

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

А. Н. Петрученко
Г. М. Кухарёнок

ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 01
«Двигатели внутреннего сгорания»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2022

УДК 621.431-048.24(075.8)

ББК 31.365я7

ПЗ1

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Технология и организация технического сервиса»
Белорусского государственного аграрного технического
университета, зав. кафедрой *В. Е. Тарасенко*;
начальник отдела двигателей ГНУ «Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси» *А. С. Климук*

Петрученко, А. Н.

ПЗ1 Испытания двигателей : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / А. Н. Петрученко, Г. М. Кухарёнок. – Минск : БНТУ, 2022. – 63 с.
ISBN 978-985-583-429-9.

В учебно-методическом пособии изложены учебные материалы по дисциплине «Испытания двигателей». Даны методические указания по изучению дисциплины.

УДК 621.431-048.24(075.8)

ББК 31.365я7

ISBN 978-985-583-429-9

© Петрученко А. Н., Кухарёнок Г. М., 2022

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всех отраслях машиностроения наблюдается развитие средств и методов испытаний, резкое увеличение числа лиц, занимающихся исследованиями, повышение значения и объема опытно-исследовательских работ.

Это объясняется необходимостью постоянного совершенствования конструкции выпускаемых промышленностью машин, в том числе и двигателей внутреннего сгорания.

Улучшение параметров двигателей (экономичность, токсичность, литровая мощность, надежность, долговечность, металлоемкость и др.) возможно лишь при тщательном изучении происходящих в них процессов.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время практически нельзя провести четкую грань между опытно-конструкторскими и исследовательскими работами вследствие того, что создание какого-либо узла, отвечающего современным требованиям, заставляет тщательно изучать его работу, т. к. легкодоступные резервы улучшения конструкции практически исчерпаны.

Развитие двигателей невозможно без постановки все более сложных, точных, а иногда и уникальных экспериментов. Широкое применение при проведении экспериментов находят электронные приборы, счетно-решающие устройства и различные автоматы, уменьшающие затраты времени на проведение испытаний и на обработку получаемых результатов.

Исключительное внимание сейчас уделяют исследованию рабочих процессов, токсичности, тепловой и механической напряженности двигателей.

Настоящий курс имеет целью изучение будущими инженерами-конструкторами основных сведений по организации исследований, теории и практике измерений, о современных автоматизированных стендах, приборах и устройствах, методах проведения исследований и обработки результатов испытаний двигателей и систем.

1. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

1.1. Назначение и виды испытаний

Испытания составляют заключительный этап процесса создания и совершенствования двигателей.

Разработка двигателя начинается с создания его общей компоновки с учетом исходных значений диаметра и хода поршня и сложившихся статистических норм на проектирование двигателей. Далее расчетным путем определяют его технико-экономические показатели, величины нагрузок на детали и размеры основных элементов двигателя, его агрегатов и систем.

Окончательно параметры двигателя определяют путем различных видов испытаний, проводимых как в стендовых, так и в эксплуатационных условиях. В соответствии с характером испытаний их разделяют на две большие группы: научно-исследовательские и испытания, регламентируемые ГОСТами.

1.2. Испытания, регламентируемые ГОСТами

Назначение, виды и типовой объем испытаний двигателей определяются следующими ГОСТами: Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. ГОСТ 18509-88; Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. ГОСТ 14846-2020.

Тракторные и комбайновые дизели подвергают испытаниям следующих видов:

- приемо-сдаточные;
- предъявительские;
- периодические кратковременные;
- периодические длительные;
- типовые.

Приемо-сдаточные и предъявительские испытания проводят с целью контроля сборки и качества регулировки дизелей.

Периодические кратковременные испытания проводят с целью контроля соответствия показателей дизелей техническим условиям на дизели конкретных марок.

Периодические длительные испытания проводят с целью контроля соответствия и стабильности показателей безотказности и параметров дизелей техническим условиям на дизели конкретных марок.

Типовые испытания проводят после внесения в конструкцию или технологию изготовления дизелей изменений, которые могут повлиять на параметры дизеля, указанные в технических условиях.

Виды испытаний автомобильных двигателей:

- приемочные;
- периодические.

Приемочные испытания опытных образцов проводят с целью контроля качества и характеристик двигателя, его соответствия предоставляемым документам. Они должны включать в себя определение мощности, удельного расхода топлива и давления масла при номинальной частоте вращения и положении органов управления регулятора частоты вращения, соответствующей полной подаче топлива, а также максимальной частоты вращения холостого хода и давления масла при минимальной устойчивой частоте вращения холостого хода.

Периодические испытания проводят с целью контроля качества сборки и регулировки двигателей в соответствии с конструкторской документацией (КД) на двигатель конкретной марки.

1.3. Исследовательские испытания

Исследовательские испытания проводят с целью определения влияния различных конструктивных, регулировочных и эксплуатационных факторов на показатели работы двигателя. Эти испытания могут проводиться как в стендовых, так и в эксплуатационных условиях.

Исследовательские испытания проводят по специально разработанной методике, в которой определяются цели и за-

дачи исследований, обосновывается выбор опытной установки (объект исследования) и измерительной аппаратуры. Определяются режимы испытания, измеряемые параметры, а также методика обработки и анализа результатов испытаний.

С целью уменьшения объема научно-исследовательских работ, а в ряде случаев и повышения их точности, прибегают к методам физического и математического моделирования, проводят испытания на безмоторных установках, одноцилиндровых отсеках и т. д.

Испытания проводят лаборатории (бюро) отдела главного конструктора (ОГК) заводов, специализированных отраслевых институтов, лаборатории вузов и др.

1.4. Подготовка и условия проведения испытаний

По ГОСТ 18509-88 дизели, подвергаемые предъявительским и приемо-сдаточным испытаниям, должны пройти технологическую обкатку на режимах, определенных картой технологического процесса. Двигатели, предъявляемые к другим видам испытаний, должны иметь наработку 60 часов.

Марки топлива и масла, а также вид и (или) марка охлаждающих жидкостей, применяемых во время испытаний, должны соответствовать требованиям технических условий на испытуемый двигатель.

Температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя с жидкостным охлаждением должна поддерживаться в пределах, указанных в технических условиях на испытуемый двигатель, а при отсутствии точных указаний – (90 ± 5) °С для тракторных и комбайновых дизелей или $(75-85)$ °С для автомобильных двигателей.

При проведении испытаний температура двигателей воздушного охлаждения в точке, указанной в технических условиях, должна поддерживаться в пределах между максимальным значением, указанным в технических условиях на двигатель, и уменьшенным на 20 °С.

Температура масла в двигателе поддерживается в пределах, указанных в технических условиях на испытуемый двигатель, а при отсутствии таких указаний – $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$ для тракторных и комбайновых дизелей или $(80-100)^\circ\text{C}$ для автомобильных двигателей.

ГОСТы регламентируют стандартные атмосферные условия.

Например, для тракторных и комбайновых дизелей атмосферное давление, температура и относительная влажность воздуха в помещении, где находится испытательный стенд, должны соответствовать нормальным значениям факторов внешней среды: $P_0 = 100,3 \text{ кПа}$, $T_0 = 298 \text{ К}$ и влажность 50 %. При отклонении осуществляется приведение определенных параметров двигателя к нормальным атмосферным условиям.

По ГОСТ 14846-2020 двигатели серийного производства и опытные образцы новых и модернизированных двигателей перед испытаниями должны быть обкатаны в объеме, установленном нормативными документами.

1.5. Допускаемые погрешности измерений

Допускаемые погрешности измерений приведены в соответствующих стандартах.

Испытательный стенд должен быть оборудован приборами и измерительной аппаратурой, позволяющими проводить измерение показателей с точностью, указанной в ГОСТе.

Например, по ГОСТ 14846-2020 минимальная точность измерительных приборов при измерении крутящего момента, частоты вращения, расхода топлива или воздуха равна $\pm 2\%$ от считываемых значений или $\pm 1\%$ от максимального значения двигателя, в зависимости от того, какой из этих показателей выше.

По ГОСТ 14846-81 предел абсолютной погрешности измерения крутящего момента равен $\pm 0,005\%$ от его максимальной величины. Для расхода топлива – $\pm 0,005\%$ от номинального значения. Для частоты вращения – $\pm 0,005\%$ от ее номинального значения, но не более 10 об/мин.

2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МЕТРОЛОГИИ И ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

2.1. Краткие сведения об измерениях и измерительных приборах

Измерением называют процесс сравнения изучаемой физической величины с однородной величиной, принятой за меру, а тела или устройства, воспроизводящие эту единицу, называют мерой.

При исследовании быстропротекающих процессов в ДВС непосредственное сравнение изучаемых величин с мерой невозможно. В таких случаях измеряемые величины или параметры преобразуют в другие и сравнивают их с соответствующими единицами измерения.

В общем случае путем измерения определяют числовое значение

$$X = \frac{A}{a},$$

показывающее, во сколько раз измеряемая величина A отличается от принятой для ее единицы измерения a .

По способу получения числового значения X различают прямые, косвенные и совокупные измерения.

Прямое измерение заключается в непосредственном сравнении величины с ее мерами, в том числе путем использования измерительных приборов, градуируемых в единицах измерения данной физической величины. На практике измерения также осуществляют:

1. Методом непосредственной оценки с помощью мер или измерительных приборов (длину – линейкой, температуру – термометром).

2. Дифференциальным или разностным методом, когда числовое значение определяемой величины получают как разность

между измеряемой и известной величинами или между двумя физическими величинами (разность давлений – дифференциальным манометром, разность силы токов – логометром и т. д.).

3. Нулевым методом, когда действие измеряемой физической величины уравнивается действием известной физической величины (измерение термоЭДС, термопары – потенциометром, массы – гирями на рычажных весах).

4. Методом совпадений или совмещения, когда равномерно чередующиеся сигналы, характеризующие измеряемую величину, сравнивают с сигналами от известной физической величины (обороты – строботахометром).

Косвенные измерения заключаются в определении числового значения величины путем математической обработки прямых измерений нескольких величин.

Например, плотность топлива:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3.$$

Совокупные измерения заключаются в определении числового значения величины путем вычисления по результатам прямых измерений одной или нескольких величин, выполненных при различных условиях эксперимента.

2.2. Измерительные приборы

Для осуществления непосредственного сравнения измеряемой величины с ее мерой или получения и сравнения соответствующих им значений нового параметра-посредника служат устройства, называемые контрольно-измерительными (измерительными) приборами.

В измерительных приборах каждое преобразование входных величин в выходные рассматривают как отдельное звено прибора.

При анализе приборов их звенья условно изображают в виде прямоугольника со стрелками, указывающими направление действия физических величин.

Когда выходные величины малы, в приборы вводят усиленные звенья, включаемые обычно последовательно первым звеньям. Цепочку взаимосвязанных в определенной последовательности звеньев называют *структурной схемой* прибора.

В зависимости от места, которое занимает звено в структурной схеме измерительного прибора, различают первичные, промежуточные и конечные (выходные) звенья.

Первичные звенья контактируют с изучаемой средой и образуют чувствительный элемент прибора. Если чувствительный элемент преобразует измеряемую физическую величину в параметры другой физической величины, то его называют *датчиком*, в других случаях – приемником, т. е. приемники передают измеряемую величину в измерительную цепь без искажений (давление по трубопроводу).

Датчики обеспечивают функциональную связь между измеряемой величиной и величиной, посылаемой в измерительную цепь. Датчики могут быть механическими, гидравлическими, термическими, оптическими, пьезоэлектрическими. В исследованиях двигателей широко применяют датчики, позволяющие измерять неэлектрические величины электрическими средствами.

Промежуточные звенья передают физические величины по измерительной цепи от первичных к конечным выходным (рычажные, шестеренчатые и другие механические; усиленные, согласующие, выпрямительные и др.) звеньям.

В зависимости от способа преобразования информации в промежуточном звене все измерительные приборы разделяют на две большие группы: с амплитудными (аналоговыми) и дискретными преобразователями.

Приборы аналогового типа преобразуют измеряемую (входную) амплитудно-изменяющуюся величину в однозначно связанную с ней функциональной зависимостью выходную величину, например угол поворота – в напряжение, сопротивление, частоту.

Приборы дискретного действия преобразуют входные амплитудно-изменяющиеся величины в сочетание импульсов, однозначно связанных с амплитудой входной величины функциональной зависимостью – кодом. Приборы этого типа обеспечивают большую точность отсчета, т.к. действуют по принципу «да-нет».

Дискретные преобразователи относятся к классу автоматических устройств, называемых *дискретными автоматическими системами*, для которых характерен процесс *квантования*, т.е. замена бесчисленного множества значений измеряемой величины их конечным количеством с помощью импульсных модуляторов или кодирующих устройств. Различают квантование по времени, по уровню и одновременно по обоим параметрам. На принципе дискретности счета основаны, например, электронные цифровые приборы, вычислительные и управляющие машины.

Конечные звенья образуют указатель или регистрирующую выходную часть прибора, которую снабжают шкалой, цифровым указателем (при дискретном счете) или автоматическим записывающим устройством.

При наличии шкалы прибора область между начальной и конечной отметками на шкале называют *диапазоном измерения*. Участок шкалы между двумя соседними штрихами называют *делением шкалы*, а приращение измеряемой величины, соответствующее одному делению, – *ценой деления*. На это число надо умножить отсчет, чтобы получить значение измеряемой величины.

Чувствительностью аналогового прибора называют отношение линейного или углового перемещения стрелки указателя к изменению измеряемой величины, вызывающей это перемещение, т.е. это отношение любого значения выходной величины a к значению вызывающей ее измеряемой величины A :

$$K_{\text{л}} = \frac{a}{A}.$$

Порог чувствительности измерительного прибора характеризуется минимальным значением измеряемой величины, которое можно обнаружить с помощью данного прибора.

Точность измерительного прибора определяется степенью достоверности результатов измерения им. Ее принято оценивать величиной положительного и отрицательного пределов (\pm) наибольшей допускаемой прибором погрешности ΔA . Чем меньше по абсолютной величине эта погрешность, тем больше точность прибора и выше класс его точности.

Класс точности прибора выражают величиной приведенной погрешности, т. е. отношением наибольшего значения абсолютной погрешности к предельному или верхнему α_{\max} значению шкалы прибора в процентах:

$$\delta_{\text{приб.}} = \left(\frac{\Delta A}{\alpha_{\max}} \right) \cdot 100.$$

Таким образом, наибольшая приведенная относительная погрешность и является классом точности приборов.

Например, электроизмерительные приборы подразделяются на классы от 0,1 до 4,0. Более грубые приборы обозначения класса точности не имеют. Класс прибора обозначают на шкале соответствующей цифрой, обведенной окружностью.

При этом приборы класса точности 1,0 обеспечивают относительную погрешность измерений $\pm 1,0\%$ и т. д.

Не имеют практического смысла попытки измерить данным прибором с точностью большей, чем присуща ему.

Вариацией показаний прибора называют наибольшую разность между его отдельными повторными показаниями, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины при неизменных внешних условиях.

По точности измерений приборы разделяют на образцовые и рабочие.

Образцовые приборы служат эталонами, позволяющими воспроизводить и хранить единицы измерения, а также проверять и градуировать другие измерительные приборы.

Рабочие приборы служат для практических измерений. Они делятся на лабораторные контрольные приборы и более грубые технические.

Все измерения следуют выполнять приборами и устройствами, предварительно проверенными или протарированными в соответствии с существующими положениями о контроле измерительных приборов.

2.3. Погрешности измерений

Измерения не могут быть выполнены абсолютно точно и всегда содержат некоторую ошибку. Поэтому при проведении опытов прежде всего необходимо проанализировать факторы, влияющие на их точность, и на основании такого анализа подобрать измерительную аппаратуру.

2.3.1. Погрешности непосредственного измерения величин

Погрешности измерений разделяют на два основных вида: субъективные и объективные.

Субъективные (грубые) ошибки могут быть устранены обучением и тренировкой испытателей и улучшением условий их труда (рабочее место, цена деления прибора, зеркальные шкалы приборов и т. п.). Субъективные ошибки полностью исключаются с помощью приборов, обеспечивающих автоматическую запись измеряемых величин или цифровую индикацию результатов измерений, хотя и здесь ошибки считаются возможными.

Явные промахи и просчеты, приводящие к появлению грубых ошибок при обычных методах измерения, не принимают во внимание, а в сомнительных случаях проводят контрольные измерения.

К объективным погрешностям относят систематические и случайные погрешности.

Систематические погрешности обычно являются следствием несовершенства измерительной техники и методов измерений.

Систематические погрешности могут быть статическими, наблюдаемыми при измерении постоянных по времени величин, и динамическими, наблюдаемыми при измерении переменных по времени величин. Систематические погрешности имеют определенную величину и знак и поддаются исправлению или ограничению.

Случайные погрешности – это результат практически неустранимых неточностей в установке, настройке и отсчете показаний аппаратуры.

Точность непосредственно измеряемых величин в основном определяется случайными погрешностями измерений. Их величина и знак вследствие случайного происхождения неопределенны, поэтому случайным погрешностям приходится приписывать двойной знак и оценивать лишь их наиболее вероятные значения с помощью специальных математических методов.

Главная трудность при этом заключается в том, что вследствие наличия случайных погрешностей истинное значение измеряемой величины остается неизвестным.

Поэтому в практике обработки результатов вынужденно пользуются не истинным, а вероятным значением измеряемой величины.

Вероятное значение измеряемой величины \bar{X} определяют как среднюю арифметическую величину из всех выполненных n отдельных различных измерений одного и того же численного значения физической величины. Наиболее вероятное значение измеряемой физической величины:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n},$$

где $\sum_1^n X_i$ – сумма величин, получаемых при измерении.

Методы обработки результатов и оценки погрешностей измерений изучаются в курсе «Теория вероятностей и математическая статистика».

Наилучшим приближением к истинному значению непосредственно измеряемой величины является среднее арифметическое всех результатов измерений. Это объясняется тем, что при вычислении среднего арифметического значения (случайных ошибок) отдельных измерений ошибки с противоположными знаками могут уничтожаться. Следовательно, при проведении исследований замеры должны быть многократными.

С увеличением числа размеров n точность среднего арифметического их результатов должна возрастать, поэтому возникает вопрос об определении целесообразного числа замеров.

В математической статистике доказывается, что наиболее вероятной абсолютной ошибкой среднего арифметического результата n измерений будет величина

$$r = \pm 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_1^n \Delta X_i^2}{(n-1) \cdot n}},$$

где $\Delta X_i = \bar{X} - X_i$ – отклонение результатов отдельных измерений от среднего арифметического (абсолютная ошибка измерений).

Формула получена в предположении, что все случайные ошибки данного ряда n измерений разделены на две равные части: в одной ошибки меньше r , в другой – больше r .

Из выражения следует, что с увеличением числа измерений величина r быстро уменьшается лишь до 5–10. Следовательно, увеличивать число замеров свыше 5–10 нецелесообразно. Кроме того, выражение показывает, что при $n \rightarrow 1$ $r \rightarrow \infty$. Это означает,

что на основании единичного замера нельзя делать никаких заключений, т. к. в силу случайных причин именно данное измерение может иметь особенно большую погрешность.

Наряду с величиной r показателями точности измерений служат величины средней квадратичной, предельной абсолютной и средней арифметической абсолютной ошибок.

Средняя квадратичная абсолютная ошибка:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n \cdot (n-1)}}$$

т. е. $\sigma = \frac{2}{3} r$.

С помощью среднеквадратичной ошибки можно оценить величину предельной абсолютной ошибки измерений, превышение которой маловероятно:

$$\sigma_{\max} = 3\sigma \approx \frac{9}{2} r.$$

Средняя арифметическая абсолютная ошибка:

$$r_n = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta X_i|}{n}.$$

Точность измерений можно характеризовать не только абсолютной, но и относительной погрешностью:

$$\delta = \pm \frac{r}{X} = \frac{\sigma}{X} = \frac{r_n}{X}.$$

Относительная погрешность более наглядно характеризует результат измерений, т. к. при ее использовании учитываются абсолютные значения измеряемой величины, и появляется возможность сравнивать точность измерений физически разнородных величин (например, 1 %, а не 1 кг и 1 мм).

Изложенный математический аппарат неприменим для расчета погрешностей величин, определяемых однократным замером, например при высокой трудоемкости замеров или если прибор регистрирует величину нарастающим потоком (суммарный счетчик оборотов).

В этом случае пользуются предельной абсолютной погрешностью измерений, в качестве которой обычно принимается наименьшая цена деления прибора. По σ_{\max} определяют r , σ и относительную погрешность.

2.3.2. Погрешности сложных опытов

Во многих случаях исследуемые величины не поддаются непосредственному измерению, а вычисляются по результатам непосредственных измерений других величин.

Ошибки косвенных измерений находят из условия, что числовое значение определяемой физической величины является функцией непосредственно измеряемых величин x_1, x_2, \dots, x_m :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

При несколько упрощенной трактовке абсолютные ошибки величин x_1, x_2, \dots, x_m рассматриваются как их бесконечно малые приращения, имеющие двойной знак ($\pm dx_1, \pm dx_2, \dots, \pm dx_m$). Предполагается, что эти приращения аргументов приводят к соответствующему абсолютному приращению функции $\pm dy$, являющемуся ее полным дифференциалом:

$$\pm dy = \pm \frac{\Delta f}{\Delta x_1} dx_1 \pm \frac{\Delta f}{\Delta x_2} dx_2 \pm \dots \pm \frac{\Delta f}{\Delta x_m} dx_m.$$

Относительная ошибка рассматриваемой функции будет равна дифференциалу ее натурального логарифма:

$$\delta y = \pm \frac{dy}{y} = \pm d(\ln y),$$

т. к. $\frac{d(\ln y)}{dy} = \frac{1}{y}$.

При использовании формулы для вычисления абсолютно-го приращения функции $\pm dy$ возникает трудность, связанная с двойным знаком ошибок аргумента ($\pm dx_1$, $\pm dx_2$ и т. д.). Т. к. оба знака этих ошибок равновероятны, то вводится понятие о предельной абсолютной погрешности функции, которую она имела бы, если бы знаки ошибок всех аргументов были одинаковыми:

$$\varepsilon_{y_{\text{пред.}}} = \pm dy_{\text{пред.}} = \pm \left| \frac{\Delta f}{\Delta x_1} dx_1 \right| \pm \left| \frac{\Delta f}{\Delta x_2} dx_2 \right| \pm \dots \pm \left| \frac{\Delta f}{\Delta x_m} dx_m \right|.$$

Таким образом, предельная абсолютная погрешность функции равна сумме абсолютных значений ее частных дифференциалов.

Предельной абсолютной погрешности функции соответствует предельная относительная ошибка, равная дифференциалу ее натурального логарифма, у которого суммированы абсолютные значения всех членов.

$$\delta y_{\text{пред.}} = \pm \frac{dy_{\text{пред.}}}{y} = \pm \left| d(\ln y_{\text{пред.}}) \right|.$$

Фактическая ошибка будет меньше предельной вследствие вероятности взаимного уничтожения случайных ошибок непосредственно измеряемых величин.

Приближенно вероятная погрешность функции может быть определена по уравнению для вычисления величины предельной абсолютной ошибки измерений:

$$\sigma_{\max} = \varepsilon_{\text{у пред.}} = \frac{9}{2} r.$$

Приведенный математический аппарат позволяет решать следующие задачи:

1. Вычислять ошибки функций по известным ошибкам их аргументов – прямая задача.

2. Вычислять допустимые ошибки аргументов, при которых ошибка функций не превзойдет заданную величину, – обратная задача.

3. Определять условия, при которых ошибка функции будет минимальной, т. е. оптимизировать условия измерений.

Например, найдем погрешность определения удельного эффективного расхода топлива g_e с учетом требований ГОСТ по точности измерения непосредственно измеряемых величин.

В общем виде удельный расход может быть представлен следующей функцией:

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} = \frac{G_0}{\tau} \cdot \frac{9550}{M_K \cdot n} = 9550 \frac{1}{M \cdot n} \cdot \frac{G_0}{\tau},$$

где G_0 – доза топлива, кг;

τ – время расхода топлива, ч;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

M_K – крутящий момент на валу двигателя, Н·м.

Дифференцируя натуральный логарифм этого выражения (суммируя при этом все члены, т. к. берем абсолютные значения), получим, что предельная относительная погрешность удельного эффективного расхода топлива:

$$\begin{aligned} \delta g_{e \text{ пред.}} &= \pm d(\ln 9550 + \ln M_K + \ln n + \ln G_0 + \ln \tau) = \\ &= \pm \left(0 + \frac{dM_K}{M_K} + \frac{dn}{n} + \frac{dG_0}{G_0} + \frac{d\tau}{\tau} \right), \end{aligned}$$

т. е. погрешность $\delta g_{e \text{ пред.}}$ равна сумме относительных погрешностей всех измеряемых величин.

Если относительная погрешность

$$\delta M = 0,5 \% ; \quad \delta n = 0,5 \% ; \quad \delta \sigma_0 = 0,4 \% ; \quad \delta \tau = 0,1 \% ,$$

тогда $\delta g_{e \text{ пред.}} = 0,5 \% + 0,5 \% + 0,4 \% + 0,1 \% = 1,5 \% .$

2.3.3. Динамические погрешности измерений быстропеременных величин

Эти погрешности обусловлены инерционностью измерительной аппаратуры. Они имеют большое значение при испытаниях ДВС, в которых, например, скорость изменений давления в цилиндрах достигает $\frac{dp}{dt} = 5-10\,000 \frac{\text{МПа}}{\text{с}} \left(50-100\,000 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right)$, а в топливоподающих трубопроводах дизелей нередко превышает $50\,000 \frac{\text{МПа}}{\text{с}} \left(500\,000 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right)$.

Уменьшение инерционности измерительных систем возможно только до определенных пределов, поэтому результаты замера быстропеременных величин имеют динамические погрешности, по допустимой величине которых подбирается измерительная аппаратура. Рассмотрим факторы, влияющие на величину этих погрешностей.

Измерительная система имеет приведенную массу m , воспринимаемую переменную измеряемую силу $F(t)$ (рис. 1). Масса соединена с пружиной, обладающей определенной жест-

костью C , и гасителем колебаний, характеризующимся коэффициентом успокоения P . О величине измеряемой силы судят по амплитуде z перемещения подвижной части прибора.

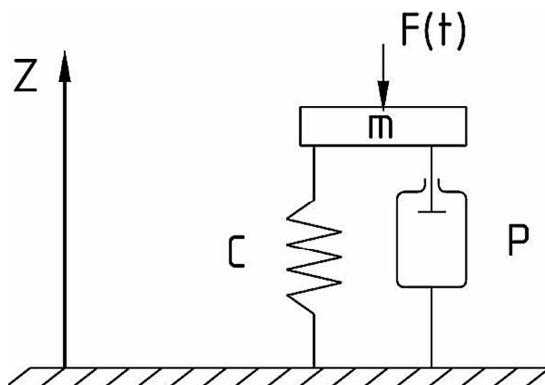


Рис. 1. Расчетная схема измерительной системы

Если предположить, что измеряемая сила изменяется по синусоидальному закону $F(t) = F_{\max} \sin \omega t$ (где F_{\max} – амплитудное значение силы, ω – круговая частота ее изменения), а сопротивление гасителя пропорционально скорости перемещения массы m , то дифференциальное уравнение движения подвижной части будет иметь вид:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + p \frac{dz}{dt} + cz = F_{\max} \sin \omega t.$$

Решение этого уравнения для случая непрерывной регистрации входной величины следующее:

$$z = \frac{F_{\max}}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{(q^2 - 1)^2 + 4\xi^2 q^2}} \sin \left(\omega t - \arctg \frac{2\xi q}{q^2 - 1} \right),$$

где $\xi = \frac{P}{2m\omega_0}$ – коэффициент демпфирования (затухания), характеризующий величину потерь энергии в системе;

$q = \frac{\omega}{\omega_0}$ – отношение частот вынужденных колебаний ω

и свободных незатухающих колебаний ω_0 , которые имела бы подвижная система при отсутствии в ней потерь энергии.

Максимальное значение амплитуды перемещения подвижной части в динамическом режиме:

$$Z_{\max} = \frac{F_{\max}}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{(q^2 - 1)^2 + 4\xi^2 q^2}}.$$

Если бы сила F_{\max} измерялась статически, то амплитуда отклонения подвижной части была равна:

$$Z_{\text{ст. max}} = \frac{F_{\max}}{C}.$$

Максимальная амплитуда отклонения в динамическом режиме измерений отличается от статической. Отношение максимальной амплитуды в динамическом режиме к максимальной амплитуде в статическом режиме характеризует амплитудную динамическую погрешность измерений:

$$\lambda = \frac{Z_{\max}}{Z_{\text{ст. max}}} = \frac{1}{\sqrt{(q^2 - 1)^2 + 4\xi^2 q^2}}.$$

Фазовая погрешность измерений характеризуется углом

$$\psi = -\text{arctg} \frac{2\xi q}{q^2 - 1},$$

где q всегда меньше 1.

Таким образом, регистрируемый инерционным прибором график изменения силы F может иметь амплитудные и фазовые погрешности (рис. 2).



Рис. 2. Динамически изменяющаяся входная величина и ее регистрация прибором

На рис. 3 показано изменение погрешностей измерений в зависимости от q .

Если $q = \frac{\omega}{\omega_0} = 0$, то независимо от величины коэффициента затухания ξ $\lambda = 1$, $\psi = 0$ и динамическая погрешность измерений отсутствует.

При $q = \frac{\omega}{\omega_0} = 1$ $\psi = 90^\circ$, одновременно имеет место резонанс по амплитуде, причем соотношение амплитуд при резонансе $\lambda_{\text{рез}} = \frac{1}{2\xi}$. В зависимости от величины коэффициента затухания величина амплитуды при резонансе может быть как больше, так и меньше статической. Например, при $\xi = 1$ $\lambda_{\text{рез}} = \frac{1}{2}$, при $\xi = \frac{1}{2}$ — $\lambda_{\text{рез}} = 1$; если же $\xi \rightarrow 0$, то $\lambda_{\text{рез}} \rightarrow \infty$ и система может выйти из строя.

При $q = \frac{\omega}{\omega_0} \rightarrow \infty$ $\lambda \rightarrow 0$ и $\psi = 180^\circ$, т. е. подвижная часть системы перестает реагировать на возмущающую силу.

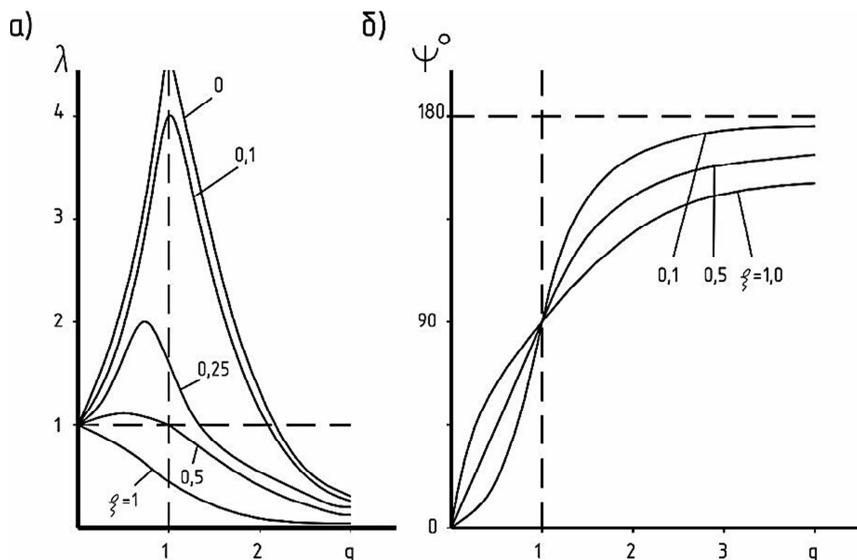


Рис. 3. Изменение погрешностей измерений в зависимости от отношения частот $q = \frac{\omega}{\omega_0}$:

a – амплитудные погрешности; *b* – фазовые погрешности

Для сведения динамических погрешностей к минимуму частота свободных колебаний ω_0 подвижной части измерительной системы должна быть более высокой.

Если же требуется, чтобы подвижная часть измерительной системы не реагировала на возмущающую силу (по этому принципу работают приборы для регистрации колебаний – виброграф, торсиограф и др.), частота свободных колебаний подвижной части должна быть наиболее низкой ($\lambda \rightarrow 0$ при $q \rightarrow \infty$).

Полностью избавиться от динамических погрешностей невозможно. Поэтому измерительную систему приходится подбирать по их допустимой величине.

Для получения динамической амплитудной погрешности 1–2 % частота свободных колебаний измерительной системы должна превышать частоту изменения измеряемой величины ω в 7–10 раз.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Возможности автоматизации информационных процессов

Под информационными процессами понимают восприятие, передачу, обработку и представление информации о тех или иных изучаемых объектах и явлениях. При исследовании ДВС применяют как отдельные приборы, так и целые измерительные и управляющие системы, звенья которых основаны на использовании средств механики, химии, акустики, оптики, электро- и радиотехники, электроники, свойств радиоактивных изотопов, спектрального анализа и т. п.

В настоящее время выпускаются специализированные системы для лабораторий двигателей, позволяющие частично или полностью автоматизировать многие виды измерений и даже некоторые типовые испытания.

Кроме того, в практике измерений широко используют и отдельные измерительные системы, комплектуемые из приборов, аппаратов и устройств общего назначения. Такие системы строят как по простейшей структурной схеме с входными, промежуточными и выходными звеньями прямого преобразования, так и по схеме с обратными связями, обеспечивающими измерения по нулевому или дифференциальному методам пу-

тем электрической компенсации выходного сигнала с датчика или компенсации самой неэлектрической измеряемой величины такой же физической величиной. Способ с обратными связями сложнее, но обеспечивает большую точность.

Структурная схема системы и точность измерений определяются свойствами и возможностями датчика.

3.2. Преобразователи неэлектрических величин в электрические. Датчики

При измерениях в ДВС в большинстве случаев осуществляется преобразование неэлектрических физических величин в электрические непосредственно или путем предварительного преобразования их в другие неэлектрические параметры (импульс света), косвенные для исследуемой величины. Поэтому различают датчики косвенного и прямого преобразования. Последние разделяют на параметрические и генераторные.

В параметрических входная неэлектрическая величина, действующая на участок электрической цепи, питаемой от внешнего источника ЭДС, вызывает изменение соответствующего электрического параметра: сопротивления, емкости, индуктивности и т. д.

К генераторным относятся датчики, преобразователи в которых под действием входной неэлектрической величины становится источником ЭДС.

Датчики должны иметь линейную характеристику, высокие чувствительность, разрешающую способность, быстродействие и быть удобными в применении.

3.2.1. Датчики сопротивления

В простейшем случае это датчики реохордного типа, которые выполняются по схеме реостатов и потенциометров для сравнительно больших перемещений.

В исследованиях широко применяются датчики, использующие свойства *тензосопротивлений*. Они бывают проволочные, фольговые и полупроводниковые. Их действие основано на тензоэффекте (тензорезистивном эффекте), характеризующемся изменением удельного сопротивления проводящих материалов под действием растягивающих или сжимающих деформаций.

Известно, что величина электрического сопротивления проводника определяется из соотношения

$$R = \rho \frac{l}{F},$$

где R – сопротивление, Ом;

ρ – удельное сопротивление, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

l – длина провода, м;

F – площадь поперечного сечения, мм^2 .

На основании сказанного можно утверждать, что

$$R = f(l, F, \rho).$$

Когда проволоку или другой проводник подвергают действию растягивающей силы, то одновременно с изменением ее длины и сечения изменяется абсолютная величина сопротивления ΔR .

Относительное изменение сопротивления определяется по следующему уравнению:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \cdot \varepsilon,$$

где R – сопротивление недеформированной проволоки;

ΔR – абсолютное приращение сопротивления;

S – коэффициент тензочувствительности;

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ – относительная деформация (удлинение) тензочув-

ствительной проволоки.

При подборе материалов для тензосопротивлений предпочтение отдают материалам с возможно большей величиной коэффициента ρ . Желательно, чтобы тензочувствительный материал имел возможно меньший температурный коэффициент сопротивления.

Наиболее подходящими материалами для изготовления тензочувствительной проволоки признаны медно-никелевые сплавы (константан, адванс), нихромы и никель-хроможелезные сплавы (элинвар), обладающие высоким удельным сопротивлением. Коэффициент тензочувствительности высокоомных проволок лежит в пределах 1,9–3,5.

Проволочные тензорезисторы (тензодатчики) представляют собой плоскую петлеобразную проволочную обмотку прямоугольной формы (решетку), к концам которой припаяны или приварены относительно толстые выводы из медной луженой проволоки или фольги (рис. 4). Проволочная решетка с помощью специального клея закрепляется на тонкой прямоугольной полоске из бумаги, клеевой или лаковой пленки, служащей для нее основой (подложкой). Обычно применяют проволоку диаметром 0,02–0,05 мм.

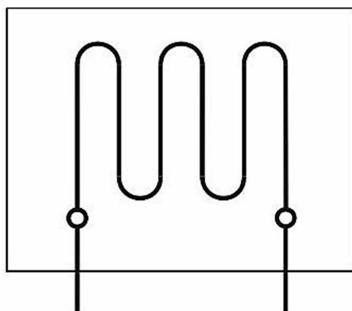


Рис. 4. Проволочный тензорезистор

Для изготовления тензочувствительных элементов и наклеивания их на испытуемый объект применяют различные клеящие составы. При нормальных и повышенных температурах работы используют ацетоноцеллулоидные, бакелитофенольные (БФ) клеи, лаки на основе органических смол и другие клеящие составы; в условиях высоких температур (до 800 °С) – органические цементы и специальные цементы на основе жидкого стекла.

Базой тензопреобразователя называют длину участка детали, занимаемого тензосопротивлением. Обычно она составляет 3–25 мм. Сопротивление тензодатчика выбирают из расчета 30–200 Ом для статических измерений и 500–1000 Ом для динамических.

Фольговые тензорезисторы. У фольговых тензорезисторов чувствительная решетка изготовлена из очень тонкой (2–10 мкм) константановой фольги. Из фольги часть металла удалена с помощью травления кислотой, а оставшаяся часть образует решетку с выводами. Решетка может иметь любой нужный рисунок, что является существенным преимуществом фольговых тензосопротивлений.

Основой фольговых тензорезисторов является тонкий слой электроизоляционного лака.

Фольговые тензорезисторы делятся на три основных типа: прямоугольные, решеточные и мембранные. В зависимости от числа чувствительных решеток, размещенных на одной основе, они делятся на одноэлементные и многоэлементные, имеющие две, три или четыре решетки.

Тензорезисторы прямоугольного типа применяются для измерения деформации в любом заданном направлении при одноосном напряженном состоянии детали (рис. 5). Все они являются одноэлементными.

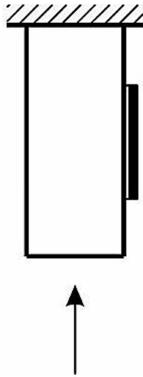


Рис. 5. Фольговый тензорезистор прямоугольного типа

Решеточными называются тензорезисторы, состоящие из двух, трех или четырех решеток, расположенных на одной основе под определенным углом друг к другу (рис. 6). Они применяются для определения величины и направления главных деформаций при плосконапряженном состоянии испытываемой детали.

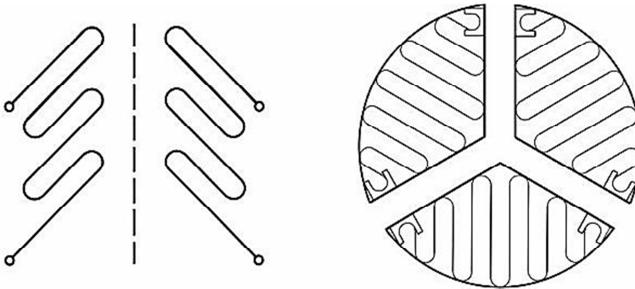


Рис. 6. Фольговые тензорезисторы решетчатого типа

Если направления главных деформаций заранее известны, то применяются двухэлементные решетки (например, для определения крутящего момента). При неизвестном направлении – решетки сложной формы (для определения сложных деформаций).

С помощью мембранных тензорезисторов измеряют деформации радиального и тангенциального направлений, возникаю-

щие при изгибе круглых пластинок (мембраны, диафрагмы, диски и т. п.) (рис. 7).

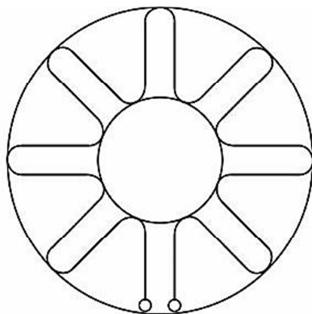


Рис. 7. Фольговые тензорезисторы мембранного типа

Параметры тензорезисторов

База l – длина чувствительного элемента (решетки) тензорезистора в мм. Выпускаются тензорезисторы с базой 1–100 мм.

Номинальное сопротивление R – значение активного сопротивления чувствительного элемента (решетки) тензорезистора в Ом. Сопротивление тензорезисторов промышленного производства – 80–100 Ом. Для статических измерений нужны тензорезисторы с сопротивлением 30–200 Ом, для динамических – 500–1000 Ом.

Рабочий ток I_p – допустимый ток в мА, при котором не происходит заметного нагрева тензорезистора, влияющего на свойства тензочувствительного элемента (решетки), основу и клеевое соединение.

Чем больше ток, проходящий через решетку тензорезистора, тем выше уровень электрического сигнала, в который преобразуется измеряемая деформация. Поэтому с точки зрения увеличения чувствительности измерительной схемы желательно пропускать через тензорезистор как можно больший ток.

При определении рабочего тока питания исходят из плотности тока 45 А/мм² для проволочных тензорезисторов и 60 А/мм² – для фольговых.

Предел измеряемой деформации ε_{\max} – наибольшее значение относительной деформации в мкм/м (или в процентах), при которой завод-изготовитель гарантирует надежную работу тензорезисторов и строгую линейность их характеристики преобразования (т. е. линейность зависимости $\frac{\Delta R}{R} = f(\varepsilon)$).

Для проволочных и фольговых тензорезисторов верхний предел измеряемой деформации принят равным 3000 мкм/м (0,3 %).

Температурный диапазон работоспособности D_t – область изменения температуры, при которой погрешности измерений, обусловленные влиянием температуры на свойства тензорезисторов, не выходят за допустимые пределы (до 800 °С).

Полупроводниковые тензорезисторы

В полупроводниковых тензорезисторах в качестве чувствительного элемента применяют полупроводниковые материалы, характеризующиеся необычайно большим тензорезистивным эффектом, наиболее ярко выраженным при действии механических нагрузок в направлении одной из главных осей кристалла.

Наиболее пригодными для изготовления тензорезисторов признаны германий и кремний (можно индий, галлий и др.). Лучшими являются кремниевые, которые представляют собой тонкую и узкую пластину из монокристалла кремния, вырезанную в определенном кристаллическом направлении. К обоим концам пластины закреплены короткие выводы (из золотой или медной проволоки).

3.2.2. Индуктивные датчики

Индуктивные датчики представляют собой электромагнитные устройства, индуктивность которых изменяется под действием входной неэлектрической величины – перемещения.

Индуктивность L электромагнитной системы с катушкой из ω витков выражается соотношением

$$L = \frac{\omega^2}{R_M} = \frac{\omega^2}{R_{M.СТ.} + R_\delta} = \frac{\omega^2}{R_{M.СТ.} + \frac{2\delta}{\mu_0 S}},$$

где R_M – полное сопротивление магнитной цепи;

$R_{M.СТ.}$ – магнитное сопротивление участка из стали;

R_δ – магнитное сопротивление воздушных зазоров;

δ – величина воздушного зазора;

S – площадь воздушного зазора;

μ_0 – магнитная проницаемость воздушного зазора, $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Г/м.

Перемещения, связанные с изменением δ и S , являются входной величиной преобразователя, а изменение индуктивности его обмотки – выходной. Линейный участок характеристики индуктивного преобразователя составляет всего 10–15 % от исходной величины δ воздушного зазора.

Чтобы увеличить длину линейного участка, систему составляют из двух преобразователей, включают их в соседние плечи измерительного моста.

3.2.3. Емкостные датчики

Емкостные датчики представляют собой плоские конденсаторы, задающей переменной величиной в которых служит зазор между пластинами или же активная площадь этих пластин (рис. 8). В подавляющем большинстве их изготавливают с переменным зазором между пластинами. Емкость такого конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{(3,6\pi\delta)},$$

где ϵ – диэлектрическая постоянная;
 S – площадь одной пластинки, мм^2 ;
 δ – величина зазора между пластинами, мм.

При изменении δ емкость конденсатора изменяется по гиперболической зависимости. Поэтому для получения датчика с линейной характеристикой конденсатор выполняют с малым зазором между пластинами (не более 0,5 мм). Емкостные датчики отличаются высокой чувствительностью (до 500 В/мм) и чаще всего включаются в мостовую измерительную схему. Они обычно используются для перемещений длиной 0,2–0,4 мм.

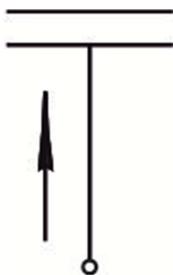


Рис. 8. Схема емкостного датчика

3.2.4. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики основаны на принципе прямого пьезоэлектрического эффекта, который заключается в том, что на некоторых кристаллах (кварц, турмалин, сегнетовая соль, титанат бария и др.) возникают электрические заряды при сжатии или растяжении их в определенных направлениях. Обратный пьезоэффект вызван изменением размеров кристалла под влиянием приложенного заряда. Наиболее широкое применение имеют датчики, построенные на основе кристаллов кварца SiO_2 .

Под действием силы F_x на гранях кристаллов возникают заряды, равные по величине, но противоположные по знаку. Величина зарядов не зависит от геометрических размеров пластины и определяется по соотношению

$$q = d_1 \cdot F_X,$$

где d_1 – постоянный коэффициент, называемый пьезоэлектрическим модулем, $d_1 = 2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

В практике приходится иметь дело с величиной потенциала, до которого заряжается система, состоящая из кварцевого столбика, соединительного кабеля и входного конденсатора усилителя постоянного тока. Для этого случая величина потенциала

$$U = 21 \left(\frac{n \cdot F}{c} \right), \text{ В,}$$

где n – число пластин кварца;

F – сила, действующая на кварц, кгс;

c – емкость системы, мкФ.

Высокая жесткость кварцевых кристаллов позволяет создавать датчики с частотой собственных колебаний, равной 15–25 кГц.

3.2.5. Фотоэлектрические датчики

Фотоэлектрические датчики базируются на преобразовании энергии светового потока в электрическую с помощью различных фотоэлементов.

По принципу действия различают фотоэлементы с внешним и внутренним фотоэффектом, вентильные и фотоумножительные.

Световой характеристикой фотоэлементов называют зависимость фототока I_Φ от интенсивности светового потока Φ (или освещенности), определяющую чувствительность S . Чувствительность фотоэлементов зависит так же от длины волны падающих лучей (спектральная характеристика), частоты изменения светового потока и величины напряжения, приложенного к фотоэлементу (частотная и вольт-амперная характеристики).

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

Эффективная мощность N_e и мощность, затрачиваемая на преодоление механических потерь, $N_{\text{мех}}$ (или механический КПД $\eta_{\text{мех}}$) являются основными показателями двигателей и определяются практически при любом виде их испытаний.

В условиях заводов и НИИ двигатели испытывают на тормозных стендах. При этом мощность двигателя определяют по крутящему моменту и частоте вращения коленчатого вала:

$$N_e = \frac{M \cdot n}{9550}, \text{ кВт.}$$

Крутящий момент двигателя может измеряться двумя способами:

1. С помощью тормозных динамометров или просто тормозов, в которых одновременно осуществляются поглощение работы двигателя и измерение среднего крутящего момента.
2. Торсионными динамометрами, измеряющими момент, передаваемый ими от двигателя к потребителю. В отличие от тормозов эти устройства выполняют только функции измерения момента.

Тормоза по принципу, использованному для создания тормозного момента, подразделяются на механические, воздушные, гидравлические, электрические и индукторные.

Для испытания двигателей обычно применяют гидравлические, индукторные и электрические тормозные установки. Основу их конструкции составляют ротор, вращающийся вместе с валом двигателя, и статор, совершающий угловые перемещения около оси ротора при его балансирной подвеске. Тормоза с балансирным закрепляемым корпусом называют балансирными машинами.

Главными определяющими параметрами тормозов служат тормозная мощность N_e (кВт) тормозной момент M (Н·м) и допустимая частота вращения ротора n (мин^{-1}).

В состав тормоза входят силоизмерительные (или весовые) устройства, измеряющие крутящий момент (M) или определяющие усилие (P), развиваемое двигателем. В последнем случае $M = P \cdot l$, где l – плечо тормоза, величина которого указывается в паспорте.

4.1. Гидротормоза

Гидротормоза отличаются простотой конструкции и большой энергоемкостью. Их принцип действия основан на использовании сопротивления, возникающего при движении тел в жидкости. Поглощаемая в гидротормозах энергия в конечном счете превращается в тепловую и затрачивается на нагрев жидкости (обычно воды).

Конструкции гидротормозов довольно разнообразны. Для торможения двигателя применяют дисковые, штифтовые и лопастные тормоза. Устройство и принцип действия гидравлических тормозов рассмотрим на примере дискового тормоза (рис. 9).

Ротор 1 выполнен в виде гладкого диска и жестко закреплен на валу 5 , который соединяется с валом двигателя. Ротор вращается внутри кожуха-статора 2 , имеющего возможность перемещаться на шариковых подшипниках 4 . Вода в тормоз подается через приемные воронки 3 . Нагревающуюся при работе воду отводят через регулировочный вентиль 6 .

Вращающийся ротор увлекает воду, и она под действием центробежной силы прижимается к внутренней цилиндрической поверхности кожуха. Сила гидравлического сопротивления, действующая на ротор при его движении в слое воды, создает тормозной момент, который направлен против вращения ротора и уравнивается равным ему, но противоположно направленным крутящим моментом, приложенным к валу тормоза.

Кожуху передается через воду момент, равный тормозному моменту, но противоположно направленный. Этот момент будет

поворачивать кожух в направлении вращения ротора. Величину этого момента измеряют с помощью весов или динамометра.

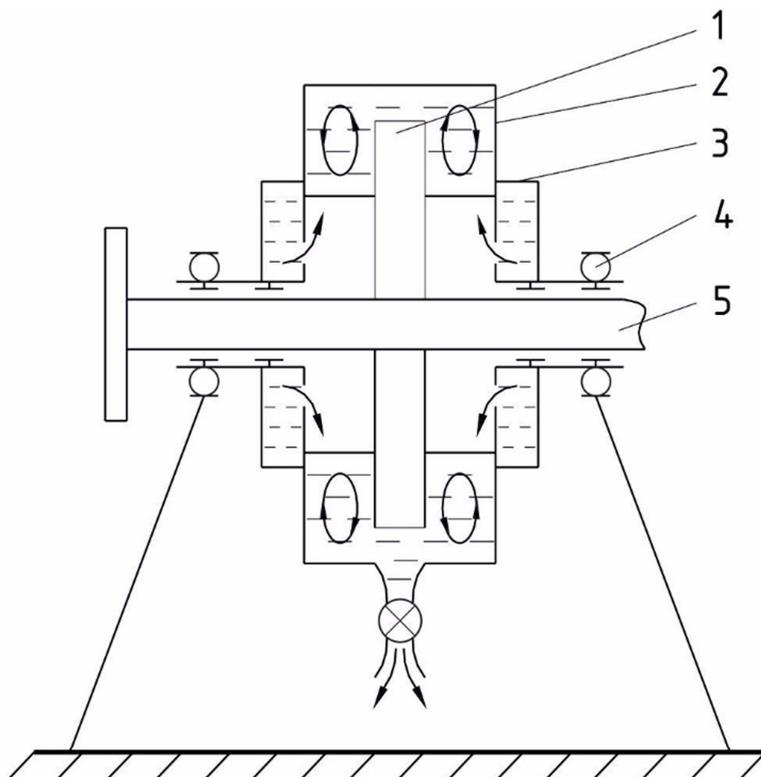


Рис. 9. Конструктивная схема дискового гидравлического тормоза

Регулирование величины тормозного момента осуществляется изменением количества, а следовательно, и толщины слоя воды при помощи регулировочного вентиля.

В отличие от дисковых штифтовые тормоза имеют ротор, выполненный в виде барабана, на ободе которого в несколько рядов расположены стальные трехгранные штифты. В статоре с внутренней его стороны укреплены также штифты, между которыми с некоторым зазором проходят штифты вращающегося ротора (рис. 10).

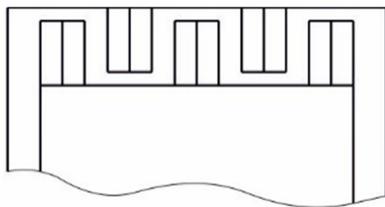


Рис. 10. Статор и ротор штифтового тормоза

Штифтовые тормоза, как и дисковые, являются тормозами переменного наполнения. В таких тормозах колебания давления воды в водопроводной сети могут вызвать колебания поглощаемой мощности. Поэтому питание таких тормозов надо производить из баков постоянного уровня.

Лопастные гидротормоза относятся к тормозам с постоянным наполнением. По конструкции они напоминают гидромолфу. Тормоза этого типа сложны, но имеют более устойчивые характеристики и обладают большей энергоемкостью, чем штифтовые и дисковые.

Регулировку таких тормозов осуществляют при помощи задвижек, вводимых в боковой зазор между ротором и статором. Задвижкой уменьшают величину активно действующей поверхности ротора путем частичного перекрытия полостей и тем самым уменьшают сопротивление ротору.

Оценку поглощаемой тормозом мощности в зависимости от частоты вращения ротора проводят по характеристикам тормоза, представляющим собой зависимость $N = f(n)$. Различают два вида характеристик: теоретические и действительные.

Теоретическая характеристика гидравлических тормозов в общем случае представляет собой параболу и может быть выражена уравнением (рис. 11)

$$N_T = a \cdot n^3,$$

где a – коэффициент пропорциональности.

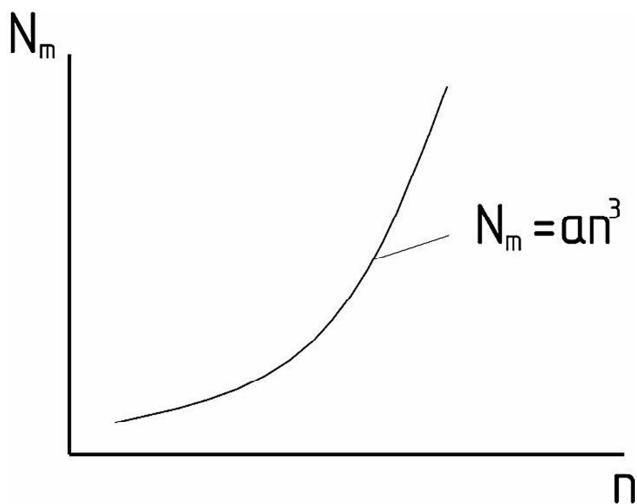


Рис. 11. Теоретическая скоростная характеристика гидротормоза

Действительная характеристика гидротормоза позволяет судить о возможности его применения для конкретного двигателя (рис. 12).

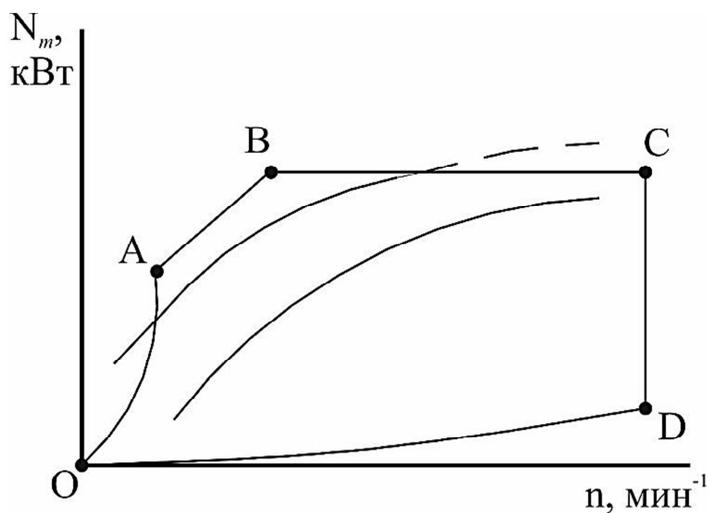


Рис. 12. Действительная скоростная характеристика гидротормоза

Область режимов работы гидротормоза ограничена контуром $OABCD$. При выборе тормоза для двигателя необходимо, чтобы любая ожидаемая характеристика двигателя полностью вписывалась в рабочую область тормоза.

На диаграмме участок OA соответствует работе тормоза по теоретической характеристике с максимальным заполнением тормоза (при полной загрузке). Зависимость поглощаемой мощности от частоты вращения ротора на этом участке является кубической. В точке A тормозной момент достигает максимума, на измерение которого рассчитано тормозное устройство, и дальнейшее увеличение поглощаемой мощности возможно только при постоянном крутящем моменте путем увеличения частоты вращения вала тормоза.

В точке B поглощаемая тормозом мощность ограничивается условиями допускаемой температуры воды, а дальнейшее повышение частоты вращения возможно лишь в том случае, если мощность остается постоянной, т. е. при одновременном снижении тормозного момента.

В точке C частота вращения вала ограничивается прочностью ротора.

Нижняя область, ограниченная линией OD , соответствует мощности, поглощаемой тормозом без заполнения его водой, в основном за счет потерь на трение в подшипниках.

К недостаткам гидротормозов относятся:

- невозможность рекуперации энергии, вырабатываемой двигателем;
- невозможность проворачивания коленчатого вала двигателя от тормоза и большие трудности автоматизации регулирования тормозов;
- узкий диапазон регулирования (по мощности – 35–40 %, по частоте 2–8 %).

Достоинством гидротормозов является простота конструкции, обуславливающая их невысокую стоимость и несложный уход.

4.2. Электротормоза

Электротормоза в последнее время получают все более широкое распространение. Такие тормоза подразделяются на:

- 1) тормоза постоянного тока;
- 2) тормоза переменного тока;
- 3) индукторные тормоза.

Электрические тормоза постоянного и переменного тока по сравнению с тормозами других типов имеют два существенных преимущества:

– они могут быть использованы в качестве источника энергии для прокрутки испытуемого двигателя (пуск, обкатка, определение механических потерь);

– при работе тормозных установок в тормозных режимах можно использовать вырабатываемую ими энергию.

Приблизительно тормозная мощность может быть замерена по показаниям вольтметра, включенного в цепь нагрузки, что позволяет использовать в качестве электротормоза любой электрический генератор. На практике такой способ применяется редко, т. к. не обеспечивает требуемой точности.

Обычно тормозную мощность определяют по величине реактивного крутящего момента с помощью балансирных и весовых устройств.

Регулирование мощности, потребляемой динамомашинной, осуществляется ступенями: грубо – с помощью нагрузочных реостатов в цепи якоря – и плавно – путем изменения тока в обмотке возбуждения динамомашинной (параллельное и последовательное возбуждение).

4.2.1. Электротормоза постоянного тока

Они получили наибольшее распространение и называются также балансирными динамомашинными (рис. 13).

Якорь 1, как и в обычной электрической машине, вращается в подшипниках, укрепленных в крышке статора 2. Статор

установлен на шариковых или роликовых подшипниках в стойках 4 и может качаться относительно оси, совпадающей с осью вращения якоря.

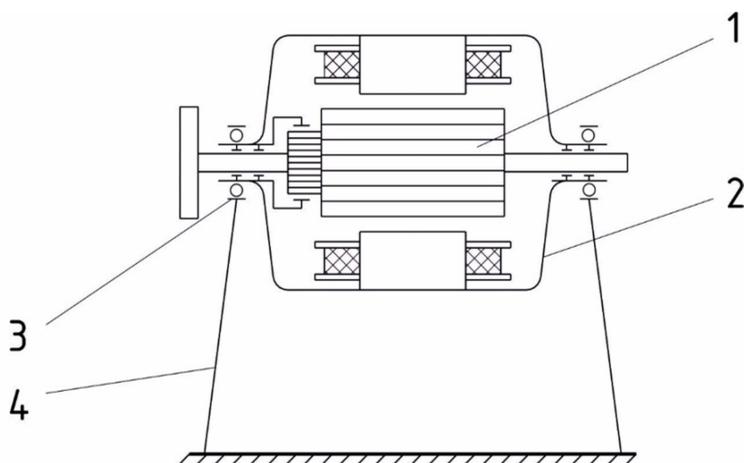


Рис. 13. Конструктивная схема электротормоза постоянного тока

В электрическом отношении балансирная динамомашинa не отличается от обычной машины постоянного тока. Подводимая к ней механическая мощность превращается в электрическую, которая затем превращается в тепло на нагрузочных реостатах или используется в сети электрического тока.

Измерение мощности двигателя производится по реактивному моменту на статоре. Этот момент создается силами взаимодействия электрических полей якоря и статора и равен моменту, приложенному к якорю. Измерение этого момента производится с помощью весов.

Трение в подшипниках якоря учитывается весами, неучтенным остается трение в подшипниках статора.

Наряду с отмеченными выше достоинствами электротормозов следует отметить простоту регулирования, что позволяет сравнительно легко автоматизировать и программировать процесс испытаний; высокую стабильность и точность измерений.

К недостаткам тормозов постоянного тока относятся:

- ограниченная частота вращения (6000 мин^{-1} для малых машин, 3000 мин^{-1} – для больших);
- большие габариты тормозной установки в целом (динамомашин, трехмашинный агрегат, шкаф, пункт управления, нагрузочные сопротивления);
- высокая стоимость.

Теоретическая характеристика электрического тормоза (постоянного тока) может быть записана в виде:

$$N_{\mathcal{E}} = an^2.$$

Мощность, поглощаемая генератором постоянного тока, пропорциональна квадрату частоты вращения его вала (рис. 14). Она может быть представлена семейством параболических кривых независимо от того, изменяется ли сопротивление R цепи якоря или величина магнитного потока полюсов статора, оказывающих влияние на постоянную величину a .

Каждому значению сопротивления в цепи якоря при неизменном магнитном потоке присущи определенные значения мощности, зависящие от частоты вращения вала.

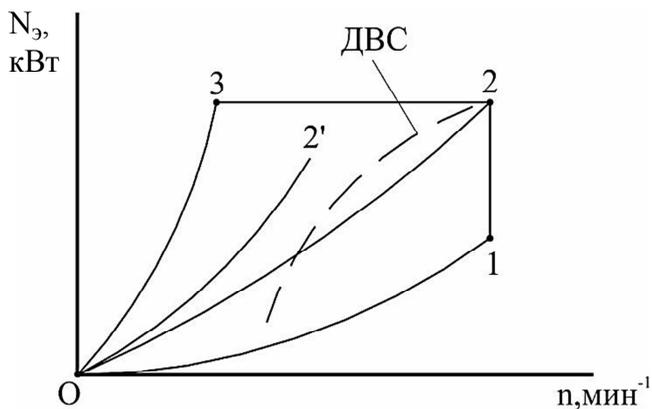


Рис. 14. Скоростная характеристика электротормоза

Линия 0–1 соответствует максимальному сопротивлению в цепи якоря, а линия 0–3 – минимальному. Линия 0–3–2 ограничивает те максимальные значения мощности, которые может поглощать генератор без перегрева в течение длительного времени. Поле возможных режимов торможения (внешняя характеристика) ограничивается линиями 0–1–2–3–0.

Для увеличения мощности, снимаемой с исследуемого двигателя, следует увеличить магнитный поток (силу тока возбуждения машины) и одновременно уменьшить сопротивление в цепи якоря.

4.2.2. Тормоза переменного тока

Это асинхронные или синхронные электрические машины, регулируемые с помощью реостатов и различных машинных преобразователей.

Применение получили асинхронные машины с фазным якорем, в цепь которого включают управляемое сопротивление. Для обеспечения плавного регулирования применяют жидкостные реостаты. Последние не совсем удобны в эксплуатации, громоздки и не обеспечивают широких пределов регулирования (до 1000–1100 мин⁻¹ – прокрутка, от 1100–2000 мин⁻¹ – торможение). Поэтому тормоза такого типа находят практическое применение только на ремонтных предприятиях для холодной и горячей обкатки двигателей.

4.2.3. Индукторные тормоза

В этих тормозах, называемых также индукционными, электромагнитными, торможение происходит за счет вихревых токов, возникающих в статоре при вращении магнитного ротора (рис. 15).

Принцип действия индукторного тормоза можно пояснить следующим образом. Если металлический диск вращать между полюсами магнита так, чтобы радиус все время пересекал маг-

нитный поток, то в теле диска возникнут вихревые токи (токи Фуко). Взаимодействие магнитного поля, вызываемого вихревыми токами, в диске с полем магнита будут создавать тормозной момент так же, как и в любой электрической машине.

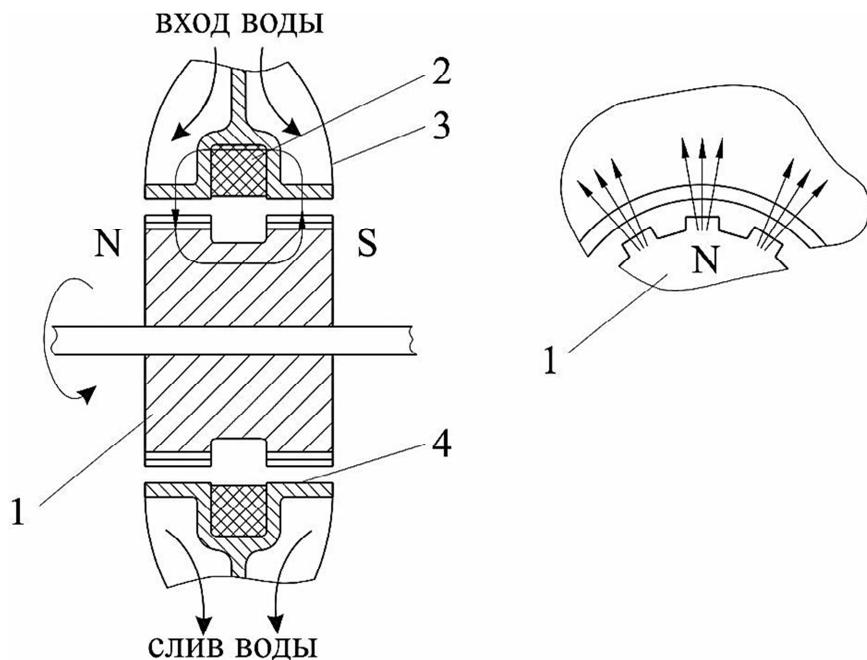


Рис. 15. Конструктивная схема индукторного тормоза

Для упрощения отвода теплоты, выделяющейся при поглощении тормозом мощности, магнитным делают ротор, а не статор, как в примере.

Ротор 1 представляет собой двухрядное зубчатое колесо с прямоугольной или трапециевидальной формой зуба, которое вращается внутри статора 3. Статор обычно разделен на две половины, между которыми помещается катушка возбуждения 2. Она создает магнитный поток, концентрирующийся в местах расположения зубьев ротора.

Внутренняя поверхность статора образована двумя гильзами 4, ширина которых равна ширине зуба ротора. При вращении ротора отдельные участки гильз поочередно намагничиваются и размагничиваются, при этом в гильзах возникают вихревые токи, нагревающие их.

Взаимодействие основного магнитного поля с полем вихревых токов создает сопротивление вращению ротора, т. е. в индукторном тормозе подводимая к ротору механическая энергия превращается сначала в электрическую, а затем в тепловую. Для обеспечения отвода теплоты индукторные тормоза имеют систему охлаждения. В большинстве случаев используется водяное охлаждение. В особо быстроходных конструкциях ротор (индуктор) охлаждает воздухом.

Индукторные тормоза регулируют путем изменения величины тока возбуждения (т. е. изменяется магнитный поток). Этот поток образует замкнутый контур. Вследствие этого вращение ротора вызывает поочередное намагничивание гильз 4, приводящее к возникновению в них вихревых токов, последние и образуют магнитное поле, взаимодействующее с основным магнитным полем.

Особенность протекания характеристики индукторного тормоза определяется тем, что развиваемый тормозом момент при заданном постоянном токе возбуждения вначале резко возрастает, а далее с увеличением частоты вращения остается постоянным (рис. 16).

В точке *A* тормоз имеет максимальную мощность. Точка *B* соответствует максимальному скоростному режиму. Участок *OC* характеризует собственные механические потери.

Индукторный тормоз прост, компактен, имеет высокую энергоемкость, более надежен, чем тормоза постоянного тока, значительно дешевле их в изготовлении и в эксплуатации.

Недостатками индукторных тормозов являются принципиальная невозможность рекуперации поглощаемой тормозом энергии и невозможность использования их для проворачивания коленчатого вала двигателя.

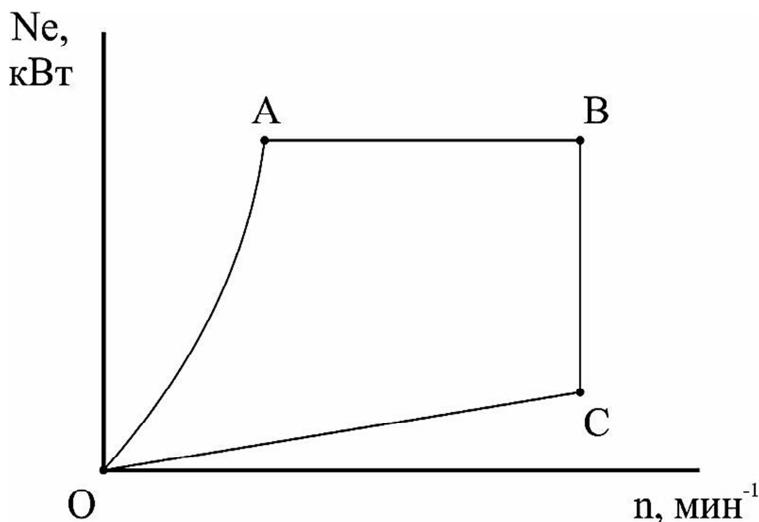


Рис. 16. Скоростная характеристика индукторного тормоза

4.2.4. Устойчивость работы системы тормоз – двигатель

Важнейшим показателем качества тормоза является степень устойчивости равновесного режима его работы. Она характеризуется способностью тормоза сохранять постоянную угловую скорость при неизменном положении регулирующих органов тормоза и двигателя и восстанавливать ее при изменении в результате кратковременного нарушения равновесия крутящего и тормозного моментов.

Устойчивость тормоза определяется видом зависимости тормозного момента от частоты вращения (крутизной характеристики тормоза) и степенью постоянства тормозного момента при неизменном положении регулирующего органа.

Характеристику тормоза в общем виде можно представить степенной зависимостью:

$$N_e = a \cdot n^m,$$

где $m = 1$ – для индукторного тормоза;
 $m = 2$ – для электрического;
 $m = 3$ – для гидравлического.

Рассмотрим совмещение характеристики двигателя и тормозов, которые пересекаются в точке равновесия O при n мин⁻¹ (рис. 17).

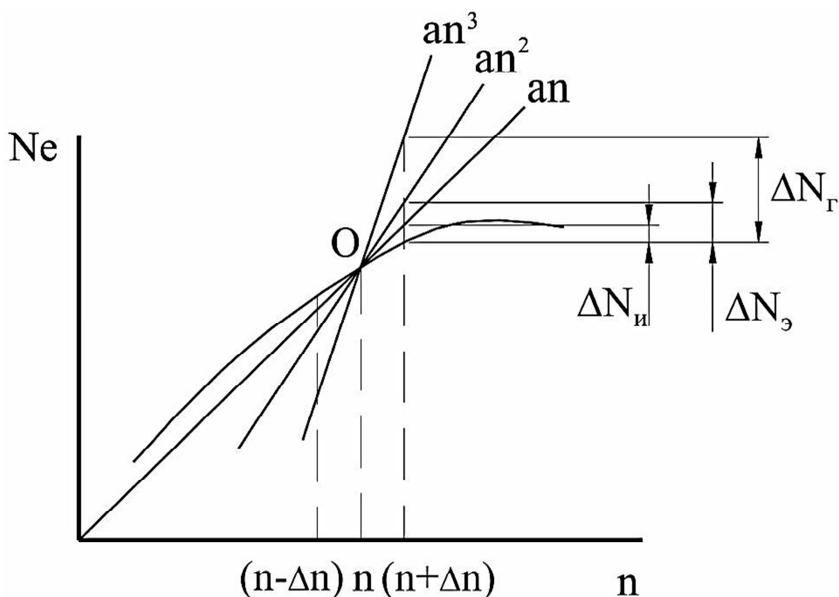


Рис. 17. Устойчивость системы тормоз – двигатель

Пусть по какой-либо причине произошло кратковременное нарушение равновесия, и частота вращения возросла до $n + \Delta n$.

Тогда тормозная мощность будет превосходить мощность двигателя на $\Delta N_{и}$, $\Delta N_{э}$, $\Delta N_{г}$ для индукторного, электрического и гидравлического тормозов соответственно, что и обеспечит возврат системы на исходный скоростной режим без воздействия оператора.

Аналогичный процесс будет и при уменьшении частоты вращения до $n - \Delta n$, при этом мощность двигателя будет

больше тормозной и частота вращения автоматически увеличится до нормы.

Наибольшую крутизну кривой тормозной мощности обеспечивают гидравлические тормоза, соответственно они обладают наибольшей устойчивостью.

Следует отметить, что приведенные закономерности характерны для условий большой загрузки тормозов. На малых нагрузках вследствие небольшой радиальной толщины водяного кольца и трудностей его точного поддержания (регулирования) гидравлические тормоза работают неустойчиво и уступают электрическим.

С точки зрения стабильности торможения (способность долго поддерживать установленный тормозной момент) предпочтительней тормоза постоянного тока.

При выборе типа тормоза необходимо учитывать и возможность автоматизации управления. По этому показателю также преимущества имеют электрические тормоза.

4.3. Методы определения механических потерь двигателя

Механические потери в ДВС, включающие трение, затраты мощности на привод вспомогательных агрегатов и насосные потери, на номинальном режиме составляют 5–25 % индикаторной мощности.

Расчетные методы их определения являются ориентировочными. Поэтому в практике исследований ДВС прибегают к экспериментальным методам определения механических потерь.

Методы определения суммарной мощности механических потерь и механического КПД двигателя можно разделить на косвенные и прямые.

При косвенных методах определение этих величин ведется по индикаторной и эффективной мощности двигателя (путем обработки результатов индицирования), по часовому расходу топлива, по нагрузочным характеристикам. При прямых мето-

дах – проворачиванием коленчатого вала двигателя посторонним источником энергии, выключением отдельных цилиндров, методом выбега.

4.3.1. Прямые методы

Метод выключения цилиндров

Метод выключения цилиндров достаточно прост и состоит в том, что индикаторная мощность отключенного цилиндра равна:

$$N_{i(x)} = N_{e(n)} - N_{e(n-1)},$$

где $N_{e(n)}$ и $N_{e(n-1)}$ – эффективные мощности соответственно при всех n и $n - 1$ работающих цилиндрах, определяемые по динамометру тормозного стенда при заданной частоте вращения.

При выводе выражения предполагается, что индикаторная мощность каждого из работающих цилиндров двигателя не изменяется при выключении одного из них и мощность механических потерь каждого цилиндра не меняется при его выключении, т. е. $N_{\text{мех.}n} = N_{\text{мех.}n-1}$ (механические потери остаются постоянными), тогда

$$\begin{aligned} N_{i(x)} &= N_{i(n)} - N_{i(n-1)} = (N_{e(n)} + N_{\text{мех.}n}) - \\ &- (N_{e(n-1)} + N_{\text{мех.}(n-1)}) = N_{e(n)} - N_{e(n-1)}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что второе допущение является довольно грубым. Первое допущение является сомнительным в связи с тем, что на режиме работы двигателя с выключением одного из цилиндров существенно изменяется наполнение действующих цилиндров. При этом индикаторная мощность работающих цилиндров изменяется как у дизелей, так у двигателей с внешним смесеобразованием.

Данный метод не нашел широкого применения.

Метод проворачивания коленчатого вала двигателя от постоянного источника

Этот метод наиболее часто используется для определения суммарных механических потерь. Он сводится к тому, что коленчатый вал двигателя, работавшего на определенном режиме, немедленно после выключения подачи топлива или зажигания прокручивается балансирной динамомашинной с той же частотой вращения.

Измеренная по показаниям динамометра и частоте вращения мощность, затрачиваемая на проворачивание вала, отождествляется с мощностью механических потерь.

При использовании этого метода погрешности определения механических потерь возникают вследствие изменения:

- потребляемой мощности у некоторых систем и агрегатов (насоса, ГРМ и др.);
- работы насосных ходов;
- мощности трения деталей.

Поэтому мощность, определяемая прокруткой, является число условной, и этот метод обычно применяется при сравнительных заводских испытаниях одной и той же модели.

Метод прокручивания рекомендуется ГОСТом для определения условных механических потерь, мощности, потребляемой вентилятором, и характеристики прокручивания коленчатого вала.

Метод одиночного выбега

Этот метод заключается в прокручивании коленчатого вала двигателя при отключении подачи топлива или зажигания за счет запаса кинетической энергии его движущихся деталей. Эта энергия затрачивается на преодоление механических потерь (если выбег производится с режима холостого хода) или на преодоление механических потерь и внешней нагрузки (если выбег производится с одного из рабочих режимов).

Мощность, развиваемая двигателем за счет запаса кинетической энергии:

$$N = I\omega \cdot \frac{d\omega}{d\tau},$$

где I – приведенный момент инерции подвижных деталей;

ω – угловая скорость коленчатого вала;

$\frac{d\omega}{d\tau}$ – угловое ускорение (замедление) коленчатого вала.

Если выбег производится с режима холостого хода, то

$$N_{\text{мех.}} = I\omega \left(\frac{d\omega}{d\tau} \right)_{\text{х.х.}}$$

Следовательно, если известен приведенный момент инерции I , то, регистрируя угловую скорость и угловое ускорение вала двигателя при выбеге, определяют мощность механических потерь.

Данному методу присущи все погрешности метода прокрутки и погрешности, связанные с определением момента инерции, угловой скорости и ускорения.

Поэтому рассмотренный метод нельзя считать перспективным.

Метод двойного выбега

Этот метод более точный. При расчетах мощность представлена в виде:

$$N = k^2 \cdot I \cdot n \cdot \frac{dn}{d\tau},$$

где $k = \frac{\pi}{30}$.

Это выражение применяется к двум выбегам с одной частоты вращения, но происходящих в разных условиях: один выбег – без отключения внешней нагрузки (например, тормоза), а второй – с режима холостого хода. Тогда применительно к первому и второму выбегам можно записать:

$$N_1 = N_e + N_{\text{мех.}} = N_i = k^2 \cdot I \cdot n \cdot \left(\frac{dn}{d\tau} \right)_{\text{н.}} ;$$

$$N_2 = N_{\text{мех.}} = k^2 \cdot I \cdot n \cdot \left(\frac{dn}{d\tau} \right)_{\text{х.х.}} ,$$

тогда

$$\eta_{\text{мех.}} = \frac{N_i - N_{\text{мех.}}}{N_i} = \frac{\left(\frac{dn}{d\tau} \right)_{\text{н.}} - \left(\frac{dn}{d\tau} \right)_{\text{х.х.}}}{\left(\frac{dn}{d\tau} \right)_{\text{н.}}} = \frac{\text{tg}\alpha_{\text{н.}} - \text{tg}\alpha_{\text{х.х.}}}{\text{tg}\alpha_{\text{н.}}} .$$

В этом случае задача сводится к снятию двух тахограмм выбега и замеру на них углов наклона линий частоты вращения $\alpha_{\text{н.}}$ и $\alpha_{\text{х.х.}}$.

Точность этого метода практически не уступает точности метода индицирования. Этот метод проще и может считаться более эффективным.

Величину приведенного момента инерции двигателя можно определить методом двойного выбега с режима холостого хода, производимым один раз непосредственно, а другой раз – с присоединенной массой, момент инерции которой известен.

4.3.2. Косвенные методы

Метод часового расхода

По этому методу предполагается, что часовой расход топлива на исследуемом режиме $G_t \rightarrow N_i(P_i)$, расход топлива на холостом ходу $G_{x.x.} \rightarrow N_{\text{мех.}}(P_{\text{мех.}})$.

Этот метод достаточно точный и простой. Его основным недостатком является то, что при определении $N_{\text{мех.}}$ не учитывается влияние нагрузки на механические потери.

Часовой расход G_t аппроксимируем прямой (рис. 18), проходящей через $G_{x.x.}$, тогда

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{G_t}{N_i} = \frac{G_{x.x.}}{N_{\text{мех.}}},$$

т. е.

$$N_i = \frac{G_t}{\operatorname{tg}\alpha}; \quad N_{\text{мех.}} = \frac{G_{x.x.}}{\operatorname{tg}\alpha};$$

$$\eta_M = \frac{N_i - N_{\text{мех.}}}{N_i} = \frac{G_t - G_{x.x.}}{G_t}.$$

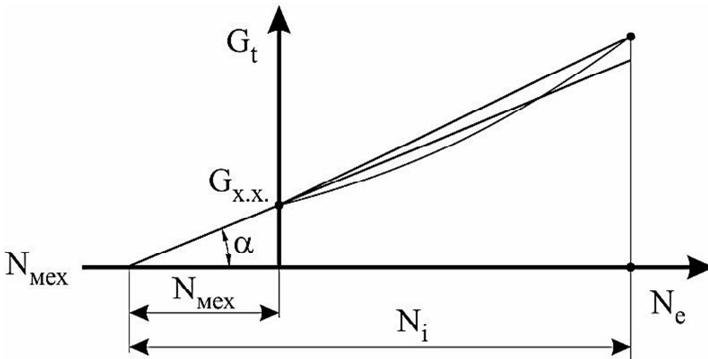


Рис. 18. Изменение часового расхода топлива в зависимости от нагрузки на двигателе

*Метод определения механических потерь
по нагрузочным характеристикам*

Способ основан на графической обработке кривой изменения часового расхода топлива $G_t = f(N_e)$, полученной по нагрузочной характеристике (рис. 19).

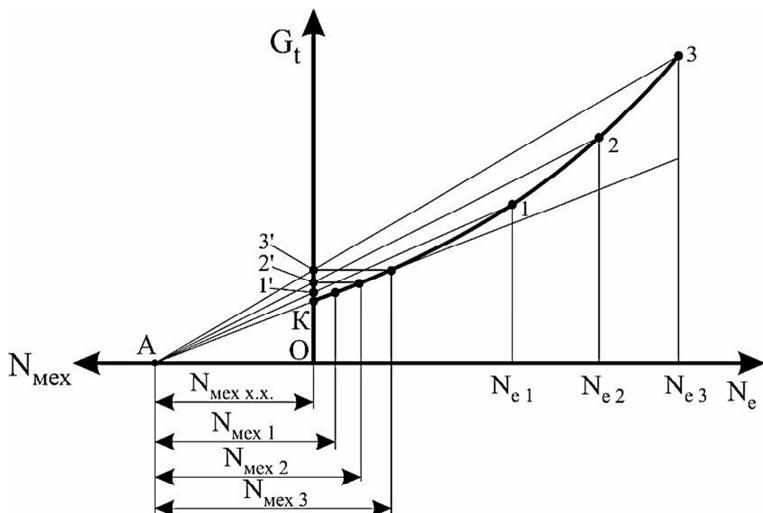


Рис. 19. Нагрузочная характеристика двигателя

Суть его заключается в следующем. Снимается нагрузочная характеристика двигателя на заданном частотном режиме и регистрируются значения G_t при выбранных нагрузках, в том числе и при $N_e = 0$.

Через точку K на оси G_t ($N_e = 0$) проводится касательная к кривой $G_t = f(N_e)$ до пересечения с осью $O - N_{мех}$ в точке A . Согласно методу часовых расходов отрезок OA соответствует условной мощности механических потерь $N_{мех.х.х.}$ на данном частотном режиме при отсутствии нагрузки на двигатель,

т. е. это минимальные для выбранного частотного режима величины $N_{\text{мех.х.х.}}$.

Если соединить точку A соответственно с точками 1, 2, 3 на кривой $G_t = f(N_e)$, то видно, что с увеличением нагрузки доля G_t , расходуемая на преодоление механических потерь, увеличивается и растет значение $N_{\text{мех.}}$.

Для определения $N_{\text{мех.}}$ на режимах 1, 2, 3 необходимо через точки 1', 2', 3' провести прямые, параллельные оси абсцисс, проекции точек пересечения которых с кривой $G_t = f(N_e)$ на оси $N_{\text{мех.}} - N_e$ будут соответствовать значениям $N_{\text{мех.1}}$, $N_{\text{мех.2}}$ и $N_{\text{мех.3}}$.

Соответственно,

$$\eta_{\text{мех.1}} = \frac{N_{e1}}{N_{e1} + N_{\text{мех.1}}} = 1 - \frac{N_{\text{мех.1}}}{N_{e1} + N_{\text{мех.1}}} \text{ и т. д.}$$

Метод индцирования

Этот метод можно считать наиболее старым и известным. Широкому применению препятствуют чисто технические трудности, связанные с необходимостью индцирования со значительными погрешностями (~5 %) всех цилиндров многоцилиндрового двигателя. Индцирование одного цилиндра вследствие неравномерности работы цилиндров приводит к большим погрешностям.

При применении этого метода мощность механических потерь определяется как:

$$N_{\text{мех.}} = N_i - N_e,$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, определяемая по результатам экспериментов;

N_i – индикаторная мощность, определяемая путем обработки индикаторных диаграмм.

$$N_i = L_i \cdot \omega = L_i \cdot i \cdot \frac{2n}{\tau},$$

где L_i – индикаторная работа одного цилиндра;

i – число цилиндров;

$\frac{2n}{\tau}$ – число рабочих циклов в 1 с;

n – частота вращения коленвала, с^{-1} ;

τ – тактность двигателя.

Индикаторная работа L_i представляет собой площадь индикаторной диаграммы, определенной в координатах $P-V$ (рис. 20).

Обычно при обработке индикаторную диаграмму разбивают на n небольших участков, т. е. решают уравнение методом конечных разностей.

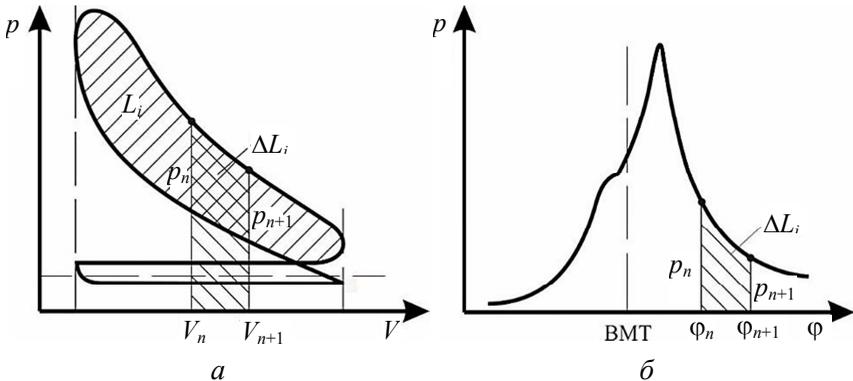


Рис. 20. Индикаторные диаграммы:
 a – в координатах $p - V$; \bar{b} – в координатах $p - \phi$

Для каждого участка

$$\Delta L_n = \int_{V_n}^{V_{n+1}} P dV = \frac{P_n + P_{n+1}}{2} (V_{n+1} + V_n);$$

$$L_i = \sum_1^n \Delta L_n.$$

По значениям N_i , N_e и $N_{\text{мех.}}$ определяют механический КПД:

$$\eta_{\text{мех.}} = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_{\text{мех.}}}{N_i} = 1 - \frac{N_{\text{мех.}}}{N_i}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Райков, И. Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания / И. Я. Райков. – М. : «Высшая школа», 1975. – 320 с.
2. Основы научных исследований / под. ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М. : «Высшая школа», 1989. – 400 с.
3. Испытания двигателей внутреннего сгорания / Б. С. Стефановский [и др.]. – М. : «Машиностроение», 1972. – 368 с.
4. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний : ГОСТ 18509-88 (СТ СЭВ 2560-80).
5. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний : ГОСТ 14846-2020.
6. Кухарёнок, Г. М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей. Методы и средства совершенствования / Г. М. Кухарёнок. – Минск : БГПА, 1999. – 180 с.
7. Якубович, А. И. Системы охлаждения двигателей тракторов и автомобилей. Исследования, параметры и показатели / А. И. Якубович, Г. М. Кухарёнок, В. Е. Тарасенко. – Минск : БНТУ, 2014. – 300 с.
8. Кухарёнок, Г. М. Снижение выбросов вредных веществ дизельных двигателей / Г. М. Кухарёнок, А. Н. Петрученко, В. И. Березун. – М. : Новое знание, 2014. – 220 с.
9. Кухарёнок, Г. М. Улучшение экологических показателей дизеля / Г. М. Кухарёнок, В. И. Березун. – Минск : БНТУ, 2019. – 149 с.
10. Кухарёнок, Г. М. Экспериментальная установка для исследования пусковых качеств дизелей с электронным управлением топливоподачей / Г. М. Кухарёнок, А. Н. Марчук // Вісник Східно-українського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. – № 6. – С. 80–84.
11. Кухарёнок, Г. М. Оценка вибронгруженности компонентов системы топливоподачи Common Rail автомобильного дизеля / Г. М. Кухарёнок, М. В. Жарнов // Наука и техника. Международный научно-технический журнал. – 2014. – № 4. – С. 24–30.

12. Кухарёнок, Г. М. Оценка содержания дисперсных частиц в отработавших газах дизельных двигателей / Г. М. Кухарёнок, В. И. Березун // Наука и техника. Международный научно-технический журнал. – 2016. – № 5. – С. 371–379.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ.....	4
1.1. Назначение и виды испытаний	4
1.2. Испытания, регламентируемые ГОСТами.....	4
1.3. Исследовательские испытания	5
1.4. Подготовка и условия проведения испытаний.....	6
1.5. Допускаемые погрешности измерений.....	7
2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МЕТРОЛОГИИ И ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	8
2.1. Краткие сведения об измерениях и измерительных приборах.....	8
2.2. Измерительные приборы	9
2.3. Погрешности измерений	13
2.3.1. Погрешности непосредственного измерения величин.....	13
2.3.2. Погрешности сложных опытов.....	17
2.3.3. Динамические погрешности измерений быстропеременных величин.....	20
3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ	25
3.1. Возможности автоматизации информационных процессов.....	25
3.2. Преобразователи неэлектрических величин в электрические. Датчики	26
3.2.1. Датчики сопротивления.....	26
3.2.2. Индуктивные датчики	32
3.2.3. Емкостные датчики	33
3.2.4. Пьезоэлектрические датчики.....	34
3.2.5. Фотозлектрические датчики.....	35

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ.....	36
4.1. Гидротормоза.....	37
4.2. Электротормоза.....	42
4.2.1. Электротормоза постоянного тока.....	42
4.2.2. Тормоза переменного тока.....	45
4.2.3. Индукторные тормоза.....	45
4.2.4. Устойчивость работы системы тормоз – двигатель.....	48
4.3. Методы определения механических потерь двигателя.....	50
4.3.1. Прямые методы.....	51
4.3.2. Косвенные методы.....	55
ЛИТЕРАТУРА.....	60

Учебное издание

ПЕТРУЧЕНКО Александр Николаевич
КУХАРЁНОК Георгий Михайлович

ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 01 01
«Двигатели внутреннего сгорания»

Редактор *А. С. Мокрушников*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 14.06.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 2,91. Тираж 200. Заказ 677.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.