{j}$, Н·см	Число делений индикатора $\upsilon^{н}_{j}$	Градуировочный коэффициент $K^{н}_{j}$, Н·см/дел.
Для индикатора *17* F_m = 8 Н (см. рис. 2, *в*)			
8			
10			
12			
14			
16			
18			
20			
Среднее значение градуировочного коэффициента нагрузки: $K^{н}_{ср}$ = _____ Н·см/дел.			

Выбор режима работы установки

Режим работы определяется следующими параметрами:

- числом оборотов двигателя $n_{дв}$;
- показаниями устройства измерения момента нагрузки (шкала индикатора *17*) в делениях $\upsilon^{н}_{1} \ldots \upsilon^{н}_{5}$ индикатора.

Число оборотов двигателя $n_{дв}$ требуется поддерживать постоянным в течение эксперимента. Показания в делениях $\upsilon^{н}_{1} \ldots \upsilon^{н}_{5}$ индикатора устанавливаются с помощью тумблера *13* путем регулирования величины нагрузки (см. рис. 2, *а*). Режимы работы представлены в табл. 5.

Таблица 5

Режимы работы лабораторной установки

Номер варианта	$n_{дв}$, об/мин	Число делений измерительного прибора нагрузки (шкалы индикатора *10*), дел.				
		$\upsilon_1^н$	$\upsilon_2^н$	$\upsilon_3^н$	$\upsilon_4^н$	$\upsilon_5^н$
1	900	10	15	20	25	30
2	1000	20	30	40	50	60

Экспериментальное определение КПД многоступенчатого редуктора

Порядок проведения эксперимента следующий.

1. При выключенном двигателе *3* и порошковом тормозе *9* поворотом шкалы установите на нулевое значение стрелки индикаторов *4* и *10* (см. рис. 2, *а*).

2. Тумблером *17* включите электродвигатель *3*. Двигатель начнет вращаться (см. рис. 2, *а*).

3. Тумблером *14* включите порошковый тормоз *9* (см. рис. 2, *а*).

4. Поворотом ручки тумблера *13* (см. рис. 2, *а*) задайте число делений $\upsilon_j^н$ индикатора *10* согласно требуемому режиму работы установки (см. табл. 5). Внесите число делений $\upsilon_j^н$ индикатора в табл. 7.

5. Поворотом ручки тумблера *16* (см. рис. 2, *а*) отрегулируйте число оборотов двигателя $n_{дв}$ до величины, которая соответствует требуемому режиму работы установки (см. табл. 5). Число оборотов контролируется тахометром *2* (см. рис. 2, *а*).

6. Когда число оборотов $n_{дв}$ установится на уровне требуемого значения, снимите число делений $\upsilon_j^{дв}$ индикатора *4* (см. рис. 2, *а*) и внесите это значение в табл. 7.

7. Повторите эксперимент для всех значений момента нагрузки $\upsilon_1^н \ldots \upsilon_5^н$ согласно требуемому режиму работы (см. табл. 5).

По результатам эксперимента определяют значения моментов нагрузки $M_j^н$ и двигателя $M_j^{дв}$, а также КПД редуктора $\eta_j^{ред}$.

Значение момента нагрузки находят через измеренное число делений индикатора *10* (см. рис. 2, *а*) и рассчитанное среднее

значение градуировочного коэффициента момента нагрузки (см. табл. 4), согласно следующему соотношению:

$$M_j^{\text{н}} = \upsilon_j^{\text{н}} K_{\text{ср}}^{\text{н}}.$$

Значение момента двигателя определяется аналогично через измеренное число делений индикатора *4* (см. рис. 2, *а*) и рассчитанное среднее значение градуировочного коэффициента момента двигателя (см. табл. 3), согласно следующему соотношению:

$$M_j^{\text{дв}} = \upsilon_j^{\text{дв}} K_{\text{ср}}^{\text{дв}}.$$

Коэффициент полезного действия редуктора находят через соотношение рассчитанных моментов двигателя и нагрузки:

$$\eta_j^{\text{ред}} = \frac{M_j^{\text{н}}}{i_0 M_j^{\text{дв}}}.$$

Общее передаточное отношение редуктора i_0 можно рассчитать, используя формулы (1), (3) и (4). Число зубьев колес редуктора лабораторной установки указано в табл. 6.

Таблица 6

Технические характеристики редуктора лабораторной установки

Название	Обозначение	Значение
Число зубьев шестерней, шт.	$Z_1 \ldots Z_{11}$	31
Число зубьев колес, шт.	$Z_2 \ldots Z_{12}$	53
Модуль зубчатых колес, мм	m	1
Коэффициент трения скольжения	f	0,1
Коэффициент полезного действия опор	$\eta_{\text{оп}}$	0,995
Поправочные коэффициенты передачи	a	2,87
	b	0,87

Рассчитанные значения моментов двигателя и нагрузки, а также значение КПД редуктора заносятся в табл. 7. По результатам расчета, представленным в табл. 7, строится экспериментальный график зависимости КПД редуктора от момента нагрузки на выходном валу $\eta_{\text{ред}} = f(M_{\text{н}})$.

Таблица 7

Экспериментальное определение КПД редуктора

№ п/п	$\upsilon_j^{н}$, дел.	$M_j^{н} = K_{ср}^{н}\upsilon_j^{н}$, Н·см	$\upsilon_j^{дв}$, дел.	$M_j^{дв} = K_{ср}^{дв}\upsilon_j^{дв}$, Н·см	$\eta_j^{ред} = \dfrac{M_j^{н}}{i_0 M_j^{дв}}$
1					
2					
3					
4					
5					

Определение теоретической зависимости КПД редуктора по экспериментальным данным

Для определения КПД ступеней (зубчатых передач) редуктора необходимо провести расчет моментов на его валах. Расчет моментов ведется от нагрузки к двигателю.

Порядок расчета следующий.

1. Для первой рассчитанной в табл. 7 нагрузки $M_j^{н}$ сформируйте табл. 8. Момент последнего вала будет соответствовать моменту нагрузки:

$$M_{VII} = M_j^{н}.$$

2. Определите окружную силу текущей передачи, используя момент предыдущего вала:

$$F_{VI} = \frac{2M_{VII}}{d_{12}}.$$

Занесите полученные значения в табл. 8.

Диаметр делительной окружности колес может быть выражен из формулы (2).

3. Используя рассчитанное значение окружной силы, вычислите поправочный коэффициент текущей передачи:

$$C_{VI} = \frac{F_{VI} + a}{F_{VI} + b}.$$

Полученное значение занесите в табл. 8.

Значения коэффициентов для прямозубых цилиндрических колес a и b примите согласно табл. 6.

Таблица 8

Расчет КПД зубчатых передач редуктора при j-м моменте нагрузки

$M_j^{\text{н}}$, Н·см (из табл. 6)	Номер вала	M_i, Н·см	$F_i = \dfrac{2M_{i+1}}{d_{\text{к}}}$, Н	$C_i = \dfrac{F_i + 2{,}87}{F_i + 0{,}17}$	$\eta_{i-j} = 1 - \pi C_i f \times \left(\dfrac{1}{Z_{\text{ш}}} + \dfrac{1}{Z_{\text{к}}}\right)$
	VII	$M_{\text{VII}} = M_{\text{н}}$	—	—	—
	VI	$M_{\text{VI}} = \dfrac{M_{\text{VII}}}{i_{11-12}\eta_{11-12}\eta_{\text{оп}}}$	$F_{\text{VI}} = \dfrac{2M_{\text{VII}}}{d_{12}}$	$C_{\text{VI}} = \dfrac{F_{\text{VI}} + 2{,}87}{F_{\text{VI}} + 0{,}17}$	$\eta_{11-12} = 1 - \pi C_{\text{VI}} f \times \left(\dfrac{1}{Z_{11}} + \dfrac{1}{Z_{12}}\right)$
	V	$M_{\text{V}} = \dfrac{M_{\text{VI}}}{i_{9-10}\eta_{9-10}\eta_{\text{оп}}}$	$F_{\text{V}} = \dfrac{2M_{\text{VI}}}{d_{10}}$	$C_{\text{V}} = \dfrac{F_{\text{V}} + 2{,}87}{F_{\text{V}} + 0{,}17}$	$\eta_{9-10} = 1 - \pi C_{\text{V}} f \times \left(\dfrac{1}{Z_9} + \dfrac{1}{Z_{10}}\right)$
	IV	$M_{\text{IV}} = \ldots$	$F_{\text{IV}} = \ldots$	$C_{\text{IV}} = \ldots$	$\eta_{7-8} = \ldots$
	III	$M_{\text{III}} = \ldots$	$F_{\text{III}} = \ldots$	$C_{\text{III}} = \ldots$	$\eta_{5-6} = \ldots$
	II	$M_{\text{II}} = \ldots$	$F_{\text{II}} = \ldots$	$C_{\text{II}} = \ldots$	$\eta_{3-4} = \ldots$
	I	$M_{\text{I}} = \ldots$	$F_{\text{I}} = \ldots$	$C_{\text{I}} = \ldots$	$\eta_{1-2} = \ldots$

4. Определите КПД передачи по формуле

$$\eta_{11-12} = 1 - \pi C_{\text{VI}} f \left(\frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{12}}\right).$$

Здесь Z_{11} — число зубьев шестерни на валу VI; Z_{12} — число зубьев колеса на валу VII; f — коэффициент трения скольжения.

Полученное значение занесите в табл. 8.

Значение модуля зубчатых колес, а также другие характеристики редуктора лабораторной установки представлены в табл. 6.

5. Определите момент ступени, используя рассчитанный в п. 4 КПД передачи и момент предыдущей ступени начиная с выходного вала:

$$M_{\text{VI}} = \frac{M_{\text{VII}}}{i_{11-12}\eta_{11-12}\eta_{\text{оп}}}.$$

Передаточное отношение определяется следующим соотношением:

$$i_{11-12} = \frac{Z_{12}}{Z_{11}}.$$

Результат занесите в табл. 8.

6. Повторите пп. 2–5 для всех оставшихся ступеней и зубчатых передач.

7. Для каждой из оставшихся нагрузок $M_2^{\text{н}} \dots M_5^{\text{н}}$, полученных в результате эксперимента (см. табл. 7), сформируйте свою таблицу, аналогичную табл. 8, и повторите расчет моментов и КПД (пп. 1–6).

Построение графиков зависимости КПД передач редуктора от нагрузки

Для получения итоговых зависимостей КПД зубчатых передач редуктора от момента нагрузки $\eta_i = f(M^{\text{н}})$ необходимо рассчитать КПД редуктора для каждой нагрузки и полученное значение внести в табл. 9.

Таблица 9

КПД редуктора в зависимости от момента нагрузки

КПД зубчатых передач η_i	Момент нагрузки				
	$M_1^{\text{н}}$	$M_2^{\text{н}}$	$M_3^{\text{н}}$	$M_4^{\text{н}}$	$M_5^{\text{н}}$

Порядок расчета следующий.

1. Определите КПД редуктора для нагрузки $M_1^{\text{н}}$ по данным, приведенным в табл. 8, как произведение КПД всех ступеней:

$$\eta_{M_1}^{\text{ред}} = \eta_{1-2}\,\eta_{3-4}\,\eta_{5-6}\,\eta_{7-8}\,\eta_{9-10}\,\eta_{11-12}.$$

Внесите значение КПД редуктора для нагрузки $M_1^{\text{н}}$ в табл. 9.

2. Повторите п. 1 для таблиц, соответствующих табл. 8, которые были сформированы для остальных нагрузок $M_2^{\text{н}} \dots M_5^{\text{н}}$.

3. Используя полученные данные, приведенные в табл. 9, постройте график теоретической зависимости КПД редуктора от момента нагрузки $\eta_{\text{т}} = f(M_{\text{н}})$ в одной координатной сетке с графиком зависимости $\eta_{\text{ред}} = f(M_{\text{н}})$.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет должен включать:

1) титульный лист;

2) фамилию, имя, отчество и номер группы;

3) наименование и цель работы;

4) кинематическую схему установки;

5) формулы, по которым велись расчеты, исходные данные для расчетов;

6) результаты градуировки — табл. 3 и 4;

7) экспериментальные данные и расчеты — табл. 7, 8, 9;

8) график экспериментальной зависимости КПД редуктора $\eta_{ред} = f(M_н)$ и график теоретической зависимости КПД редуктора $\eta_т = f(M_н)$ в одной координатной сетке;

9) выводы по результатам выполненной работы.

Контрольные вопросы

1. Что такое редуктор?
2. Чем отличается редуктор от мультипликатора?
3. Что называют ведущим и ведомым колесами одноступенчатой зубчатой передачи?
4. Что называют шестерней в одноступенчатой зубчатой передаче? Что называют колесом?
5. Что такое передаточное отношение?
6. По какой формуле определяют передаточное отношение одноступенчатой зубчатой передачи?
7. По какой формуле определяют передаточное отношение многоступенчатой передачи?
8. Как определяют передаточное отношение редуктора лабораторной установки?
9. По какой формуле определяют крутящий момент на валах многоступенчатой передачи?
10. Как определяют КПД многоступенчатой передачи?
11. Как влияет увеличение числа колес зубчатой передачи на ее КПД?
12. Как зависит КПД приборного редуктора от нагрузки?
13. В чем причина разных КПД у каждой ступени редуктора?

14. В каких элементах редуктора возникают наиболее существенные потери?

15. Для чего предназначена кинематическая схема?

Литература

Алексеева Н.А., Бонч-Осмоловский Л.А., Рощина Г.И. Основы расчета и конструирования деталей и механизмов летательных аппаратов: учеб. пособие для втузов. М.: Машиностроение, 1989.

Анфимов М.И. Редукторы. Конструкции и расчет. М.: Машиностроение, 1993.

Гутин С.Я., Власов М.Ю. Информационные технологии в эскизном проектировании и оптимизации параметров зубчатых цилиндрических редукторов. М.: Высш. шк., 2004.

Детали машин: учебник для вузов / Л.А. Андриенко, Б.А. Байкова, Н.И. Захарова и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Маслов Г.С. Прикладная механика: учебник для вузов / под ред. Г.Б. Иоселевича. М.: Высш. шк., 1989.

Красковский Е.Я., Дружинин Ю.А., Филатов Е.М. Расчет и конструирование механизмов приборов и вычислительных систем: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высш. шк., 1983.

Элементы приборных устройств. Курсовое проектирование: учеб. пособие для вузов. В 2 ч. Ч. 1. Расчеты / Н.П. Нестерова, А.П. Коваленко, О.Ф. Тищенко и др.; под ред. О.Ф. Тищенко. М.: Высш. шк., 1978.

Элементы приборных устройств (Основной курс): учеб. пособие для вузов. В 2 ч. Ч. 1. Детали, соединения и передачи / О.Ф. Тищенко, Л.Т. Киселев, А.П. Коваленко и др.; под ред. О.Ф. Тищенко. М.: Высш. шк., 1982.

Элементы приборных устройств (Основной курс): учеб. пособие для вузов. В 2 ч. Ч. 2. Приводы, передачи, исполнительные устройства / О.Ф. Тищенко, Л.Т. Киселев, А.П. Коваленко и др.; под ред. О.Ф. Тищенко. М.: Высш. шк., 1982.

Содержание

Предисловие 3
Краткая характеристика многоступенчатого редуктора 4
Описание лабораторной установки 5
Порядок выполнения лабораторной работы 11
Требования к отчету по лабораторной работе 22
Контрольные вопросы 22
Литература 23

Учебное издание

Викулов Александр Николаевич
Городничев Виктор Александрович
Иванов Сергей Евгеньевич
Михайловская Маргарита Борисовна
Перминова Елена Александровна

Исследование приборных редукторов
Многоступенчатый цилиндрический редуктор

Редактор *О.М. Королева*
Художник *Э.Ш. Мурадова*
Корректор *Н.В. Савельева*
Компьютерная графика *Т.К. Сегеды*
Компьютерная верстка *Е.В. Жуковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 30.10.2023. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 138 экз. Изд. № 1342-2023.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru https://press.bmstu.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»**

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кафедра «Элементы приборных устройств»

Приведены материалы для освоения студентами методов измерения крутящих моментов на валах, определения коэффициента полезного действия многоступенчатой передачи и его зависимости от величины нагрузки при постоянной скорости. Особое внимание уделено конструктивным особенностям многоступенчатого редуктора и устройству лабораторной установки.

«Политехнический молодежный журнал» МГТУ им. Н.Э. Баумана приглашает студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей (специалистов) опубликовать свои статьи.

- **Все публикации** бесплатные
- **Статьи индексируются в** РИНЦ
- **Каждой статье присваивается** DOI

Полная информация о журнале, а также выпуски текущих номеров представлены на сайте www.ptsj.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Главный учебный корпус, ауд. 298

vk.com/ptsjournal
ptsj@bmstu.ru

ISBN 978-5-7038-6173-8



ptsj.ru



bmstu.ru



press.bmstu.ru

