

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра технической эксплуатации и ремонта автомобилей

А.В. Пузаков, Я.Ю. Осаулко

РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФОРСУНОК

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Оренбург
2018

УДК 629.33(075.8)

ББК 39.33-04я73

П 88

Рецензент – доцент, кандидат технических наук Д.А. Дрючин

Пузаков, А.В.
П-88 Расчет электромагнитных форсунок: методические указания / А.В. Пузаков, Я.Ю. Осаулко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 57 с.

Методические указания содержат методику расчета электромагнитных форсунок для бензиновых двигателей.

Методические указания по выполнению расчетно-графического задания предназначены для обучающихся по программе высшего образования по направлению подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов при изучении дисциплины «Техническое обслуживание электронных систем автомобилей».

УДК 629.33(075.8)

ББК 39.33-04я73

© Пузаков А.В.,
Осаулко Я.Ю., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

Введение.....	4
1 Общие сведения об электромагнитных форсунках	5
1.1 Виды впрыскивания топлива	6
1.2 Форсунка для впрыска во впускной коллектор	8
1.3 Форсунка высокого давления для непосредственного впрыска бензина	13
1.4 Общие сведения об электромагнитах	16
1.5 Контрольные вопросы	20
2 Методика расчета электромагнитной форсунки.....	21
2.1 Расчет параметров электромагнита.....	21
2.2 Расчет параметров катушки	27
2.3 Расчет производительности форсунки.....	32
2.4 Контрольные вопросы	35
Список использованных источников	36
Приложение А (обязательное) Исходные данные для расчета	38
Приложение Б (справочное) Провода обмоточные медные.....	39
Приложение В (рекомендуемое) Пример расчета электромагнитной форсунки	41

Введение

Методические указания предназначены для обучающихся по программе высшего образования по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» при выполнении расчетно-графического задания в процессе изучения дисциплины «Техническое обслуживание электронных систем автомобилей».

Цель выполнения контрольной работы – закрепление и углубление обучающимися теоретических знаний, приобретение практических навыков по проектированию электромагнитов.

Задачами выполнения контрольной работы в рамках изучения дисциплины являются:

- овладение методиками проектировочного расчета электромагнитов;
- получение начальных навыков разработки и оформления конструкторской документации;
- изучение требований ЕСКД, ЕСТД, и др.;
- приобретение навыков инженерного творчества.

Задание для выполнения контрольной работы находится в таблице 1. Номер варианты выдается преподавателем. Оформление отчета по контрольной работе производится в соответствии с СТО 02069024. 101-2015.

1 Общие сведения об электромагнитных форсунках

В системах с впрыском во впускной коллектор топливо поступает во впускной канал перед впускными клапанами газораспределительного механизма. Для этого электрический топливный насос подает топливо (давление топлива до 450 кПа) в электромагнитные форсунки. Форсунки установлены на каждый цилиндр двигателя, возможно установка одной форсунки на два цилиндра, а также на все (моновпрыск). Форсунка, при подаче на нее электрического сигнала, через определенные промежутки времени впрыскивает топливо. Воздушно-топливная смесь, образующаяся во впускном канале, поступает в цилиндр в такте впуска. Корректировка объема впрыскиваемого топлива выполняется, например, системой лямбда-регулирования (лямбда-датчик) и вентиляции топливного бака (система улавливания испарений бензина).

При непосредственном впрыске, в цилиндр через впускной клапан поступает только воздух. Топливо впрыскивается прямо в камеру сгорания через электромагнитные форсунки под высоким давлением и образует там с поступившим воздухом топливно-воздушную смесь. Для этого необходимо более высокое давление впрыска, которое создается дополнительным насосом высокого давления. Через встроенный клапан управления в зависимости от нагрузки, можно в широких пределах регулировать количество поступающего топлива.

1.1 Виды впрыскивания топлива

Наряду с продолжительностью впрыскивания топлива, другим параметром, который важен для оптимизации расхода топлива и состава ОГ, является момент впрыскивания топлива по углу поворота коленчатого вала. В этом случае возможности вариаций зависят от используемого вида впрыскивания топлива.

Новые системы впрыска обеспечивают возможность как последовательного, так и индивидуального для каждого цилиндра впрыскивания топлива.

Синхронное впрыскивание топлива

При синхронном впрыскивании топлива все форсунки приводятся в действие в один и тот же момент. Поэтому время, которое имеется для испарения топлива, в каждом цилиндре разное. Для того что бы, несмотря на это, добиться хорошего фазования рабочей смеси, количество топлива, необходимое для сгорания, делится на две части, и каждая из этих частей впрыскивается при каждом обороте коленчатого вала. При таком способе впрыскивания топлива в некоторых цилиндрах топливо накапливается не перед впускным клапаном, а впрыскивается через открытый впускной клапан. Момент впрыскивания топлива изменен быть не может.

Групповое впрыскивание топлива

При групповом впрыскивании топлива форсунки объединены в две группы. При этом за первый оборот коленчатого вала форсунки одной группы впрыскивают полное количество топлива, требуемое для их цилиндров, а за следующий оборот коленчатого вала — форсунки другой группы.

Такая работа форсунок уже позволяет обеспечить выбор момента впрыскивания топлива в функции рабочего режима двигателя и избежать нежелательного впрыскивания в открытые впускные клапана. Кроме того, здесь также и время, имеющееся для испарения топлива, в различных цилиндрах разное.

Последовательное впрыскивание топлива

Топливо впрыскивается в каждый цилиндр отдельно. Форсунки приводятся в действие последовательно одна за другой в соответствии с порядком зажигания. Продолжительность и момент впрыскивания — относительно ВМТ в каждом цилиндре — для всех цилиндров одинаковое. В этом случае топливо накапливается до входа в каждый цилиндр.

Начало впрыскивания свободно программируется и может корректироваться в зависимости от режима работы двигателя.

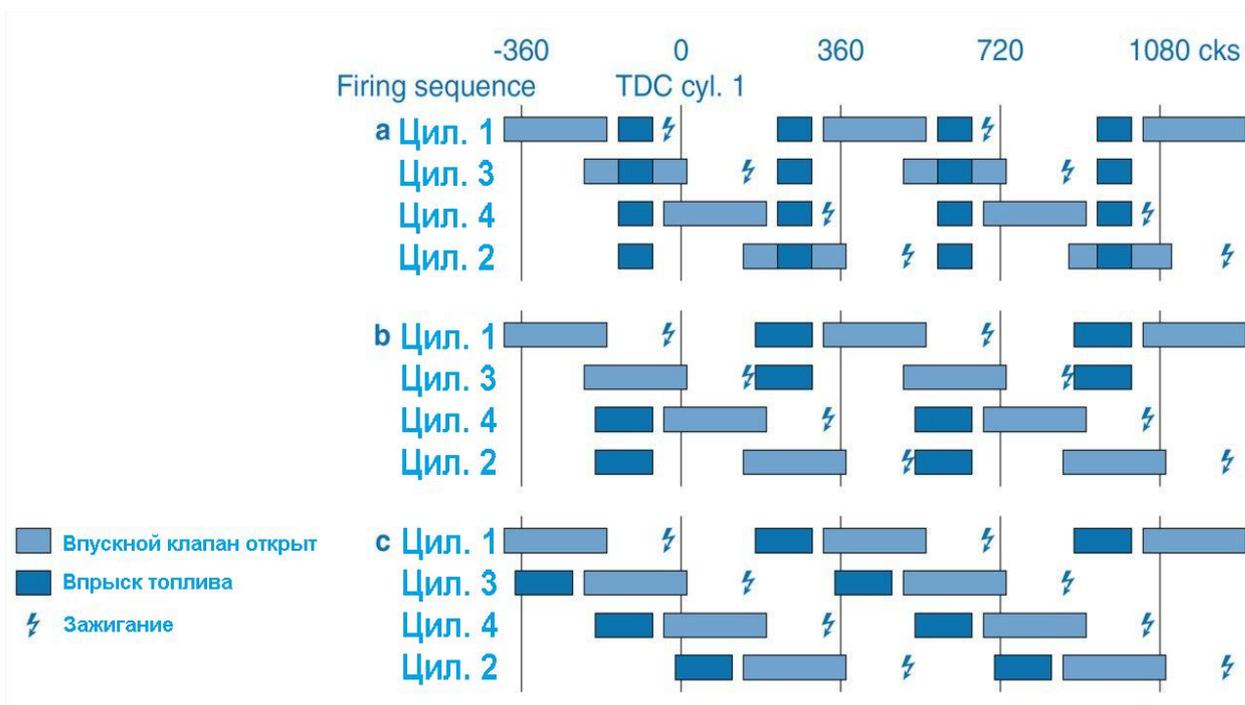


Рисунок 1 – Виды впрыскивания топлива

Индивидуальное впрыскивание топлива в каждый цилиндр

Этот вид впрыскивания топлива предлагает самую большую степень свободы. У него, по сравнению с последовательным впрыскиванием, то преимущество, что здесь можно оказывать индивидуальное влияние на момент впрыскивания в каждом цилиндре. Благодаря этому можно компенсировать неравномерность процессов, например, при наполнении цилиндров зарядом рабочей смеси.

1.2 Форсунка для впрыска во впускной коллектор

Назначение

Клапанные форсунки с электрическим управлением впрыскивают топливо под давлением, существующим в системе, во впускной коллектор. Благодаря форсункам можно точно отмерять то количество топлива, которое необходимо для двигателя в конкретный момент. Управление форсунками производится через выходные ступени, интегрированные в блок управления двигателя, с помощью сигнала, рассчитанного системой управления.

Конструкция и принцип работы

Электромагнитные клапанные форсунки (рисунок 2) состоят, из следующих частей:

- корпус 3 с электрическим 4 и гидравлическим соединением 1;
- катушка электромагнита 9;
- игла клапана 10 с магнитным якорем и шариком клапана 11;
- гнездо клапана 12 с дисковым распылителем 13;
- пружина клапана 8.

Чтобы обеспечить бесперебойную работу, форсунка в части, соприкасающейся с топливом, выполнена из коррозионностойкой стали. Сетчатый фильтр 6 в питающей топливной линии защищает форсунку от загрязнения.

Соединения

В используемых сегодня клапанных форсунках линия подачи топлива проходит в осевом направлении к форсунке сверху вниз (верхняя подача). Топливопровод крепится клеммным/зажимным устройством на гидравлическом соединении. Крепежные зажимы обеспечивают надежную фиксацию. Уплотнительное кольцо (кольцо круглого сечения) на гидравлическом соединении 2 уплотняет соединение форсунки и распределительной трубки топлива.

Электрическое соединение форсунки связано с блоком управления двигателя.

Принцип работы клапана

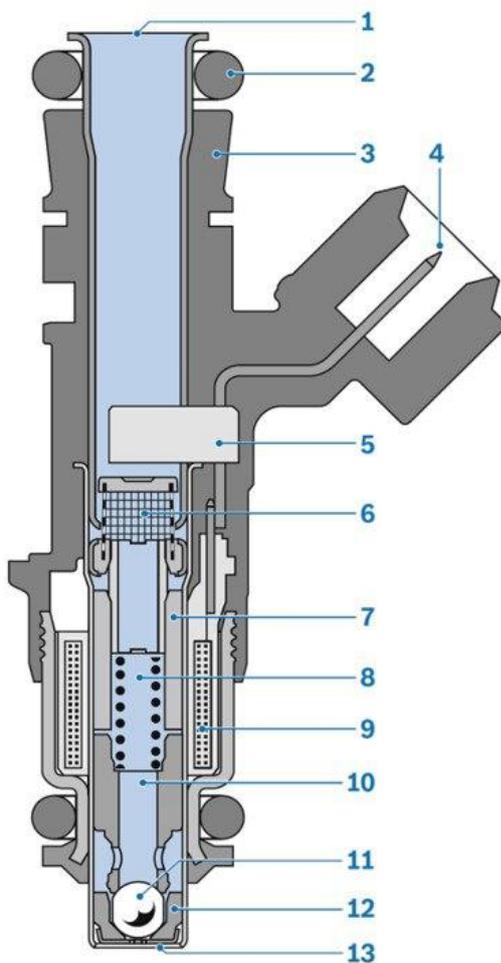
При отсутствии тока на катушке пружина и сила давления топлива прижимают иглу клапана с шариком к конусообразному гнезду клапана. Таким образом, система подачи топлива отсекается от впускного коллектора. Если на катушку подать ток, возникает магнитное поле, которое притягивает магнитный якорь иглы клапана. Шарик поднимается из гнезда клапана, и производится впрыск топлива. Если ток возбуждения отключается, игла клапана снова закрывается под действием пружины.

Выход топлива

Распыление топлива производится дисковым распылителем, в котором есть одно или несколько отверстий. Проштампованные в диске отверстия обеспечивают распыл топлива с высокой степенью постоянства. Дисковый

распылитель не восприимчив к отложениям топлива. Форма струи выходящего топлива зависит от расположения и количества отверстий.

Высокая герметичность на участке гнезда клапана обеспечивается принципом уплотнения конус/шар. Форсунка вдвигается в предусмотренное для этого отверстие на впускном коллекторе. Нижнее уплотнительное кольцо герметизирует форсунку со стороны впускного коллектора.



1 - подключение гидравлики; 2 – кольцо круглого сечения; 3 – корпус форсунки; 4 – электрическое соединение; 5 – пластиковый зажим с запрессованными выводами; 6 – сетчатый фильтр; 7 - внутренний полюс; 8 – пружина клапана; 9 - магнитная катушка; 10 – игла клапана с якорем; 11 – шарик клапана; 12 – гнездо клапана; 13 – дисковый распылитель

Рисунок 2 – Электромагнитная форсунка для впрыска топлива во впускной коллектор

Количество распыленного топлива в единицу времени определяется следующими параметрами:

- системное давление в топливной системе;
- противодействие во впускном коллекторе и
- геометрическая форма участка выхода топлива.

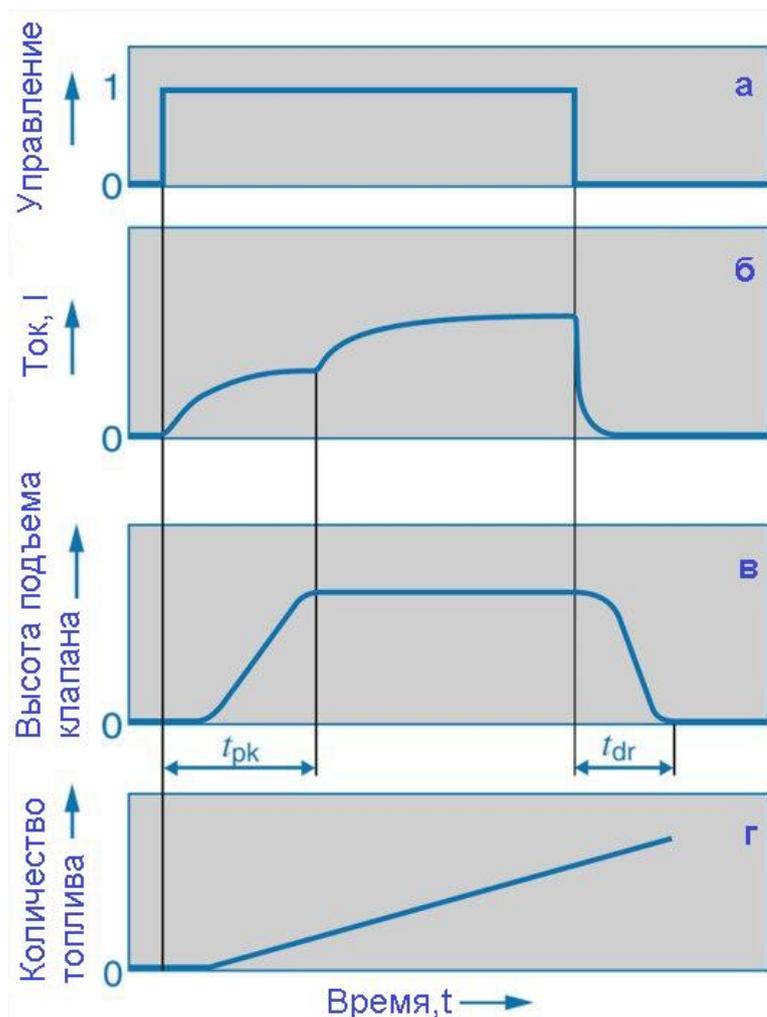


Рисунок 3 – Управление электромагнитной форсункой

Электрическое управление

Блок выходной ступени в Motronic управляет форсункой посредством коммутационного сигнала (рисунок 3). Ток в магнитной катушке нарастает (б) и приводит к подъему иглы клапана (с). По истечении периода времени t_{pk} (время поднятия) достигается максимальный ход клапана. Как только шарик клапана поднимается из своего гнезда, происходит впрыск топлива. На

рисунке 3г представлено общее количество топлива, подаваемого во время импульса впрыска.

После отключения открывающего сигнала ток в цепи пропадает. Однако вследствие инерции массы клапан закрывается медленно. По истечении времени t_{dr} (время опускания) клапан снова полностью закрыт.

При полностью открытом клапане объем впрыска пропорционален времени. Нелинейные характеристики во время фазы притяжения и фазы опускания клапана необходимо компенсировать длительностью управляющего сигнала (время впрыска). Скорость, с которой игла клапана поднимается из гнезда, зависит также от напряжения батареи. Это воздействие компенсируется удлинением времени впрыска в зависимости от напряжения батареи (рисунок 4).

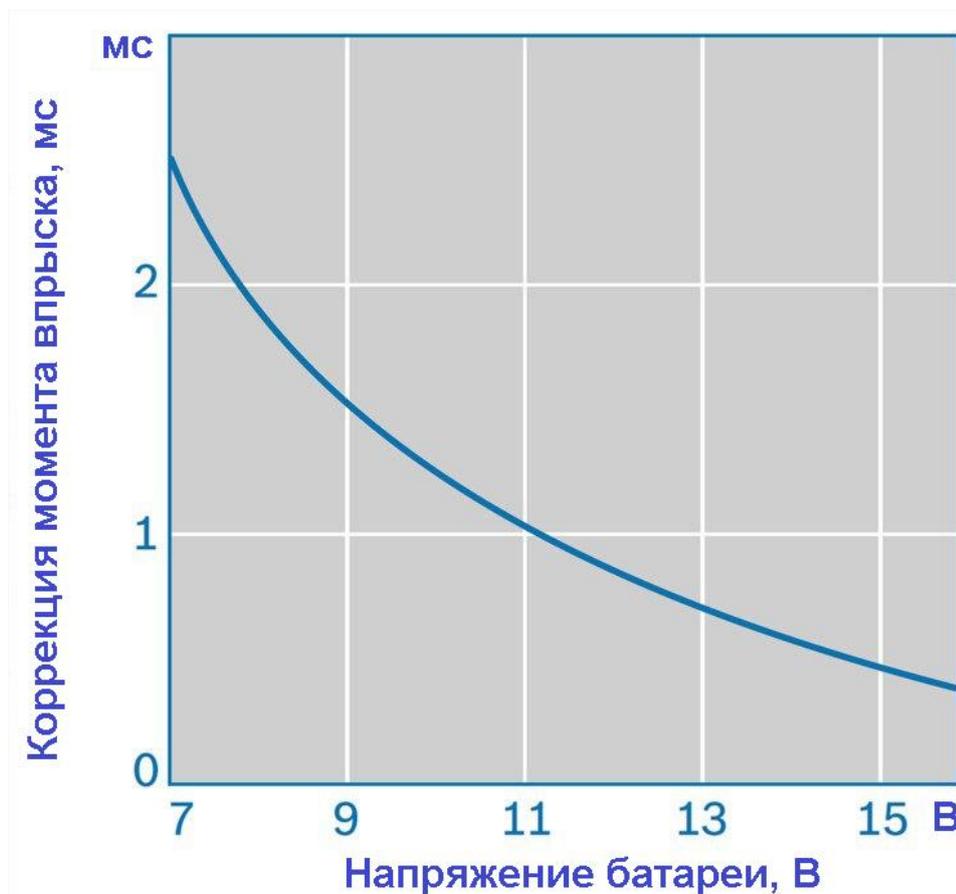


Рисунок 4 – Коррекция времени впрыска в зависимости от напряжения

1.3 Форсунка высокого давления для непосредственного впрыска бензина

Назначение

Назначение форсунки высокого давления (HDEV) — это, с одной стороны, дозирование топлива, а с другой — обеспечение целенаправленного перемешивания воздуха и топлива путем распыления топлива в определенной пространственной области камеры сгорания. В зависимости от желаемого рабочего состояния топливо концентрируется в области вокруг свечи зажигания (слоем) или равномерно распыляется во всей камере сгорания (гомогенное распределение).

Когда через катушку течет ток, образуется магнитное поле. Под его действием в противовес силе пружины игла клапана поднимается из гнезда клапана и открывает выпускные отверстия клапана 8. Под действием давления в системе топливо впрыскивается в камеру сгорания. Количество впрыснутого топлива зависит при этом, в основном, от длительности открытия клапана и от давления топлива.

При выключении подачи тока игла клапана под действием силы пружины прижимается к гнезду клапана и прерывает поток топлива.

При соответствующей геометрии форсунки на кончике клапана достигается очень хорошее распыление топлива.

Конструкция и принцип работы

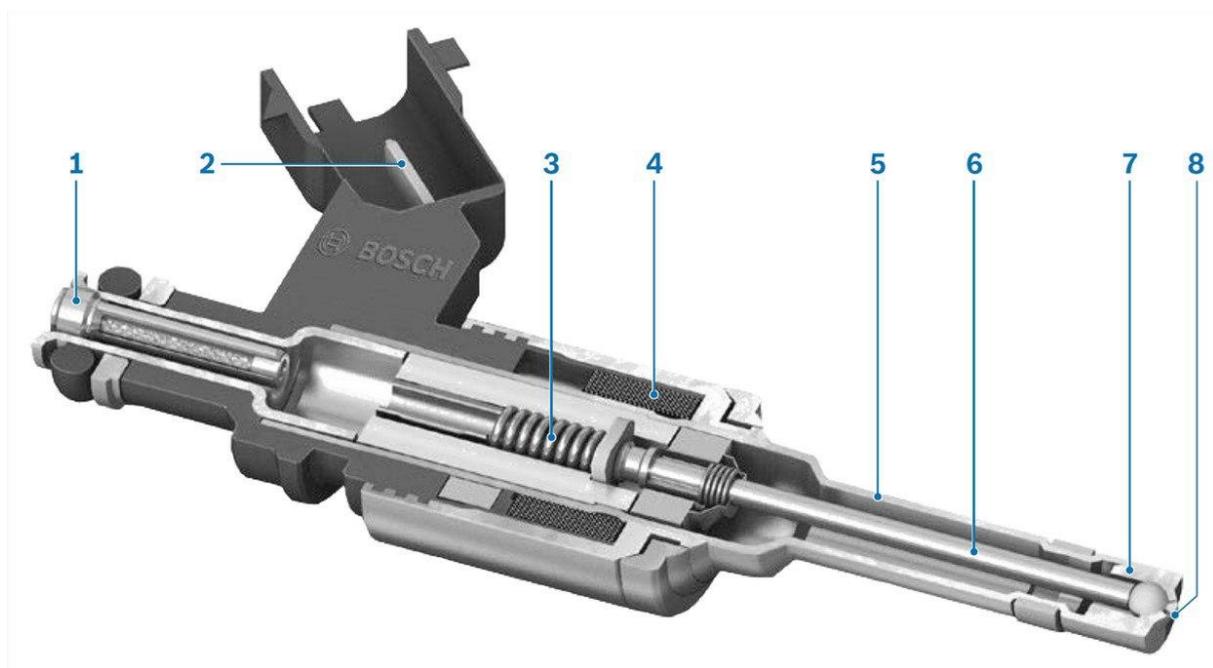
Форсунка высокого давления (рисунок 5) состоит из следующих компонентов:

- подающая линия топлива с фильтром 1;
- электрическое соединение 2;
- пружина 3;

- катушка 4;
- клапанная втулка 5;
- игла форсунки с якорем электромагнита 6;
- гнездо клапана 7.

Требования

Важное отличие непосредственного впрыска бензина по сравнению с впрыском во впускной коллектор — это более высокое давление топлива и значительное сокращение времени, имеющегося для подачи топлива непосредственно в камеру сгорания.



1 – падающая линия топлива с фильтром; 2 – электрическое соединение; 3 – пружина; 4 – катушка; 5 – клапанная втулка; 6 – игла форсунки с якорем электромагнита; 7 – гнездо клапана; 8 - выпускные отверстия клапана

Рисунок 5 – Конструкция форсунки высокого давления

На рисунке 6 показаны требования к форсунке. При впрыске во впускной коллектор за два оборота коленчатого вала топливо подается два

или один раз в зависимости от типа системы впрыска. При числе оборотов 6000 мин⁻¹ это соответствует длительности впрыска 20 мс.

При непосредственном впрыскивании бензина времени значительно меньше. Для равномерной работы топливо должно впрыскиваться в такте впуска. Поэтому для процесса впрыска имеется только пол- оборота коленчатого вала. При 6000 мин⁻¹ это соответствует длительности впрыска 5 мс.

При непосредственном впрыске расход топлива на холостом ходу значительно ниже расхода при полной нагрузке по сравнению с впрыском во впускной коллектор (коэффициент 1:12). Из этого получаем время впрыска на холостом ходу примерно 0,4 мс.

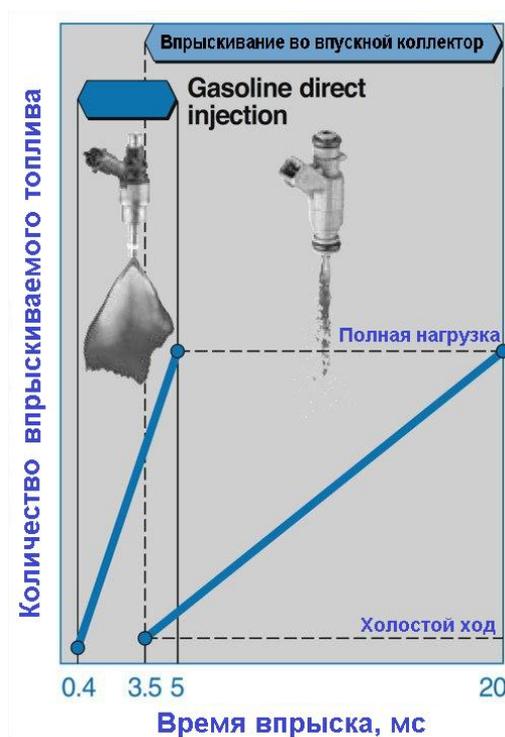


Рисунок 6 – Количество впрыскиваемого топлива в виде функции времени впрыска

Управление форсункой HDEV. Для обеспечения определенного и воспроизводимого процесса впрыска, управление форсункой высокого давления осуществляется посредством сложной токовой диаграммы.

1.4 Общие сведения об электромагнитах

Электромагниты относятся к большому классу устройств, которые широко используются в различных автоматических системах и средствах автоматики.

На рисунке 7 представлен электромагнит с независимой регулировкой хода якоря и возвратной пружины. Электромагнит имеет плоский стоп и состоит из корпуса 4, стопа 5, якоря 6, обмотки 7, намотанной на немагнитный каркас 8, возвратной пружины 11, выходного штока 14. Позиции 9, 10, 12, 13 помечают специальные крепежные детали (гайки и контргайки). Колодка 1 с контактами 2 предназначена для подпайки выводов 3 обмотки. В качестве габаритных размеров приведены: наружный диаметр корпуса D , полная длина исполнительного устройства L_1 и максимальный ход якоря $\delta_{\text{я}}$. Начальное усилие $P_{\text{н}}$ указывается без учета силы пружины.

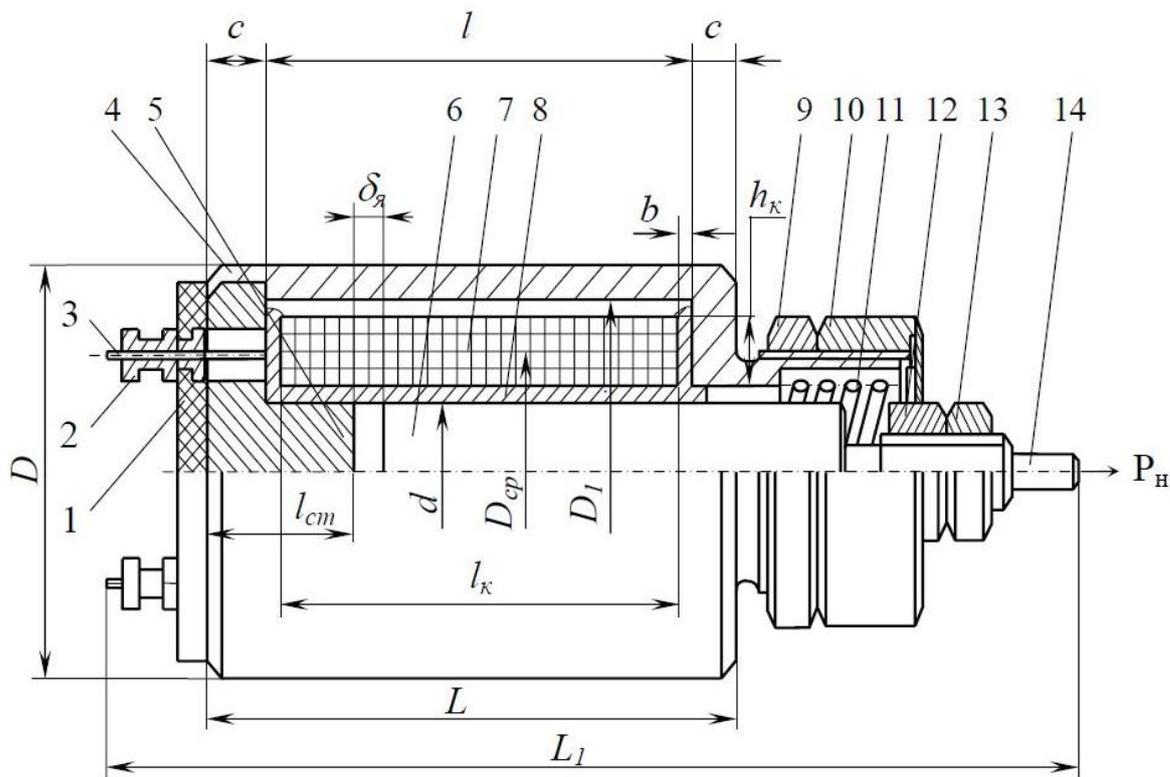


Рисунок 7 – Электромагнит с независимой регулировкой хода якоря

На рисунке 8 изображен электромагнит тянущего и толкающего действия с неизменным рабочим ходом и регулируемой силой возвратной пружины. Он имеет усеченный конический стоп ($\alpha = 60^\circ$) и состоит из корпуса 2, обмотки 3, намотанной на составной каркас (жестко соединенные фланец 5 и втулка 4), якоря 6, возвратной пружины 9. В якоре с обеих сторон жестко закреплены тянущий 12 и толкающий 1 штоки. Рабочий ход выставляется посредством прокладки 7 и ограничивается крышкой 8. Позициями 10, 11 помечены регулировочная и крепежная детали.

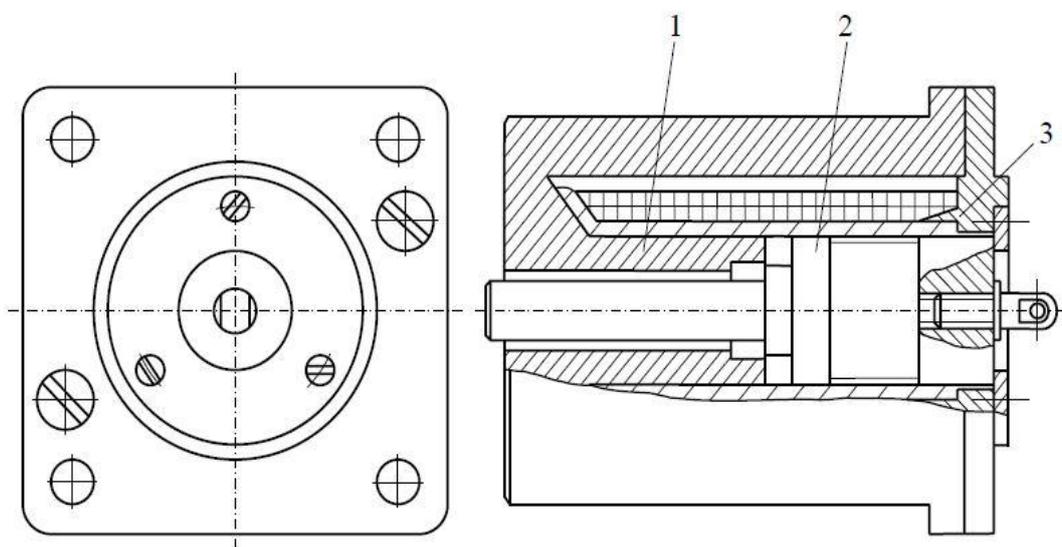


Рисунок 8 – Электромагнит тянущего и толкающего действия с неизменным рабочим ходом и регулируемой силой возвратной пружины

Электромагнит тянущего и толкающего действия с постоянным рабочим ходом, без возвратной пружины (рисунок 9) имеет стоп 1 и якорь 2, которые в области рабочего зазора выполнены в виде ферромагнитного шунта (ФМШ). Позицией 3 помечен фланец слабо развитый в осевом направлении. ФМШ обеспечивает электромагниту сравнительно пологую тяговую характеристику.

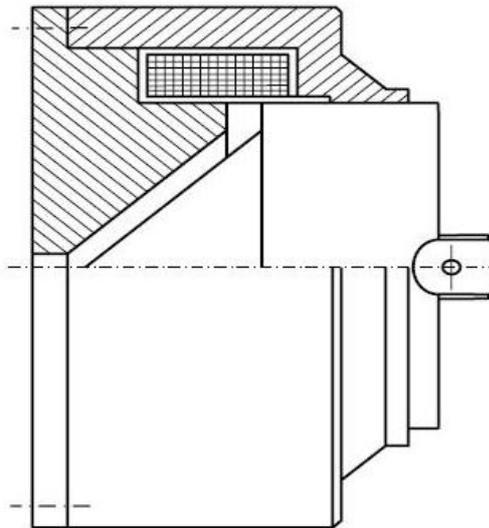


Рисунок 9 – Электромагнит тянущего и толкающего действия с постоянным рабочим ходом, без возвратной пружины

Электромагнит втяжного типа с коническим якорем (рисунок 10) не имеет возвратной пружины. Характерная особенность электромагнита: соприкосновение стопа и якоря в конце хода происходит не по конической поверхности, а по плоским торцевым поверхностям стопа и якоря.

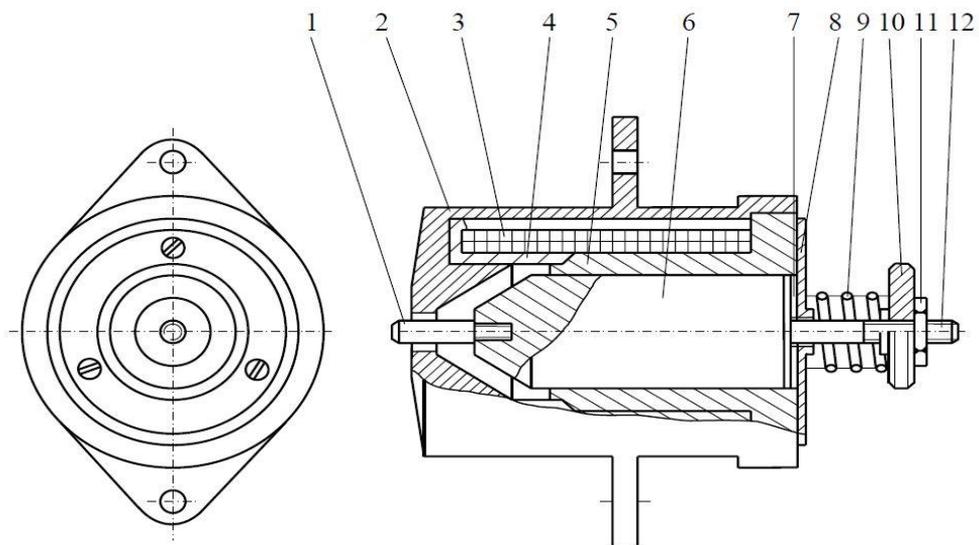


Рисунок 10 – Электромагнит втяжного типа с коническим якорем

Электромагнит (рисунок 11) с постоянным рабочим ходом не имеет возвратной пружины и отличается комбинированной формой рабочего зазора (сочетание плоского стопа с коническим). Электромагнит включает якорь 6 с внутренним конусом (для уменьшения массы) и наружными продольными пазами 5 (уменьшение вихревых токов, увеличение быстродействия), стоп 8, корпус 9, катушку 7. Поступательное движение якоря осуществляется в направляющей развитого фланца 4, ход якоря ограничивается упором 2 и регулируется прокладкой 3. Серьга 1 служит для сопряжения электромагнита с нагрузкой. Тяговая характеристика объединяет достоинства конического и плоского стопов: повышенное начальное усилие и достаточно высокое усилие отрыва.

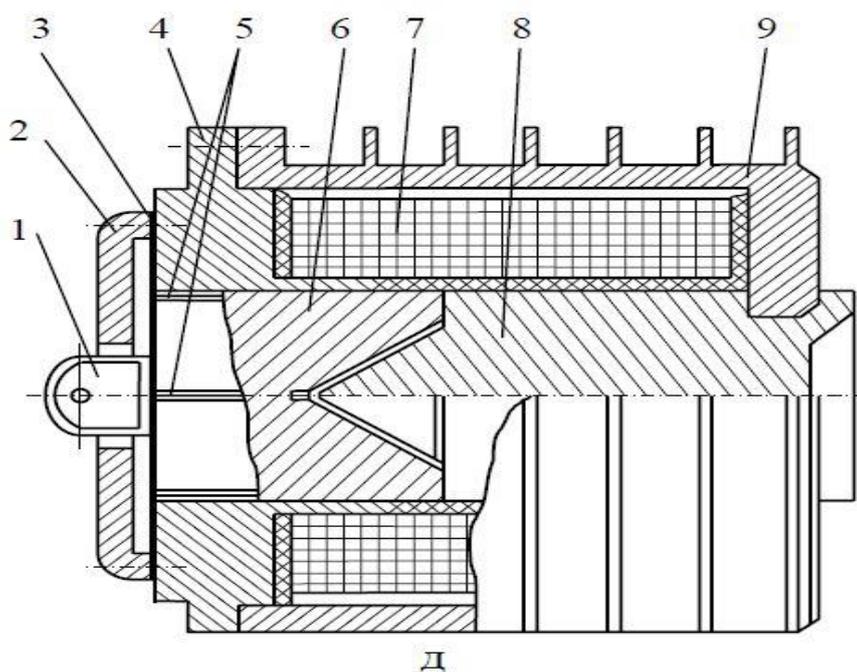


Рисунок 11 – Электромагнит с постоянным рабочим ходом

Электромагниты получили широкое распространение в автотранспорте. Например, в форсунке двигателя внутреннего сгорания электромагнит обеспечивает подачу определенного количества топлива в нужный момент времени.

1.5 Контрольные вопросы

1. Назовите приблизительное давление топлива при впрыскивании во впускной коллектор
2. Опишите принцип работы электромагнитной форсунки для впрыскивания топлива во впускной коллектор
3. Опишите принцип работы электромагнитной форсунки для впрыскивания топлива под высоким давлением
4. Опишите основные признаки отличия между форсункой для впрыскивания топлива во впускной коллектор и форсунки для впрыскивания топлива под высоким давлением
5. Назовите разновидности электромагнитов
6. Перечислите основные элементы электромагнита и их функции
7. Назовите и охарактеризуйте виды впрыскивания топлива
8. Для чего необходимо бустерное напряжение?

2 Методика расчета электромагнитной форсунки

2.1 Расчет параметров электромагнита

При проектировании втяжных электромагнитов (ЭМ) можно выделить два основных типа расчетов: проектный и проверочный. В зависимости от технического задания проектный расчет проводится по двум методикам:

- по заданному усилию, ходу якоря, тепловому режиму рассчитываются размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие заданные параметры при минимальных габаритах;

- по заданным габаритам, ходу якоря, тепловому режиму рассчитываются размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие максимально возможное тяговое усилие при заданных параметрах.

Проверочный расчет позволяет по известным размерам магнитопровода, параметрам катушки, ходу якоря определить тяговое усилие электромагнита, его тепловой режим, потребление тока, степень насыщенности магнитопровода.

Выбор конструктивного типа и формы стопа

В инженерной практике широко распространен способ выбора типа и формы стопа электромагнита по конструктивному фактору (КФ):

$$КФ = \frac{\bar{P}}{\delta}, \quad (1)$$

где \bar{P} – тяговое усилие, Н

δ – ход якоря, м.

Для количественного сопоставления экономичности основных типов электромагнитов (с дисковым якорем, втяжным якорем с различной формой стопа, ферромагнитным шунтом) с различными конструктивными факторами и выбора соответствующего типа электромагнита можно пользоваться диаграммой (рисунок 12).

Из всего многообразия конструктивных исполнений ЭМ с помощью рисунка 12а по значению конструктивного фактора (1), известному в начале проектирования, выбирается оптимальный тип ЭМ (по максимальным значениям критериев A/Q , A/V , A/N , A/F – здесь A – номинальная мощность, Q – масса ЭМ, V – скорость перемещения подвижных частей, N – мощность, F – магнитодвижущая сила катушки). На стыках областей применения (не заштрихованные области на рисунке 12а возможно использование обоих смежных типов ЭМ).

При выборе электромагнита с втяжным якорем рациональная форма стопа определяется по значению коэффициента формы (КФ) и усеченности конуса k как отношение малого диаметра конуса к большому, равному диаметру якоря.

Применение стопов с $\alpha > 120^\circ$ нерационально, так как тяговая характеристика при этом близка к характеристике плоского стопа и выигрыш по усилию незначителен. Конические стопы с $\alpha < 30^\circ$ целесообразны для сравнительно больших ходов якоря и для получения пологой тяговой характеристики, когда нельзя применять магниты с ФМШ.

Втяжные электромагниты с коническим и плоским стопами конструктивно различаются только формой исполнения стопа. Различие в их расчете обусловлено разными выражениями тяговых сил, которые достаточно сложны, особенно для усеченно-конического стопа. Поэтому на этапе синтеза применяется упрощенное выражение для тяговой силы. При этом электромагнит с плоским стопом можно рассматривать как частный случай электромагнита с коническим стопом.

Расчет электромагнитов с дисковым якорем проводится аналогично расчетам электромагнитов с плоским стопом.

При проектном расчете заданы следующие основные параметры электромагнита:

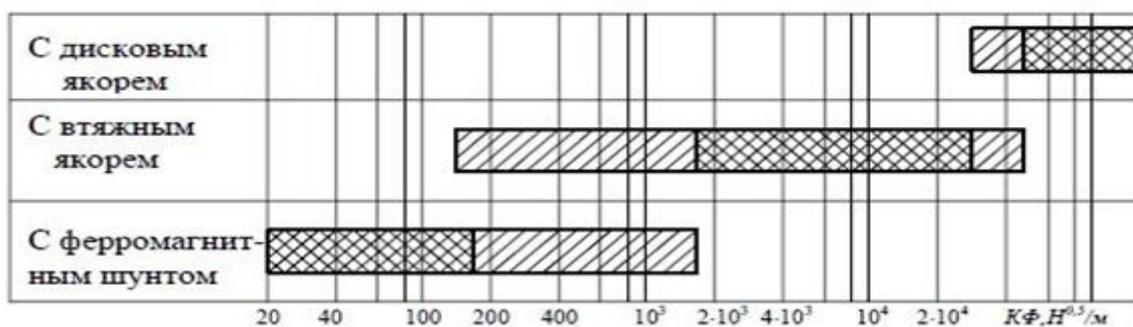
P – тяговое усилие, которое должен развивать электромагнит в начале хода якоря, Н;

δ – ход якоря, м;

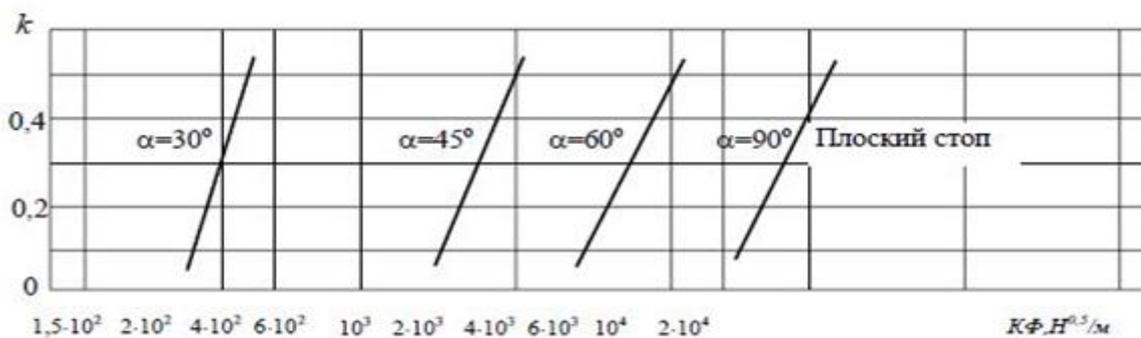
U – напряжение источника питания, В;

$\Theta_{\text{доп}}$ – допустимое превышение температуры электромагнита при продолжительном режиме работы, °С.

Требуется определить размеры магнитопровода и параметры катушки, обеспечивающие заданные характеристики при минимальных габаритах.



а



б

Рисунок 12 – Области применения: а) рациональных типов электромагнитов; б) рациональных форм стопов электромагнитов с втяжным якорем

Расчет электромагнита

Уточнение формы стопа и тягового усилия, создаваемого электромагнитом:

$$\delta_{\text{пл}} = \delta \cdot \cos^2 \alpha; \quad (2)$$

$$P_{\text{пл}} = \frac{P}{\cos^2 \alpha}. \quad (3)$$

Определение основных размеров электромагнита

Приняв величину магнитной индукции в рабочем зазоре $B_{\delta} = 0.8$ Тл и используя формулу Максвелла, определяем диаметр якоря $d_{\text{я}}$.

Диаметр якоря электромагнита, м:

$$d_{\text{я}} = \sqrt{\frac{8 \cdot P_{\text{пл}} \cdot \mu_0}{\pi \cdot B_{\delta}^2}}, \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6}$ Г/м.

B_{δ} – магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл.

Найденное значение $d_{\text{я}}$ округляем до ближайшего целого числа.

Площадь якоря, м^2 :

$$S = \frac{\pi \cdot d_{\text{я}}^2}{4}, \quad (5)$$

Уточнение величины магнитной индукции, которая соответствует округленному значению $d_{\text{я}}$, Тл:

$$B_{\delta} = \sqrt{\frac{8 \cdot P_{\text{пл}} \cdot \mu_0}{\pi \cdot d_{\text{я}}^2}}. \quad (6)$$

Определение магнитодвижущей силы катушки, Н:

$$F_k = K_{CT} \cdot \frac{B\delta}{\mu_0} \cdot \delta_{пл}, \quad (7)$$

где K_{CT} – коэффициент, учитывающий падение м.д.с. на остальных, кроме рабочего зазора, участках магнитопровода. $K_{CT} = 1,3$.

Толщина катушки h_k равна, м:

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\rho \cdot F_k^2}{2 \cdot K_T \cdot f_k \cdot \theta \cdot \lambda^2}}, \quad (8)$$

где K_T – коэффициент теплопередачи, $K_T = 12 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

θ – превышение температуры, $\theta = 70^\circ C$;

f_k – коэффициент заполнения катушки, $f_k = 0,5$;

λ – отношение длины катушки L к её толщине h_k , $\lambda = 4 \dots 6$;

ρ – удельное сопротивление меди при заданном превышении температуры катушки θ .

$$\rho = \rho_{20} (1 + \alpha_t (20 + \theta)), \quad (9)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление меди при $t = 20^\circ C$, равное $1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м,

α_t – температурный коэффициент сопротивления меди; $\alpha_t = 0,004^\circ C^{-1}$.

Найденное значение h_k округляем до ближайшего целого числа.

Скорректируем отношение λ

$$\lambda = \frac{\rho \cdot F_K^2}{2 \cdot K_T \cdot f_K \cdot \theta \cdot h_K^3} \quad (10)$$

Длина электромагнита, м:

$$L = h_K \cdot \lambda, \quad (11)$$

Определение остальных размеров магнитопровода

Внутренний диаметр магнитопровода, м:

$$D_B = d_{\text{я}} + 2 \cdot h_K. \quad (12)$$

Наружный диаметр корпуса, м:

$$D_H = \sqrt{D_B^2 + d_{\text{я}}^2}. \quad (13)$$

Полученное значение переводим в миллиметры и округляем до целого.

Толщина фланца, м:

$$h_{\phi} = \frac{d_{\text{я}}}{4}. \quad (14)$$

Длина воротничка, м:

$$l_B = 2,5 \dots 5 \cdot \frac{\Delta \cdot d_{\text{я}}}{\delta_{\text{пл}}}, \quad (15)$$

где Δ - толщина латунной трубки, $\Delta = 0,25$ мм.

Длина стопа, м:

$$l_{cm} = \frac{L - \delta_{пл}}{2}. \quad (16)$$

2.2 Расчет параметров катушки

Средний диаметр катушки, м:

$$D_{cp} = 0,5 D_B - 2\delta_{kk} + d_j + 2b, \quad (17)$$

где b – толщина каркаса, м (обычно $b = (0,5...2,5) \cdot 10^{-3}$ м);

δ_{kk} – зазор между катушкой и корпусом, м (для низковольтных электромагнитов $\delta_{kk} = (0,25...2) \cdot 10^{-3}$ м).

Сечение провода, м²:

$$q = \frac{F_k \cdot \rho \cdot l_{cp}}{U}, \quad (18)$$

где l_{cp} – средняя длина витка катушки, м.

$$l_{cp} = \frac{\pi}{2} D_B + d_j. \quad (19)$$

По сечению находим диаметр провода без изоляции, м:

$$d = 1,13 \cdot \bar{q}. \quad (20)$$

Выбираем марку провода по рекомендациям таблицы Б.1 приложения Б. Диаметр провода округляется до стандартного значения в соответствии с маркой провода, и для принятой марки провода находится его диаметр в изоляции $d_{из}$.

Длина катушки:

$$l_k = L - 2 b + h_\phi . \quad (21)$$

Число рядов катушки:

$$N_1 = \frac{h_k - \Delta_{и}}{d_{из}}, \quad (22)$$

где $\Delta_{и}$ – общая толщина изоляции, которая наматывается на латунную втулку и по наружному диаметру катушки, плюс допуск на укладку, $\Delta_{и} = 1,5$ мм.

Полученное значение округляем до целых в меньшую сторону, так как в противном случае обмотка выйдет за пределы катушки.

Число витков в одном ряду:

$$N_2 = \frac{l_k - 2 \cdot \Delta_{щ}}{d_{из}} \cdot 0,95 - 1, \quad (23)$$

где $\Delta_{щ}$ – толщина одной щеки, $\Delta_{щ} = 0,5 \dots 2$ мм.

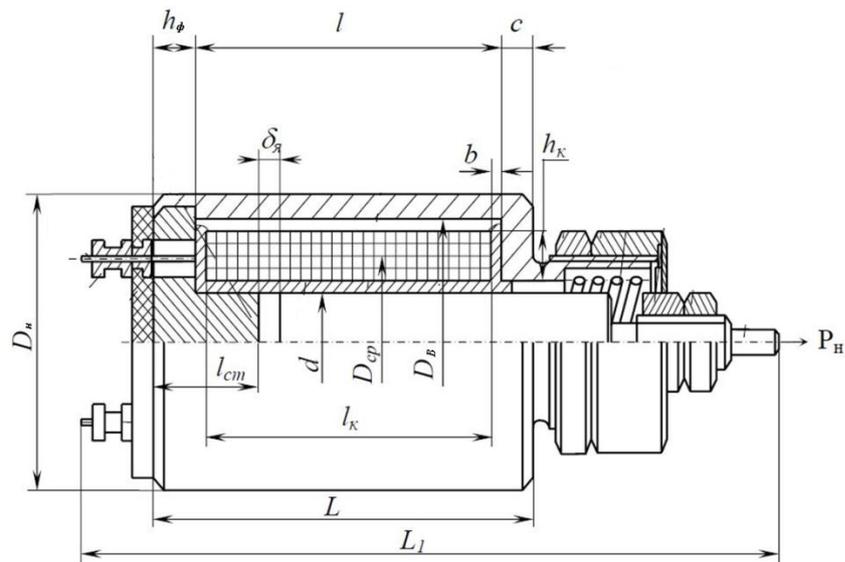


Рисунок 13 – Размеры электромагнита форсунки

Полученное значение округляем до целых в меньшую сторону, так как в противном случае обмотка выйдет за пределы катушки.

Число витков катушки:

$$W = N_1 \cdot N_2. \quad (24)$$

Длина намоточного провода:

$$L_{np} = l_{cp} \cdot W. \quad (25)$$

Активное сопротивление обмотки при нагреве можно определить в виде:

$$R_i = R_{0i} \cdot (1 + \alpha_t \cdot \Delta t) \cdot L_{np}, \quad (26)$$

где R_{0i} – сопротивление 1м провода обмотки данного сечения, Ом. Находится по таблице Б1 в приложении Б;

Δt – разность температур нагретой обмотки и температуры окружающей среды, $\Delta t = 70^{\circ}\text{C}$.

Суммарные потери в меди обмоток:

$$P_M = \frac{U^2}{R_i}, \quad (27)$$

где R_i – активное сопротивление i -той обмотки, Ом.

Расчет индуктивности катушки.

Индуктивность катушки зависит от ее геометрических размеров, числа витков и способа намотки катушки. Чем больше диаметр, длина намотки и число витков катушки, тем больше ее индуктивность.

$$L_{\text{И}} = \mu_0 \cdot W^2 \cdot S_k / l_k, \quad (28)$$

где S_k – площадь поперечного сечения катушки, м^2 .

$$S_k = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}^2}{4}, \quad (29)$$

Суммарные потери в магнитопроводе

$$P_{\text{ст}} = K_{\text{сб}} \cdot p_{\text{ст}} \cdot B_{\delta}^2 \cdot G_{\text{ст}}, \quad (30)$$

где $K_{\text{сб}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в магнитопроводе при сборке, $K_{\text{сб}} = 1,1 \dots 1,3$;

$G_{\text{ст}}$ – масса магнитопровода, кг;

$p_{ст}$ – удельные потери в материале магнитопровода, Вт/кг. Принимать $p_{ст} = 0,8 \dots 1,1$ Вт/кг.

Вес магнитопровода подсчитывают по формуле:

$$G_{ст} = S \cdot \gamma_{ст} \cdot L \cdot кз, \quad (31)$$

где $\gamma_{ст}$ – плотность электротехнической стали, $\gamma_{ст} = 7800$ кг/м³;

кз – коэффициент, равный 1,1.

Определение тепловой напряженности:

$$Q_o = \frac{P}{S_{охл}} \leq Q_{доп}, \quad (32)$$

где $S_{охл}$ – поверхность охлаждения обмоток трансформатора, м²;

$Q_{доп}$ – допустимая тепловая напряженность, Вт/м². Принимают $Q_{доп} = 800$ Вт/м².

Поверхность охлаждения определяют по формуле:

$$S_{охл} = \pi \cdot D_n \cdot l_k, \quad (33)$$

Если результаты расчета показывают, что Q_o превышает допустимое значение более чем на 10 %, то необходимо уменьшить плотность тока в обмотках, выбирая меньшее сечение проводников. Если же Q_o меньше допустимого на 25 % - 30 %, то следует наоборот, повысить плотность тока в обмотках.

Массу меди обмоток определяется по формуле:

$$G_M = \gamma_m \cdot L_{np} \cdot q_i, \quad (34)$$

где γ_m – плотность медной проволоки, $\gamma_m = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

q_i – площадь поперечного сечения провода (таблица А.1 приложение А).

Масса электромагнита:

$$G_{эм} = G_M + G_{ст} \quad (35)$$

где G_M – масса меди обмоток трансформатора, кг.

2.3 Расчет производительности форсунки

Частота следования прямоугольных импульсов напряжения современного бензинового ДВС, зависящая от частоты вращения КВ, числа цилиндров и групп форсунок, может быть определена следующим образом:

$$f_{имп} = \frac{n \cdot z_{цил}}{30 \cdot k \cdot z} \quad (36)$$

где n – частота вращения КВ двигателя, мин^{-1} ;

$z_{цил}$ – число цилиндров двигателя;

k – тактность двигателя ($k=4$);

z – число групп форсунок.

Управляющим параметром ЭМФ является продолжительность открытого ее состояния. Изменение жесткости возвратной пружины не оказывает существенного влияния на дозирование. Количество подаваемого топлива определяется длительностью электрического импульса,

поступающего от ЭБУ на обмотку ЭМФ. Частота срабатывания дозатора, равная частоте следования тактов впуска двигателя, обеспечивает необходимую равномерность распределения горючей смеси по цилиндрам. Период следования импульсов t управления дозатором четырехтактного двигателя может быть представлен зависимостью:

$$t = \frac{1}{f_{\text{имп}}}. \quad (37)$$

К важнейшим гидравлически характеристикам ЭМФ относятся статическая и динамическая производительности. Статическая производительность характеризуется количеством топлива, проходящим через ЭМФ в единицу времени при заданном давлении и полном открытии клапана.

$$g_o = \frac{Q_{\text{цт}}}{t_{\text{цв}}}, \quad (38)$$

где $Q_{\text{цт}}$ – цикловая подача топлива при полной мощности, см^3 ;

$t_{\text{цв}}$ – продолжительность впрыскивания, мин.

Цикловая подача топлива ЭМФ в зависимости от длительности и формы электрического управляющего импульса может быть определена по следующей зависимости:

$$Q_{\text{цт}} = \mu_{\phi} \cdot f_{\phi} \cdot t_{\text{цв}} \cdot \overline{2/\rho_T} \cdot \overline{p_{\text{ср}}}, \quad (39)$$

где $\mu_{\phi} f_{\phi}$ – площадь эффективного сечения дозирующего отверстия форсунки, м^2 ;

p_{cp} – средний перепад давления на дозирующем отверстии между входом (давление в рампе) и выходом форсунки (впускной трубопровод),
 $p_{cp} = 0,5$ МПа;

ρ_T – плотность топлива, кг/м³;

$t_{цв}$ – время открытого состояния форсунки (впрыск), с.

$$\mu_{\phi} f_{\phi} = 0,05 \cdot S. \quad (40)$$

В уравнении (39) величины $\mu_{\phi} f_{\phi}$, ρ_T и p_{cp} являются постоянными, поэтому топливоподачей управляют путем изменения продолжительности управляющего импульса, подаваемого на обмотку ЭМФ.

Динамическую производительность (мм³/цикл) определяют путем подачи на форсунку серии импульсов с заданным периодом $t = 10$ мс (частота импульсов 100 Гц) и заданной контрольной длительностью, которую выбирают на режиме холостого хода (импульс ХХ). Расходную характеристику строят по нескольким точкам. Большая часть зависимости цикловой подачи от длительности импульса имеет линейный характер, но в начале и в конце она теряет линейность. Для форсунки разработанной конструкции достаточно использовать по одной точке статической и динамической характеристик.

Нелинейность характеристики определяет скважность – отношение длительности импульсов $t_{имп}$ к периоду их следования t , выраженное в процентах. При $t_{имп} = 5$ мс и $t = 10$ мс скважность равна 50 %. Нелинейный участок начинается не при больших длительностях импульса, а при больших скважностях, то есть когда между окончанием предыдущего импульса и началом следующего остается слишком мало времени. Клапан просто не успевает нормально закрыться, и происходит подача лишнего топлива. ЭМФ остается полностью открытой не только при скважностях, равных 100 %, но

и меньших, близких к ним. Изменение $t_{имп}$ в этих пределах не приводит к изменению цикловой подачи, то есть форсунка становится неуправляемой.

Таблица 1 – Продолжительность одного оборота коленчатого вала

Параметр	Частота вращения КВ, мин ⁻¹									
	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000
Продолжительность одного оборота КВ, мс	100	50	33	25	20	16	14	12	11	10
одного такта	50	25	16,5	12,5	10	8	7	6	5,5	5

Значение цикловая подача топлива ЭМФ рассчитывается для значений частот вращения коленчатого вала от 600 до 6000 об/мин, на основании этих данных строится график зависимости цикловой подача топлива от частоты вращения коленчатого вала.

Пример расчета ЭМФ представлен в приложении В.

2.4 Контрольные вопросы

1. Назовите основные параметры катушки
2. Назовите основные параметры электромагнита
3. Что необходимо сделать, если при расчете электромагнита его тепловая напряженность серьезно отличается от допустимых значений
4. По какой причине количество рядов катушки и число витков в одном ряду округляются в меньшую сторону
5. Чем определяется подбор проводов катушки электромагнита?
6. Назовите отличия между статической и динамической производительностью форсунки
7. Какой конструктивный параметр влияет на производительность форсунки?

Список использованных источников

1. Агеев, А.Ю. Расчет катушки электромагнита клапанного типа: Руководство к лабораторной работе / А.Ю. Агеев – Северск: СТИ ТПУ, 1997. – 19 с.
2. Витенберг, М.И. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи / М.И. Витенберг - М.: Энергия, 1966. - 724 с.
3. Дворников, Г.П. Основы электроники: учеб. пособие для вузов / Г.П. Дворников, А.М. Федотов, А.В. Пузаков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. – 128 с.
4. Дворников, Г.П. Электротехника и электроника: метод. указ. по выполнению расчетно-граф. задания/ Г.П. Дворников, А.В. Пузаков, А.М. Федотов. – Оренбург: ОГУ, 2003. – 40с.
5. Ерохов, В.И. Проектирование и расчет электромагнитных форсунок двигателей с принудительным воспламенением / В.И. Ерохов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. - №4 (28). – С. 42-50.
6. Ерохов, В.И. Системы впрыска бензиновых двигателей (конструкция, расчет, диагностика). учебник для вузов / В.И. Ерохов – М.: Горячая линия-Телеком, 2011. - 552 с. – ISBN 978-5-9912-0130-8.
7. Козаков, Л.А. Электромагнитные устройства радиоэлектронной аппаратуры / Л.А. Козаков – М.: Советское радио, 1991. – 352 с.
8. Короткий, Г. П. Методические указания по выполнению курсового проекта дисциплина – «Технические средства автоматизации» / Г.П. Короткий – Орел: Орловский государственный технический университет, 2009. – 27 с.
9. Лачин, В. И. Электроника: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. - 8-е изд. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. - 704 с.

10. Прянишников, В. А. Электроника: полный курс лекций / В. А. Прянишников. - 5-е изд. - СПб.: Корона Принт, 2006. - 416 с.
11. Пузаков, А. В. Расчет однофазных выпрямителей: методические указания для студентов / А. В. Пузаков, А. М. Федотов. - Оренбург: ОГУ. - 2017. - 74 с.
12. Рекус, Г. Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями: учеб. пособие для вузов / Г. Г. Рекус. - Москва: Высш. шк., 2008. - 343 с.
13. Сахаров, П.В. Проектирование электрических аппаратов. Общие вопросы проектирования. учеб. пособие для студентов электротехнических специальностей / П.В. Сахаров – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
14. Сливинская, А.Г. Электромагниты и постоянные магниты / А.Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
15. Справочное руководство для радиолюбителей по конструированию радиоэлектронных устройств. В 2-х частях /под редакцией А.А. Четвертакова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Ч1-336 с.; Ч2-287 с.
16. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс: учеб. для вузов/ А.А. Чунихин. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
17. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов / В. В. Кононенко [и др.]; под ред. В. В. Кононенко. - 4-е изд. - Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. - 778 с.
18. Электротехника и электроника: учеб. для студентов образоват. учреждений сред. проф. образования / под ред. Б. И. Петленко. - 5-е изд., стер. - М.: Академия, 2009. - 320 с.

Приложение А

(обязательное)

Исходные данные для расчета

Таблица А.1 – Исходные данные

№ варианта	Ход штока, мм	Напряжение, В	Усилие на штоке, Н	Количество цилиндров двигателя	Количество групп форсунок	Количество впрысков топлива в один цилиндр за один цикл
1	0,3	24	10	4	4	1
2	0,5	36	28	6	3	2
3	0,7	36	21	4	4	3
4	0,2	24	14	6	6	1
5	0,9	14	18	8	4	2
6	1,1	48	30	8	8	3
7	1	54	40	8	4	1
8	0,8	24	34	6	6	2
9	0,9	36	30	4	4	3
10	1,5	72	19	10	5	1
11	1	90	27	4	4	2
12	0,5	14	15	6	6	3
13	0,3	14	12	4	1	1
14	0,2	14	7	6	6	2
15	0,8	48	26	8	4	3
16	0,7	24	21	8	8	1
17	0,8	36	31	8	4	2
18	0,9	28	27	6	6	3
19	0,4	14	18	4	4	1
20	0,7	42	14	10	10	2
21	1,5	50	41	4	1	3
22	0,5	60	25	6	3	1
23	0,4	14	15	4	4	2
24	0,9	90	14	6	6	3
25	1,3	56	20	8	4	1
26	1,1	48	31	8	8	2
27	0,9	38	21	8	8	3
28	0,3	24	12	6	1	1
29	0,4	48	13	4	4	2
30	0,8	24	15	10	5	3

Приложение Б

(справочное)

Провода обмоточные медные

Таблица Б.1 – Характеристики медных проволок

Номинальный диаметр медной проволоки, мм	Площадь поперечного сечения проволоки, мм	Электрическое сопротивление одного метра проволоки, Ом	Максимальный наружный диаметр проводов, мм не более	
			Тип 1	Тип 2
1	2	3	4	5
0,020	0,0003141	54,905	0,025	0,027
0,025	0,0004908	35,139	0,031	0,034
0,032	0,0008042	21,445	0,04	0,043
0,040	0,0012566	13,726	0,05	0,054
0,050	0,0019634	8,7848	0,062	0,68
0,063	0,0031172	5,5331	0,078	0,85
0,071	0,0039591	4,3563	0,088	0,095
0,080	0,0050265	3,4316	0,098	0,105
0,090	0,0063617	2,7113	0,11	0,117
0,100	0,0078539	2,1962	0,121	0,129
0,125	0,0122718	1,4254	0,149	0,159
0,140	0,0153938	1,1205	0,166	0,176
0,150	0,0176714	0,976	0,176	0,187
0,160	0,0201061	0,85788	0,187	0,199
0,170	0,022698	0,75986	0,198	0,21
0,180	0,0254468	0,67783	0,209	0,222
0,190	0,0283528	0,60831	0,22	0,234
0,200	0,0314159	0,54905	0,23	0,245
0,210	0,034636	0,49796	0,243	0,258
0,236	0,0437435	0,39428	0,269	0,285
0,250	0,0490873	0,35139	0,284	0,301
0,265	0,0551545	0,31271	0,3	0,319
0,280	0,0615752	0,28013	0,315	0,334
0,300	0,0706858	0,24400	0,337	0,355
0,315	0,0779311	0,22132	0,352	0,371
0,335	0,0989797	0,17434	0,395	0,414
0,380	0,1134114	0,15208	0,421	0,441
0,400	0,1256637	0,13726	0,442	0,462

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5
0,425	0,1418625	0,12158	0,469	0,489
0,450	0,1590431	0,10845	0,495	0,516
0,475	0,1772054	0,097329	0,521	0,543
0,500	0,1963495	0,87848	0,548	0,569
0,530	0,2206183	0,78177	0,579	0,601
0,560	0,2463008	0,070032	0,611	0,632
0,600	0,2827433	0,061000	0,653	0,676
0,630	0,3117245	0,055328	0,684	0,706
0,670	0,3525652	0,048919	0,726	0,749
0,710	0,3959191	0,043566	0,767	0,79
0,750	0,4417864	0,039044	0,809	0,832
0,800	0,5026548	0,034316	0,861	0,885
0,850	0,5674501	0,30398	0,913	0,937
0,900	0,6361724	0,027113	0,965	0,99
0,950	0,7088218	0,024335	1,017	1,041
1,000	0,7853981	0,021962	1,068	1,093
1,060	0,8824733	0,019546	1,13	1,155
1,120	0,9852034	0,017508	1,192	1,217
1,180	1,0935883	0,015773	1,254	1,279
1,250	1,2271845	0,014056	1,325	1,351
1,320	1,3684777	0,012605	1,397	1,423
1,400	1,5393803	0,011205	1,479	1,506
1,500	1,7671458	0,009760	1,581	1,608
1,600	2,0106192	0,008579	1,683	1,711
1,700	2,2698006	0,007599	1,785	1,813
1,800	2,5446897	0,006778	1,888	1,916
1,900	2,8352872	0,006084	1,99	2,018
2,000	3,141592	0,005490	2,092	2,12
2,120	3,5298932	0,004886	2,214	2,243
2,240	3,9408135	0,004377	2,336	2,366
2,360	4,3743535	0,004300	2,459	2,488
2,500	4,9087382	0,003514	2,601	2,631

Приложение В

(рекомендуемое)

Пример расчета электромагнитной форсунки

Исходные данные для выполнения расчетно-графической работы

Ход штока – 0,8 мм;

Напряжение – 24 В;

Усилие на штоке – 15 Н,

Количество цилиндров двигателя – 4,

Количество групп форсунок – 4,

Количество впрысков топлива в цилиндр за цикл – 1.

Б.1 Расчет электромагнита

Выбор конструктивного типа и формы стопа

В инженерной практике широко распространен способ выбора типа и формы стопа электромагнита по конструктивному фактору (КФ):

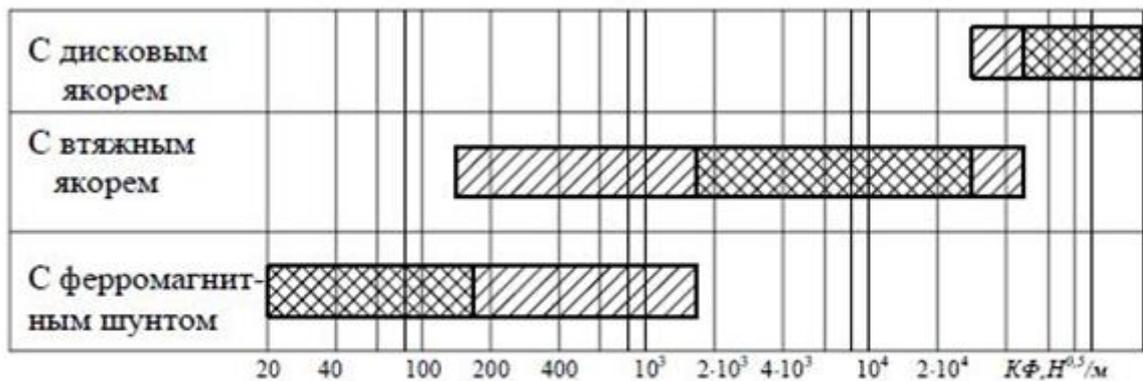
$$КФ = \frac{\bar{P}}{\delta}, \quad (Б.1)$$

где \bar{P} – тяговое усилие, Н

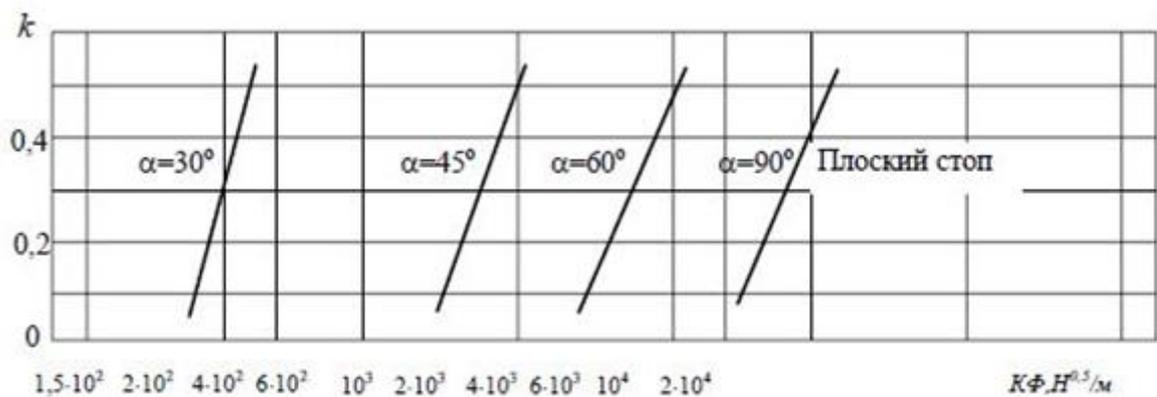
δ – ход якоря, м.

$$K\Phi = \frac{15}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 4841.$$

Воспользуемся диаграммой, представленной на рисунке В.1, для выбора типа электромагнита форсунки, а также, угла наклона стопа.



а



б

Рисунок В.1 Области применения, а - рациональных типов электромагнитов; б - рациональных форм стопов электромагнитов с втяжным якорем

Согласно диаграмме (рисунок В1) при значении $K\Phi = 4841$ наиболее оптимальным является электромагнит с втяжным якорем и углом наклона стопа $\alpha = 45^\circ$.

Расчет электромагнитов

Уточнение формы стопа и тягового усилия, создаваемого электромагнитом:

$$\delta_{\text{пл}} = \delta \cdot \cos^2 \alpha. \quad (\text{Б.2})$$

$$\delta_{\text{пл}} = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \cos^2 45^\circ = 0,0004 \text{ м.}$$

$$P_{\text{пл}} = \frac{P}{\cos^2 \alpha}. \quad (\text{Б.3})$$

$$P_{\text{пл}} = \frac{15}{\cos^2 45} = 30 \text{ Н.}$$

Определение основных размеров электромагнита

Диаметр якоря электромагнита:

$$d_{\text{я}} = \sqrt{\frac{8 \cdot P_{\text{пл}} \cdot \mu_0}{3,14 \cdot B_{\delta}^2}}, \quad (\text{Б.4})$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Г/м.

B_{δ} – магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл, $B_{\delta} = 0,8$ Тл.

$$d_{\text{я}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 30 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,8^2}} = 0,0122 \text{ м} = 12,2 \text{ мм.}$$

Площадь якоря:

$$S = \frac{3,14 \cdot d_{\text{я}}^2}{4}, \quad (\text{Б.5})$$

$$S = \frac{3,14 \cdot 0,0122^2}{4} = 0,00012 \text{ м}^2.$$

Уточнение величины магнитной индукции, которая соответствует округленному значению $d_{я}$:

$$B_{\delta} = \frac{\sqrt{8 \cdot P_{пл} \cdot \mu_0}}{3,14 \cdot d_{я}^2} \quad (\text{Б.6})$$

$$B_{\delta} = \frac{\sqrt{8 \cdot 30 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}}{3,14 \cdot 0,0112^2} = 0,8 \text{ Тл.}$$

Определение магнитодвижущей силы катушки:

$$F_k = K_{СТ} \cdot \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot \delta_{пл}, \quad (\text{Б.7})$$

где $K_{СТ}$ – коэффициент, учитывающий падение м.д.с. на остальных, кроме рабочего зазора, участках магнитопровода. $K_{СТ}=1,3$.

$$F_k = 1,3 \cdot \frac{0,8}{1,256 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,0004 = 331,21 \text{ Н.}$$

Толщина катушки h_k равна:

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\rho \cdot F_k^2}{2 \cdot K_T \cdot f_k \cdot \theta \cdot \lambda^2}} \quad (\text{Б.8})$$

где K_T – коэффициент теплопередачи, $K_T = 12 \frac{Вт}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$;

θ – превышение температуры, $\theta = 70 \text{ °C}$;

f_k – коэффициент заполнения катушки, $f_k = 0,5$;

λ – отношение длины катушки L к её толщине h_k , $\lambda = 5$;

ρ – удельное сопротивление меди при заданном превышении температуры катушки θ .

$$\rho = \rho_{20} (1 + \alpha_t(20 + \theta)) , \quad (\text{Б.9})$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление меди при температуре 20°C , равное $1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м,

α_t – температурный коэффициент сопротивления меди; $\alpha_T = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$,

$$\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004 \cdot (20 + 70)) = 2,38 \cdot 10^{-8}.$$

$$h_k = 3 \frac{2,38 \cdot 10^{-8} \cdot 331,21^2}{2 \cdot 12 \cdot 0,5 \cdot 70 \cdot 5^2} = 0,005 \text{ м.}$$

Скорректируем отношение λ

$$\lambda = \frac{\rho \cdot F_K^2}{2 \cdot K_T \cdot f_K \cdot \theta \cdot h_K^3} \quad (\text{Б.10})$$

$$\lambda = \frac{2,38 \cdot 10^{-8} \cdot 331,21^2}{2 \cdot 12 \cdot 0,5 \cdot 70 \cdot 0,005^3} = 5.$$

Длина электромагнита:

$$L = h_k \cdot \lambda. \quad (\text{Б.11})$$

$$L = 0,005 \cdot 5 = 0,025 \text{ м.}$$

Определение остальных размеров магнитопровода

Внутренний диаметр магнитопровода:

$$D_B = d_{\text{я}} + 2 \cdot h_{\text{к}}. \quad (\text{Б.12})$$

$$D_B = 0,0122 + 2 \cdot 0,005 = 0,022 \text{ м.}$$

Наружный диаметр корпуса:

$$D_H = \sqrt{D_B^2 + d_{\text{я}}^2}. \quad (\text{Б.13})$$

$$D_H = \sqrt{0,022^2 + 0,0122^2} = 0,025 \text{ м} = 25 \text{ мм.}$$

Толщина фланца:

$$h_{\text{ф}} = \frac{d_{\text{я}}}{4}. \quad (\text{Б.14})$$

$$h_{\text{ф}} = \frac{0,0122}{4} = 0,003 \text{ м} = 3 \text{ мм.}$$

Длина воротничка:

$$l_B = 2,5 \dots 5 \cdot \frac{\Delta \cdot d_{\text{я}}}{\delta_{\text{пл}}}, \quad (\text{Б.15})$$

где Δ - толщина латунной трубки, $\Delta=0,25$ мм.

$$l_B = 4 \cdot \frac{0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0122}{0,0004} = 0,031 \text{ м} = 31 \text{ мм.}$$

Длина стопа:

$$l_{cm} = \frac{L - \delta_{пл}}{2}. \quad (\text{Б.16})$$

$$l_{cm} = \frac{0,025 - 0,0004}{2} = 0,0123 \text{ м.}$$

Б.2 Определение параметров катушки

Средний диаметр катушки:

$$D_{cp} = 0,5 D_B - 2\delta_{kk} + d_{я} + 2b, \quad (\text{Б.17})$$

где b – толщина каркаса, м, $b = 10^{-3}$ м;

δ_{kk} – зазор между катушкой и корпусом, м (для низковольтных электромагнитов $\delta_{kk} = 10^{-3}$ м.)

$$D_{cp} = 0,5 \cdot 0,022 - 2 \cdot 10^{-3} + 0,0122 + 2 \cdot 10^{-3} = 0,017 \text{ м.}$$

Сечение провода:

$$q = \frac{F_k \cdot \rho \cdot l_{cp}}{U}, \quad (\text{Б.18})$$

где l_{cp} – средняя длина витка катушки.

$$l_{cp} = \frac{3,14}{2} D_B + d_{я}, \quad (\text{Б.19})$$

$$l_{cp} = \frac{3,14}{2} \cdot 0,022 + 0,0122 = 0,054 \text{ м.}$$

$$q = \frac{331,21 \cdot 2,38 \cdot 10^{-8} \cdot 0,054}{24} = 1,77 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 0,017 \text{ мм}^2.$$

По сечению находим диаметр провода без изоляции:

$$d = 1,13 \cdot \sqrt{q}. \quad (\text{Б.20})$$

$$d = 1,13 \cdot \sqrt{1,77 \cdot 10^{-8}} = 0,00015 \text{ м} = 0,15 \text{ мм.}$$

Выбираем марку провода по рекомендациям таблицы Б1 приложения Б методических указаний. Примем провод диаметром $d_{из}=0,15$ мм.

Активное сопротивление обмотки при нагреве можно определить в виде:

$$R_i = R_{0i} \cdot (1 + \alpha_t \cdot \Delta t) \cdot L_{np}, \quad (\text{Б.21})$$

где R_{0i} – сопротивление 1 м провода обмотки данного сечения (таблица Б1, приложение Б), Ом, $R_{0i} = 0,976$ Ом;

Δt – разность температур нагретой обмотки и температуры окружающей среды, $\Delta t = 70^\circ\text{C}$.

Длина катушки:

$$l_k = L - 2 \cdot b + h_\phi. \quad (\text{Б.22})$$

$$l_k = 0,025 - 2 \cdot 10^{-3} + 0,0031 = 0,017 \text{ м.}$$

Число рядов катушки:

$$N_1 = \frac{h_k - \Delta_{и}}{d_{из}}, \quad (\text{Б.23})$$

где $\Delta_{и}$ – общая толщина изоляции, которая наматывается на латунную втулку и по наружному диаметру катушки, плюс допуск на укладку, $\Delta_{и}=1,5$ мм.

$$N_1 = \frac{0,005 - 1,5 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 10^{-3}} = 23,27 = 23.$$

Число витков в одном ряду:

$$N_2 = \frac{l_k - 2 \cdot \Delta_{щ}}{d_{из}} \cdot 0,95 - 1, \quad (\text{Б.24})$$

где $\Delta_{щ}$ – толщина одной щеки, $\Delta_{щ}=1$ мм.

$$N_2 = \frac{0,017 - 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,95 - 1 = 92,94 = 92.$$

Число витков катушки:

$$W = N_1 \cdot N_2. \quad (\text{Б.25})$$

$$W = 23 \cdot 92 = 2116.$$

Длина намоточного провода:

$$L_{np} = l_{cp} \cdot W. \quad (\text{Б.26})$$

$$L_{np} = 0,054 \cdot 2116 = 114,57 \text{ м.}$$

$$R_i = 0,976 \cdot 1 + 0,004 \cdot 70 \cdot 114,57 = 143,1 \text{ Ом.}$$

Суммарные потери в меди обмоток:

$$P_M = \frac{U^2}{R_i}, \quad (\text{Б.27})$$

где R_i – активное сопротивление i -той обмотки, Ом.

$$P_M = \frac{24^2}{143,1} = 4,02.$$

Расчет индуктивности катушки.

Индуктивность катушки зависит от ее геометрических размеров, числа витков и способа намотки катушки. Чем больше диаметр, длина намотки и число витков катушки, тем больше ее индуктивность.

$$L_{И} = \mu_o \cdot W^2 \cdot \frac{S_k}{l_k}. \quad (\text{Б.28})$$

где S_k – площадь поперечного сечения катушки, м^2 .

$$S_k = \frac{3,14 \cdot D_{cp}^2}{4} \quad (\text{Б.29})$$

$$S_k = \frac{3,14 \cdot 0,017^2}{4} = 0,00023 \text{ м}^2.$$

$$L_{И} = 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2116^2 \cdot \frac{0,00023}{0,017} = 0,077 \text{ Гн.}$$

Суммарные потери в магнитопроводе:

$$P_{ст} = K_{сб} \cdot p_{ст} \cdot B_{\delta}^2 \cdot G_{ст}, \quad (\text{Б.30})$$

где $K_{сб}=1,1$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в магнитопроводе при сборке;

$G_{ст}$ – масса магнитопровода, кг;

$p_{ст}$ – удельные потери в материале магнитопровода, Вт/кг, $p_{ст}=0,8 \dots 1,1$ Вт/кг.

Вес магнитопровода подсчитывают по формуле:

$$G_{ст} = S \cdot \gamma_{ст} \cdot L \cdot кз, \quad (\text{Б.31})$$

где $\gamma_{ст}=7800 \text{ кг/м}^3$ – плотность электротехнической стали;

кз – коэффициент, равный 1,1.

$$G_{ст} = 0,00011 \cdot 7800 \cdot 0,025 \cdot 1,1 = 0,025 \text{ кг.}$$

$$P_{ст} = 1,1 \cdot 0,9 \cdot 0,8^2 \cdot 0,025 = 0,016 \text{ Вт.}$$

Определение тепловой напряженности:

$$Q_o = \frac{P}{S_{\text{охл}}} \leq Q_{\text{доп}}, \quad (\text{Б.32})$$

где $S_{\text{охл}}$ – поверхность охлаждения обмоток трансформатора, м^2 ;

$Q_{\text{доп}}$ – допустимая тепловая напряженность, $\text{Вт}/\text{м}^2$. $Q_{\text{доп}}=800 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Поверхность охлаждения определяют по формуле:

$$S_{\text{охл}} = 3,14 \cdot D_H \cdot l_K. \quad (\text{Б.33})$$

$$S_{\text{охл}} = 3,14 \cdot 0,025 \cdot 0,017 = 0,0013 \text{ м}^2.$$

$$Q_o = \frac{4,02 + 0,016}{0,0013} = 3010 > 800.$$

Значение Q_o больше $Q_{\text{доп}}$ более чем на 30 %, соответственно подберем провод с меньшей площадью сечения для снижения тепловых потерь.

Согласно таблицы Б1 приложения Б методических указаний выбираем провод диаметром $d_{\text{из}}=0,1 \text{ мм}$.

Число рядов катушки:

$$N_1 = \frac{0,005 - 1,5 \cdot 10^{-3}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 34,91 = 34.$$

Число витков в одном ряду:

$$N_2 = \frac{0,017 - 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,1 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,95 - 1 = 139,91 = 139.$$

Число витков катушки:

$$W = 34 \cdot 139 = 4726.$$

Длина намоточного провода:

$$L_{np} = 0,054 \cdot 4726 = 255,9 \text{ м.}$$

Активное сопротивление обмотки при нагреве можно определить в виде:

$$R_i = 0,21962 \cdot 1 + 0,004 \cdot 70 \cdot 255,9 = 719,36 \text{ Ом.}$$

Суммарные потери в меди обмоток:

$$P_M = \frac{24^2}{719,36} = 0,8.$$

Индуктивность катушки:

$$L_{и} = 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 4726^2 \cdot \frac{0,00023}{0,017} = 0,39 \text{ Гн.}$$

Определение тепловой напряженности:

$$Q_o = \frac{0,8 + 0,016}{0,0013} = 608,59 < 800.$$

Тепловая напряженность находится в допустимом пределе, соответственно оставляем подобранный провод диаметром $d_{мз} = 0,1 \text{ мм.}$

Общая масса форсунки определяется по формуле:

$$G_{\text{тр}} = G_{\text{М}} + G_{\text{ст}}, \quad (\text{Б.34})$$

где $G_{\text{М}}$ – масса меди обмоток трансформатора, кг.

Массу меди обмоток определяется по формуле:

$$G_{\text{М}} = \gamma_{\text{м}} \cdot L_{\text{нр}} \cdot q_i, \quad (\text{Б.35})$$

где $\gamma_{\text{м}}$ – плотность медной проволоки, $\gamma_{\text{м}} = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

q_i – площадь поперечного сечения провода, $q_i = 0,0078539 \text{мм}^2$.

$$G_{\text{М}} = 8900 \cdot 255,89 \cdot 0,0078539 \cdot 10^{-6} = 0,018 \text{ кг}$$

$$G_{\text{тр}} = 0,018 + 0,025 = 0,043 \text{ кг.}$$

Б.3 Расчёт производительности форсунки

Частота следования прямоугольных импульсов напряжения современного бензинового ДВС, зависящая от частоты вращения КВ, числа цилиндров и групп форсунок, может быть определена следующим образом:

$$f_{\text{имп}} = \frac{n \cdot c \cdot z_{\text{цил}}}{30 \cdot k \cdot z} \quad (\text{Б.36})$$

где n – частота вращения КВ двигателя, мин^{-1} ;

c – количество впрысков топлива за 1 цикл;

$z_{\text{цил}}$ – число цилиндров двигателя;

k – тактность двигателя ($k=4$);

z – число групп форсунок.

$$f_{\text{имп}} = \frac{600 \cdot 1 \cdot 4}{30 \cdot 4 \cdot 4} = 5 \text{ Гц}$$

Период следования импульсов t управления дозатором четырехтактного двигателя может быть представлен зависимостью:

$$t = \frac{1}{f_{\text{имп}}}. \quad (\text{Б.37})$$

$$t = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ с.}$$

Статическая производительность характеризуется количеством топлива, проходящим через ЭМФ в единицу времени при заданном давлении и полном открытии клапана.

$$g_o = \frac{Q_{\text{цт}}}{t_{\text{цв}}}, \quad (\text{Б.38})$$

где $Q_{\text{цт}}$ – цикловая подача топлива при полной мощности, см^3 ;

$t_{\text{цв}}$ – продолжительность впрыскивания, мин.

Цикловая подача топлива ЭМФ в зависимости от длительности и формы электрического управляющего импульса может быть определена по следующей зависимости:

$$Q_{\text{цт}} = \mu_{\text{ф}} \cdot f_{\text{ф}} \cdot t \cdot \sqrt{2/\rho_{\text{т}}} \cdot \sqrt{p_{\text{ср}}}, \quad (\text{Б.39})$$

где $\mu_{\text{ф}} f_{\text{ф}}$ – площадь эффективного сечения дозирующего отверстия форсунки, м²;

$p_{\text{ср}}$ – средний перепад давления на дозирующем отверстии между входом (давление в рампе) и выходом форсунки (впускной трубопровод),

$$p_{\text{ср}} = 0,5 \text{ МПа};$$

$\rho_{\text{т}}$ – плотность топлива, кг/м³;

t – время открытого состояния форсунки (впрыск), с.

$$\mu_{\text{ф}} f_{\text{ф}} = 0,9 \cdot S. \quad (\text{Б.40})$$

$$\mu_{\text{ф}} f_{\text{ф}} = 0,9 \cdot 0,00011 = 0,000106 \text{ м}^2.$$

$$Q_{\text{цт}} = 0,000106 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2/0,75 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt{0,5} = 0,00077 \text{ см}^2.$$

$$g_o = \frac{0,00077}{0,0033} = 0,23 \text{ см}^2 \text{ мин}$$

По формулам Б.36, Б.37, Б.39 произведем расчет параметров для заполнения таблицы В.1.

Таблица В.1 - Значения цикловой подачи в зависимости от частоты вращения коленчатого вала

Частота вращения КВ, об/мин	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000
Частота импульсов, Гц	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Продолжительность импульсов, с	0,200	0,100	0,067	0,050	0,040	0,033	0,029	0,025	0,022	0,020
Цикловая подача, кг x 10 ⁻⁴	7,7	3,9	2,6	1,9	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8

По данным из таблицы В1 построим график зависимости цикловой подачи топлива от частоты вращения коленчатого вала, представим его на рисунке В.2.

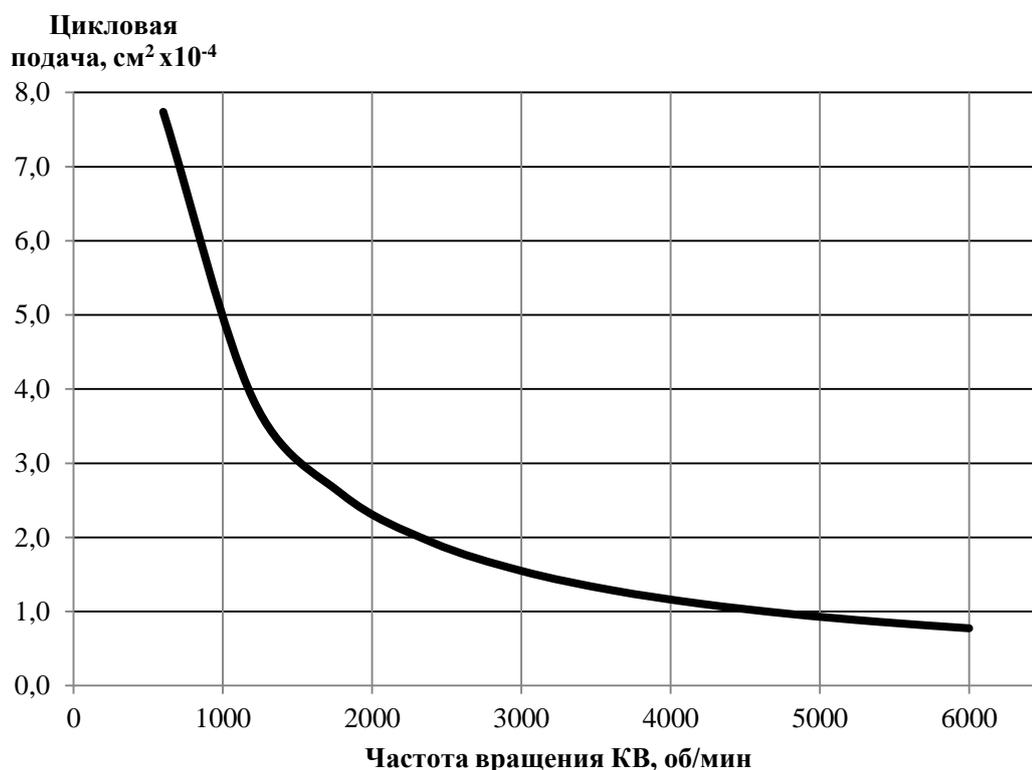


Рисунок В.2 – график зависимости цикловой подачи топлива от частоты вращения КВ