

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)



В.Е. ЮТТ, В.В. МОРОЗОВ, В.И. ЧЕПЛАНОВ

АППАРАТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАЖИГАНИЕМ И ВПРЫСКОМ ТОПЛИВА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(МАДИ)

В.Е. ЮТТ, В.В. МОРОЗОВ, В.И. ЧЕПЛАНОВ

АППАРАТЫ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ЗАЖИГАНИЕМ И ВПРЫСКОМ
ТОПЛИВА

*Допущено УМО вузов РФ по образованию
в области транспортных машин и транспортно-технологических
комплексов в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся
по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство»
направления подготовки «Эксплуатация наземного транспорта
и транспортного оборудования»*

МОСКВА
МАДИ
2013

УДК 621.3.01
ББК 31.211
Ю 92

Рецензенты:

проф. кафедры «Автотракторное электрооборудование» МАМИ *Малеев Р.А.*,
д-р техн. наук, проф. кафедры
«Автоматизированные системы управления» МАДИ *Васьковский А.М.*

Ютт, В.Е.

Ю 92 Аппараты систем управления зажиганием и впрыском топлива: учеб.
пособие / В.Е. Ютт, В.В. Морозов, В.И. Чепланов. – М.: МАДИ, 2013. - 112 с.

Настоящее пособие является составной частью курса «Теория, конструкция и расчет изделий АТЭ» и содержит материалы, необходимые для углубленного освоения разделов курса, относящихся к аппаратам систем управления зажиганием и впрыском топлива автомобильных бензиновых двигателей.

Пособие не охватывает всех разделов курса, относящихся к аппаратам систем управления зажиганием и впрыском топлива. Изложены, в основном, только вопросы, имеющие достаточно глубокую теоретическую проработку и позволяющие проводить расчеты значений базовых параметров аппаратов и пределов их изменения. В дальнейшем предполагается расширение диапазона охватываемых расчетами аппаратов и их параметров.

УДК 621.3.01
ББК 31.211

© МАДИ, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Целью рассматриваемого пособия является углубленное изучение теории работы, основных элементов конструкции аппаратов и электрических устройств, входящих в системы зажигания и управления двигателем внутреннего сгорания. В пособии рассматриваются также принципы и методы расчета этих устройств, позволяющие устанавливать требуемые характеристики устройств и определять их геометрические параметры и размеры. Основными устройствами электронных систем АТЭ являются:

- электронные блоки управления (контроллеры);
- исполнительные устройства систем управления (катушки зажигания; электромагнитные форсунки, электромагнитные клапаны, шаговые электродвигатели и т.п.);
- датчики различной физической природы и назначения, основанные на преобразовании измеряемых величин в электрические сигналы, пригодные в дальнейшем для микропроцессорной обработки.

В настоящее время существует большое количество таких устройств, их назначение и принципы действия существенно различаются, и рассмотреть их все в рамках настоящего пособия не представляется возможным. Однако на примере приведенных ниже расчетов базовых компонентов можно уяснить основные принципы и применять их в дальнейшем при изучении других устройств.

1. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ – НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ТРАДИЦИОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И ИХ АППАРАТОВ

1.1. Аппараты и системы зажигания 80-90-х годов XX века.

Тенденции развития

1.1.1. Катушки зажигания

Сохранилась традиционная конструкция катушек с маслonaполненным корпусом. Однако при наличии в системе электронного коммутатора выявилась необходимость защиты катушки от аварийного перегрева («взрыва») при выходе коммутатора из строя. Это обстоятельство, а также ряд других повлекли за собой возникновение новых технологических принципов оформления корпусов катушек – создание

так называемых «сухих» катушек и отказ от герметичных маслonaполненных корпусов. Повышение требований к электрической прочности высоковольтных деталей катушек в связи с увеличением энергетических показателей систем привело к созданию новых полимерных материалов с высокой поверхностной стойкостью (например, полибутилентерефталат – ПБТ). Высокие технологические свойства этого материала и его аналогов способствовали повсеместному их распространению при производстве катушек зажигания и других изделий автотракторного электрооборудования (АТЭ).

Катушки с двумя высоковольтными выводами (двухвыводные) ознаменовали начало процесса отказа от высоковольтного распределения искр при конструировании современных систем зажигания.

1.1.2. Распределители зажигания

В конструкциях распределителей зажигания произошел окончательный отказ от контактных прерывателей и осуществился переход к бесконтактным датчикам положения различного типа. Наибольшее распространение получили датчики на эффекте Холла, магнитоэлектрические и оптоэлектронные. В конструкциях распределителей следует отметить увеличение диаметров высоковольтных крышек и применение ПБТ и других новых полимеров в связи с ужесточившимися требованиями к *искростойкости*.

В некоторых конструкциях распределителей появились наряду с датчиками положения коленчатого вала дополнительно встроенные датчики фазы распределительного вала двигателя. Наметившаяся тенденция к отказу от высоковольтного распределения искр привела к снижению доли распределителей в общем объеме изделий АТЭ для бензиновых двигателей.

1.1.3. Электронные коммутаторы

За счет оптимизации процессов накопления энергии, применения толсто пленочной гибридной технологии, технологии поверхностного монтажа была осуществлена миниатюризация коммутаторов. Другим направлением совершенствования коммутаторов является применение специализированных схем, выполняемых по однокристалльной биполярной полупроводниковой технологии. Здесь следует назвать применение микросхемы L497B фирмы SGS-Thomson и

аналогичных по функциям микросхем производства других фирм. В России производство коммутаторов по гибридной толстопленочной технологии было освоено на основе лицензии фирмы Valeo (Франция). Освоено производство специализированной схемы (аналога L497B) в г. Ивано-Франковске (Украина) и в г.Воронеже (Российская Федерация).

1.1.4. Свечи зажигания

За счет применения комбинированных электродов свечей (медь-никель, медь-серебро, платина), а также многоэлектродных свечей и свечей с поверхностным разрядом было произведено расширение температурного диапазона зажигательных свечей. Проведенные мероприятия обеспечивали увеличение ресурса зажигательных свечей при возросших теплонапряженности двигателей и электрических нагрузках.

1.1.5. Развитие работ по созданию электронных систем управления зажиганием и впрыском топлива

Как и в других отраслях техники, для реализации сложных функций управления двигателем использовались методы и средства *аналоговой* и *цифровой* электроники. Аналоговые устройства были дешевле и конструктивно проще цифровых устройств. Аналоговые устройства обеспечивали преемственность новых конструкций со старыми электромеханическими устройствами, так как были построены на их основе. Однако эти преимущества аналоговых систем не позволили им занять устойчивое положение в развитии электронных систем управления автомобилем. Бурное развитие цифровой электронной техники определило и ее повсеместное распространение для целей создания систем управления автомобилем.

Решающим моментом в развитии *автомобильных* цифровых электронных систем было создание цифровой системы зажигания немецким инженером **доктором Хартигом**.

Основные (*пионерские*) достижения доктора Хартига:

- информация о положении и скорости коленчатого вала двигателя снимается с маховика двигателя, либо со специального зубчатого диска, жестко закрепленного на хвостовике коленчатого вала двигателя. В Японии, где цифровые системы появились раньше, чем в Европе, информация снималась с зубчатого диска, укрепленного на валу распределителя зажигания;

- впервые предложены и реализованы для автомобиля два способа цифрового кодирования информации о скорости вращения двигателя;
- впервые предложен способ кодирования информации о нагрузке с помощью мембранного датчика разрежения и частотного модулятора;
- впервые предложен способ распределения искр по цилиндрам четырехцилиндрового двигателя с помощью двухвыводных катушек;
- впервые упомянутые идеи были реализованы в комплексе в рамках единой конструкции системы зажигания.

Практически все эти идеи доктора Хартига нашли применение в последующих системах управления, однако реализованы они в массовом производстве были уже на другой элементной базе и другими фирмами.

Началом развития цифровой микроэлектроники в России следует считать начало 80-х годов XX века, когда совместными усилиями отечественной автомобильной и электронной промышленности было реализовано создание **цифровых** систем зажигания для автомобилей ВАЗ (семейство 2109), ГАЗ с двигателями ЗМЗ 406, а также автомобилей ЗАЗ -1102 и автомобилей ЗИЛ. Несмотря на различие технических требований к автомобилям, удалось создать единую базовую конструкцию электронного блока управления системой зажигания – **контроллера**. Аппаратная реализация контроллера основывалась на использовании отечественной микросхемы **процессора** КР1823ВГ1 и микросхемы **перепрограммируемой памяти (ППЗУ)** 27128 с ультрафиолетовым стиранием. Использовались также отдельные микросхемы АЦП различной цифровой логики и операционные усилители. С целью снижения габаритов контроллера микросхемы объединялись в **гибридные микросборки**. Была подготовлена технологическая база и организация производства контроллеров на специализированном болгаро-советском предприятии в г. Пловдиве (Болгария). Аналогичное предприятие существовало и в г. Новополоцке (Беларусь). Производство контроллеров в Болгарии серии МС 4001-4004 достигло уровня объемов в несколько десятков тысяч штук в год. Основным потребителем был Волжский автомобильный завод, который использовал контроллер для системы зажигания автомобилей ВАЗ 21092.

Контроллер системы анализировал информацию, получаемую от датчиков положения коленчатого вала двигателя, датчика температуры, датчика разрежения во впускном коллекторе, датчика положения дроссельной заслонки карбюратора (винт-упор положения холостого хода). На основе этой информации, а также информации, хранящейся в ПЗУ, контроллер вычислял угол опережения зажигания и осуществлял оптимальную коммутацию тока в катушках зажигания и управление электромагнитным клапаном экономайзера принудительного холостого хода (ЭПХХ) карбюратора.

Однако система зажигания на основе контроллеров серии МС 400Х уже на момент начала производства отставала по техническому уровню от аналогичных зарубежных конструкций по следующим причинам:

- большие габариты и высокая трудоемкость контроллера по сравнению с аналогичными показателями зарубежных конструкций;
- невысокая точность воспроизведения требуемых характеристик опережения зажигания из-за ограниченности ресурсов процессора и микросхем памяти;
- ограниченные перспективы расширения функциональных возможностей контроллера из-за отсутствия отечественной элементной базы.

Реализация зарубежных конструкций контроллеров подобного типа производилась в 90-е годы XX века уже на базе использования микропроцессорной техники.

1.1.6. Интенсификация исследований и разработок в области систем управления рабочим процессом автомобильного двигателя

К концу 80-х годов XX века требования к интенсификации рабочего процесса автомобильного двигателя значительно возросли. Это было обусловлено следующими причинами:

- необходимостью снижения расхода топлива из-за возрастающих цен на нефтепродукты;
- необходимостью резкого снижения количества вредных выбросов автомобилей в связи с ужесточившимися требованиями международных экологических стандартов.

Основными мероприятиями, направленными на решение поставленных задач, были следующие:

- совершенствование рабочего процесса ДВС за счет оптимизации рабочего цикла на **всех эксплуатационных режимах**;
- введение в критерии оптимизации рабочего процесса двигателя наряду с удельным расходом топлива g_e показателей вредных выбросов на каждом эксплуатационном режиме и по каждой составляющей этих выбросов (СО, СН, NO_x и др.);
- введение в конструкцию двигателя устройств, реализующих очистку (нейтрализацию) отработанных газов (ОГ).

Совершенствование рабочего процесса двигателя за счет оптимизации рабочего цикла проводилось в рамках реализации систем электронного впрыска топлива (ЭВТ).

Существуют два основных направления развития ЭВТ:

- впрыск топлива во впускной трубопровод двигателя;
- непосредственный впрыск топлива в камеру сгорания рабочего цилиндра.

Двигатели с **впрыском топлива во впускной трубопровод (ВТВТ)**, как и предшествующие им карбюраторные двигатели, относятся к двигателям с *внешним смесеобразованием*. Рабочая смесь в таких двигателях подготавливается к моменту открытия впускного клапана вне рабочего цилиндра двигателя. Как правило, это происходит во впускном трубопроводе. Однако благодаря лучшей дозировке топлива по сравнению с карбюраторными двигателями ВТВТ в последние годы практически их вытеснили. Системы управления ВТВТ постоянно совершенствуются, и благодаря этим системам достигнуты значительные успехи в повышении эффективности рабочего цикла двигателей.

Базовым исполнительным устройством ВТВТ является **электромагнитная форсунка (ЭМФ)**, представленная на рис. 1.1.

ЭМФ предназначена для циклического дозирования топлива, поступающего во впускной трубопровод двигателя при образовании рабочей смеси перед каждым рабочим циклом. Величина дозы топлива, доставляемого форсункой, определяется следующими факторами:

- площадью проходного сечения форсунки при ее открытом состоянии;
- разностью давлений $\Delta P = P_m - P_{ц}$; где P_m - давление в топливной магистрали, создаваемое топливным насосом; $P_{ц}$ - давление в цилиндре или во впускном трубопроводе в момент впрыска;

- длительностью открытого состояния форсунки, определяемого длительностью токового импульса, проходящего через обмотку ЭМФ и генерируемого контроллером системы управления двигателем.

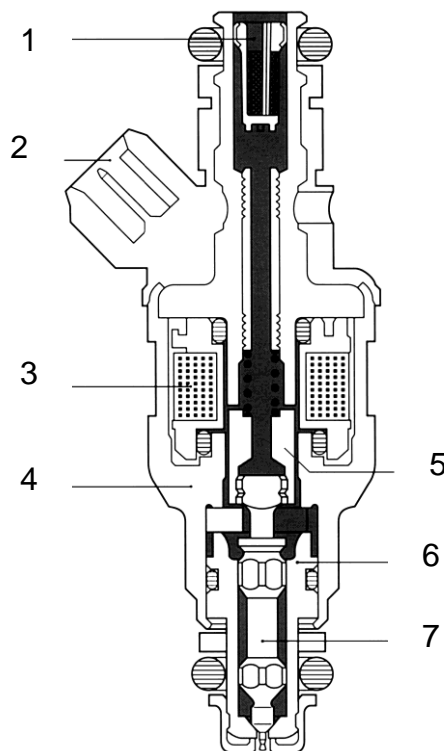


Рис. 1.1. Электромагнитная форсунка (ЭМФ): 1 - фильтр топлива; 2 - соединительный разъем; 3 - катушка электромагнита; 4 - корпус; 5 - сердечник; 6 - направляющая; 7 - запорная игла

Наряду с величиной дозы топлива, определяемой рассмотренными факторами, другим важным параметром, от которого зависит возможность оптимизации расхода топлива и состава ОГ, является **момент впрыска**.

На первом этапе внедрения ВТВТ с целью экономии аппаратных средств впрыск топлива осуществлялся только от одной форсунки, устанавливаемой вместо карбюратора. Момент впрыска был постоянным и кратным углу поворота коленчатого вала двигателя.

Несмотря на повышение точности дозирования топлива, добиться существенного повышения эффективности работы двигателя по сравнению с карбюраторным вариантом не удалось из-за по-прежнему образующейся на стенках впускного трубопровода пленки и неодинаковой удаленности цилиндров от форсунки.

Далее использовалась рампа форсунок, объединенных топливной магистралью, каждая из которых устанавливалась перед впуск-

ным клапаном каждого цилиндра. Впрыск производился одновременно во всех форсунках. Поэтому время, располагаемое для испарения топлива в различных цилиндрах, неодинаковое. Для того чтобы добиться более однородного образования рабочей смеси, количество топлива, необходимое для сгорания, делилось надвое, и каждая из этих частей впрыскивалась при каждом обороте коленчатого вала. Но и при таком способе впрыска в некоторых цилиндрах топливо накапливалось не перед впускным клапаном, а впрыскивалось через открытое впускное окно. Это также не обеспечивало однородности смесиобразования по всем цилиндрам.

При **групповом впрыскивании** топлива форсунки объединены в две группы. За один оборот коленчатого вала полное количество топлива, требуемое для цилиндров их группы, впрыскивают форсунки одной группы, а за следующий оборот – форсунки другой группы цилиндров.

Такая работа форсунок позволяет обеспечить момент впрыскивания топлива в функции рабочего режима и избежать нежелательного впрыскивания топлива в открытые впускные окна. Однако и здесь время, отводимое для испарения топлива в различных цилиндрах, разное, что не позволяет обеспечить требуемую однородность смеси по всем цилиндрам.

Кардинально решается проблема при **последовательном впрыскивании** топлива в каждый отдельный цилиндр, снабженный индивидуальной форсункой. Форсунки приводятся в действие последовательно одна за другой в соответствии с порядком работы цилиндров. Продолжительность и момент впрыска в каждом цилиндре относительно ВМТ - одинаковые. Топливо накапливается в каждом цилиндре перед открытием впускного клапана. Начало впрыскивания свободно программируется и может корректироваться в зависимости от режима работы двигателя. Развитием последовательного впрыска является усложнение алгоритма управления *моментом и длительностью* впрыска, позволяющее реализовать эти параметры индивидуально для каждого цилиндра.

Предпринимались многочисленные попытки оптимизировать рабочий процесс двигателя за счет регулирования состава смеси на различных режимах работы двигателя. Возможности такой оптимизации представлены на рис. 1.2.

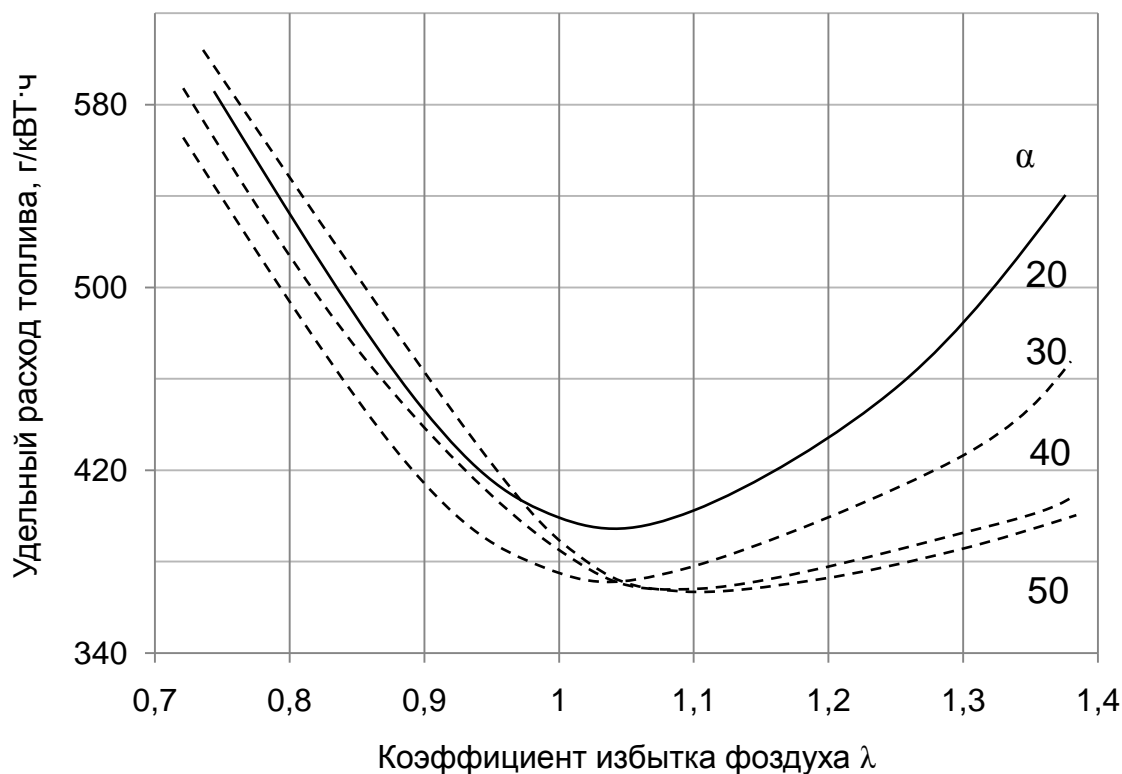


Рис. 1.2. Влияние коэффициента избытка воздуха λ и угла опережения зажигания α_z на удельный расход топлива при гомогенном распределении топливной смеси

Как видно из рис. 1.2, существуют значения угла опережения зажигания α_z и соответственно состава смеси λ , соответствующие минимальному расходу топлива на каждом скоростном и нагрузочном режимах двигателя. К сожалению, эти оптимальные по расходу топлива значения λ и α_z не являются оптимальными с точки зрения минимизации количества выбросов вредных веществ в ОГ.

Критерии оптимизации по расходу топлива не соответствуют критериям оптимизации по выбросам вредных веществ в ОГ автомобиля. Поэтому в настоящее время двигатели с ВТВТ в большинстве своих режимов эксплуатируются при стехиометрическом составе смеси $\lambda=1$. При таком составе смеси трехкомпонентный *каталитический нейтрализатор*, работающий в составе системы управления двигателем, обеспечивает химическую нейтрализацию токсических веществ, образующихся при сгорании в условиях длительной и надежной работы двигателя. Работа при стехиометрическом составе смеси снижает требования к энергетическим параметрам искрового разряда, создаваемого системой зажигания. Это в свою очередь позволяет уменьшить размеры источника искры (катушки зажигания).

Следующим шагом в развитии ЭВТ является создание двигателей с **непосредственным впрыском топлива** (НВТ). В этом случае рабочая смесь образуется непосредственно в камере сгорания поршневого двигателя (внутреннее смесеобразование). Сама идея внутреннего смесеобразования возникла и была практически реализована уже в первой половине XX века. Однако только с появлением технологий конца XX века и начала XXI оказалось возможным создание НВТ для массового применения на автомобилях.

При НВТ через открытый впускной клапан при такте впуска в цилиндр поступает только воздух. Топливо впрыскивается специальными форсунками непосредственно в камеру сгорания цилиндров. В момент впрыска необходимо давление, превышающее давление в камере сгорания перед моментом выпрыска. Оно создается **топливным насосом высокого давления (ТНВД)**. Насос создает давление в герметичной магистрали, образованной так называемой топливной рейкой (Common Rail). В топливной рейке расположены ЭМФ высокого давления, работа которых управляется контроллером системы управления двигателем. Рейка содержит также датчик высокого давления и клапан регулировки давления. Клапан регулировки расположен между топливной рейкой и зоной низкого давления ТНВД. Необходимое давление в системе поддерживается за счет дросселирования подачи топлива ТНВД. Управляющий сигнал поступает на обмотку клапана. Модулирование по длительности управляющего импульса изменяет поперечное сечение выходного отверстия клапана и тем самым эффективность ограничения давления. Избыток подаваемого топлива возвращается в контур низкого давления.

При отсутствии управляющего сигнала клапан находится в закрытом положении. Если давление в системе превысит критическую величину, опасную для элементов системы, то клапан срабатывает как механический ограничитель давления.

Электромагнитная форсунка высокого давления (ЭМФВД) для системы НВТ

Конструкция и принцип работы ЭМФ высокого и низкого давления отличаются незначительно. Однако выходные характеристики этих устройств отличаются существенным образом. При работе с ЭМФВД топливо должно поступать в камеру сгорания быстрее, точнее и с лучшим формированием топливного факела.

Основными отличиями работы ЭМФ при НВТ являются:

- более высокое давление впрыскиваемого топлива (5...12 МПа вместо 0,3...0,5 МПа), так как момент впрыска может осуществляться при давлении в камере сгорания, близком к давлению сжатия;
- меньшее время, отводимое для подачи топлива в камеру сгорания (0,4...0,5 мс вместо 20 мс).

Последнее объясняется тем, что при НВТ процесс впрыскивания происходит только за пол-оборота коленчатого вала, а при ВТВТ – за два оборота.

С учетом изложенного элементы ЭМФВД должны быть рассчитаны на работу в упомянутом диапазоне давлений, а перемещаемые электромагнитом элементы и пружины обладать меньшей инерционностью.

Для обеспечения надежности впрыска ЭМФ её электропитание осуществляется повышенным напряжением (50...90 В) от буферного конденсатора, входящего в состав силового модуля контроллера, обеспечивающего специальную токовую характеристику включения форсунки (рис. 1.3).

Как следует из рис. 1.3, процесс впрыска топлива носит двухстадийный характер. Для быстрого преодоления сопротивления возвратной пружины требуется первоначально мощный токовый импульс. Дальнейшее поддержание ЭМФ в открытом состоянии больших значений тока не требует. Количество впрыскиваемого топлива прямо пропорционально длительности управляющего импульса низкого уровня.

Организация процесса сгорания в системе с НВТ

НВТ предоставляет конструкторам автомобильного двигателя более широкие возможности организации и регулирования процесса сгорания топлива при изменении скоростного и нагрузочного режимов автомобильного двигателя. К этим возможностям относятся:

- обеспечение послойного распределения рабочей смеси в камере сгорания двигателя;
- обеспечение гомогенного (равномерного) распределения смеси по объему цилиндра двигателя при управлении ее составом;
- управление в широких пределах моментом впрыска и его длительностью, в том числе и организация последовательного двойного впрыскивания топлива;

- организация вихревого сгорания топлива.

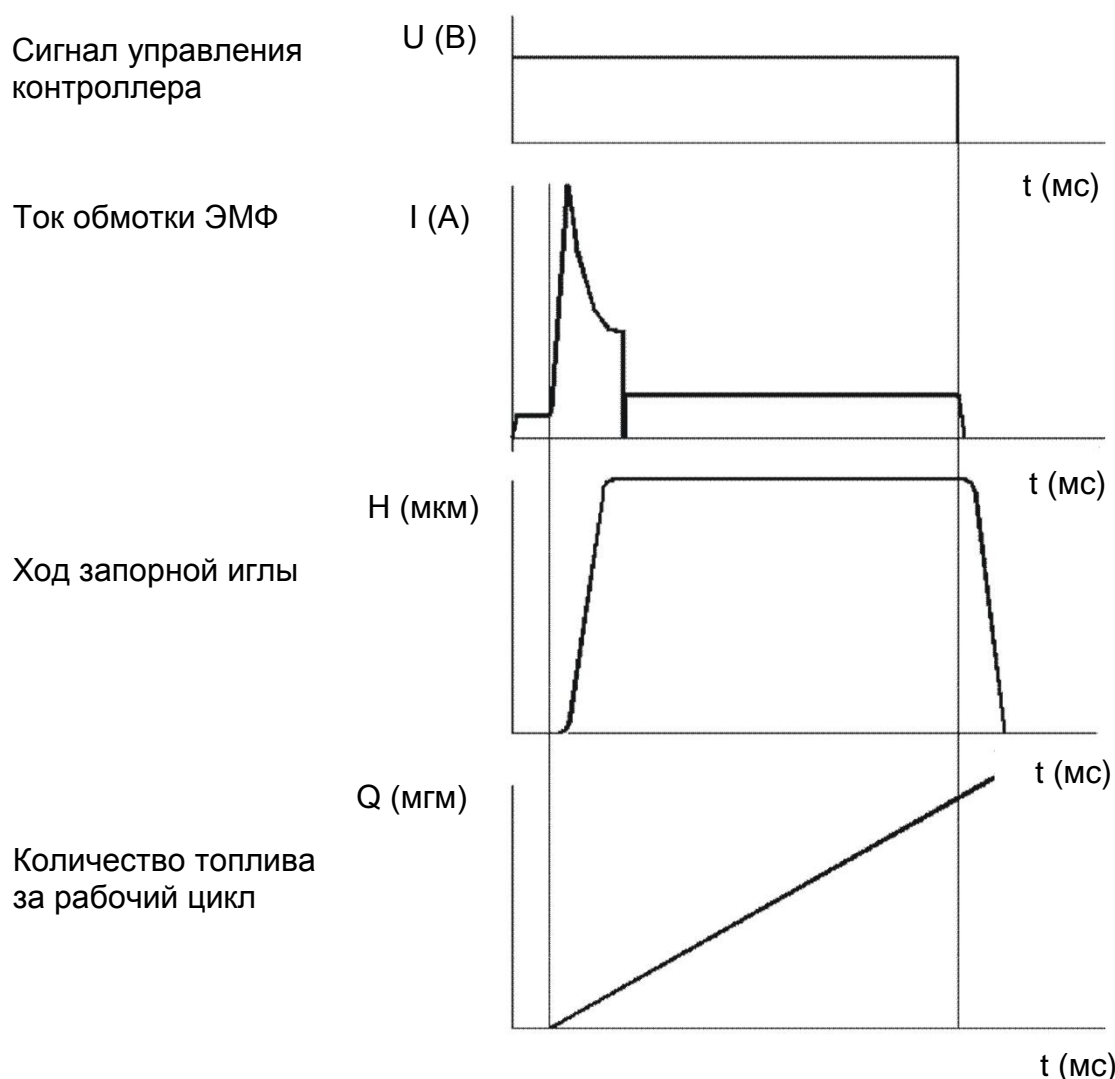


Рис. 1.3. Характеристики сигналов управления ЭМФ высокого давления

Эти и другие возможности реализуются как программными средствами управления, так и конструкцией поршня и расположением свечи и ЭМФ в головке цилиндров двигателя. Они позволяют достичь максимальной *адаптации* системы топливоподачи к каждому режиму работы двигателя. Программное обеспечение позволяет осуществлять переход от одного режима организации рабочего процесса двигателя к другому, без каких-либо резких изменений значений крутящего момента.

В отличие от систем с ВТВТ требования к воспламеняющей способности искрового разряда при НВТ значительно расширяются. Имеются данные, что максимальные значения энергии искрового разряда, необходимые для надежного воспламенения рабочей смеси, в некоторых режимах вдвое превышают значения энергии, использо-

вавшиеся ранее до появления НПТ (100 мДж - вместо 50 мДж). Использование высоких значений энергии искрового разряда может сильно повлиять на ресурс зажигательных свечей, если не предусмотреть выделения таких значений энергии только для узкой области режимов. Отсюда вытекает требование к необходимости строгого нормирования энергии разряда в широком диапазоне используемых режимов топливоподачи. Таким образом, при проектировании *систем зажигания для НВТ* необходимо решить две технические задачи:

- возможности получения энергии искрового разряда до 100 мДж при сохранении приемлемых габаритов устройств;
- разработки алгоритмов, аппаратной и программной реализации устройств, обеспечивающих оптимальное выделение энергии в искровом разряде на различных этапах организации сгорания топлива.

Как следует из вышеизложенного, для управления рабочим процессом двигателя и, в частности системой зажигания, необходима информация, содержащая сведения не только о таких традиционных параметрах двигателя, как скорость, нагрузка и положение коленчатого вала двигателя, но и температура, состав ОГ, наличие или отсутствие критических (запрещенных) режимов двигателя, состояния окружающей среды и др. Важнейшим условием содержания этой информации является ее **достоверность** и возможность **обработки и обновления в реальном режиме времени**.

Существовавшие к концу 80-х годов XX века системы и устройства таких условий функционирования не имели.

1.2. Структура микропроцессорных систем управления ДВС

1.2.1. Микропроцессорные системы зажигания (МПСЗ)

МПСЗ являются следующим шагом на пути совершенствования систем зажигания после повсеместного распространения электронных бесконтактных систем зажигания (БСЗ). Как следует из названия, основой МПСЗ является микропроцессорное устройство, главным элементом которого является **микропроцессор** - миниатюрная вычислительная машина (микроЭВМ). Однокристалльный микропроцессор, снабженный дополнительным обрамлением, связанным со спецификой его применения в тех или иных устройствах, называют также **микрореконструктором**. Благодаря микроконтроллеру система зажигания

приобретает новые свойства, ранее практически недостижимые в рамках электромеханических устройств БСЗ.

Основными из этих свойств являются:

- возможность регулирования угла опережения зажигания или других параметров системы в зависимости от комплекса параметров двигателя с необходимой точностью (стабильность этих параметров обеспечивается в течение всего срока службы двигателя);
- увеличение количества параметров регулирования (к параметрам - частота вращения двигателя и его нагрузка - могут быть добавлены динамика движения автомобиля, температура охлаждающей жидкости, атмосферное давление, состав ОГ и др.);
- минимизация электрической энергии потребляемой системой зажигания в широком диапазоне напряжений бортовой сети автомобиля, что позволяет при получении заданных высоких значений энергии и длительности искрового разряда не увеличивать габаритные размеры катушки зажигания и блока управления системой;
- стабилизация выходных характеристик системы зажигания в широком диапазоне напряжения питания бортовой сети автомобиля или энергетической установки с учетом импульсных помех различного рода;
- возможность статического (т.е. без механических вращающихся частей) распределения искр по свечам двигателя в соответствии с требуемым порядком работы цилиндров;
- возможность модификации характеристик опережения зажигания при изменении параметров двигателя без каких-либо переделок конструкции контроллера системы зажигания;
- возможность управления клапаном экономайзера принудительного холостого хода (ЭПХХ) или другими устройствами с электромагнитным клапаном;
- возможность управления исполнительными устройствами на основе реле, электромагнитов или шаговых двигателей;
- возможность совмещения функций управления зажиганием и аппаратами топливоподачи в едином контроллере с общей системой датчиков; создание системы автоматизированного управления двигателем (САУД);

- возможность интеграции и синхронизации функций САУД с функциями контроллеров управления движением автомобиля, управления коробкой передач, управления климатом и др.;
- возможность реализации системы диагностики САУД в рамках единой системы диагностики автомобиля.

Наличие **микроконтроллера** является необходимым, но недостаточным условием при создании микропроцессорной системы. Другим важным условием является использование новых способов получения достоверной информации о параметрах двигателя (положении коленчатого вала, частоте вращения, нагрузке, температуре двигателя и др.). Получение этой информации потребовало создания новых типов датчиков этих параметров (датчиков углового положения коленчатого вала двигателя, датчиков разрежения, датчиков абсолютного давления, датчиков температуры). Возможности статического распределения искр по цилиндрам двигателя могли быть реализованы первоначально при создании двухвыводных катушек зажигания. Но их применение оказалось возможным не для всех типов двигателей. Например, для газовых двигателей было установлено, что при наличии наддува применение двухвыводных катушек зажигания при низковольтном распределении искр оказывается невозможным из-за паразитных вспышек газового топлива в цилиндрах с вынужденной холодной искрой. Поэтому в последнее время все большее распространение получает установка индивидуальных катушек зажигания на каждый цилиндр двигателя как наиболее универсальное решение. При этом обязательным является наличие датчика положения первого цилиндра или датчика положения распределительного вала двигателя.

Еще одним важным условием создания МПСЗ явилось создание элементной базы, обеспечивающей абсолютную надежность электронного блока (контроллера) в условиях предельных импульсных перенапряжений в бортовой сети автомобиля. К основным элементам контроллера относятся силовые ключи, осуществляющие коммутацию тока в катушках зажигания. Используются современные силовые ключи фирм SGS-Thomson, Siemens, Motorola. Питание микроконтроллера и большинства других элементов системы осуществляется от стабилизированного, защищенного от импульсных перенапряжений источника питания производства фирмы SGS-Thomson или Motorola.

Существует еще ряд компонентов, необходимых для функционирования **микроконтроллеров** в составе блока управления микропроцессорной системой – **контроллера**. О них будет рассказано ниже.

Современные **микроконтроллеры** представляют собой микросхемы высокой степени интеграции, содержащие на одном кристалле все элементы, необходимые для создания блоков управления - **контроллеров**, решающих определенный класс задач управления. Например, **контроллеры** управления рабочим процессом автомобильного двигателя. В силу определенной избыточности, закладываемой в параметры функциональных компонентов **микроконтроллеров**, эти устройства приобретают универсальный характер, и один и тот же **микроконтроллер** может использоваться при создании **контроллеров системы управления зажиганием** или **контроллера системы управления процессом стирки** в автоматической стиральной машине.

Структурная схема управления на основе микроконтроллера представлена на рис. 1.4. Она является универсальной для применения в самых различных областях техники, где имеются проблемы управления рабочими процессами машин.

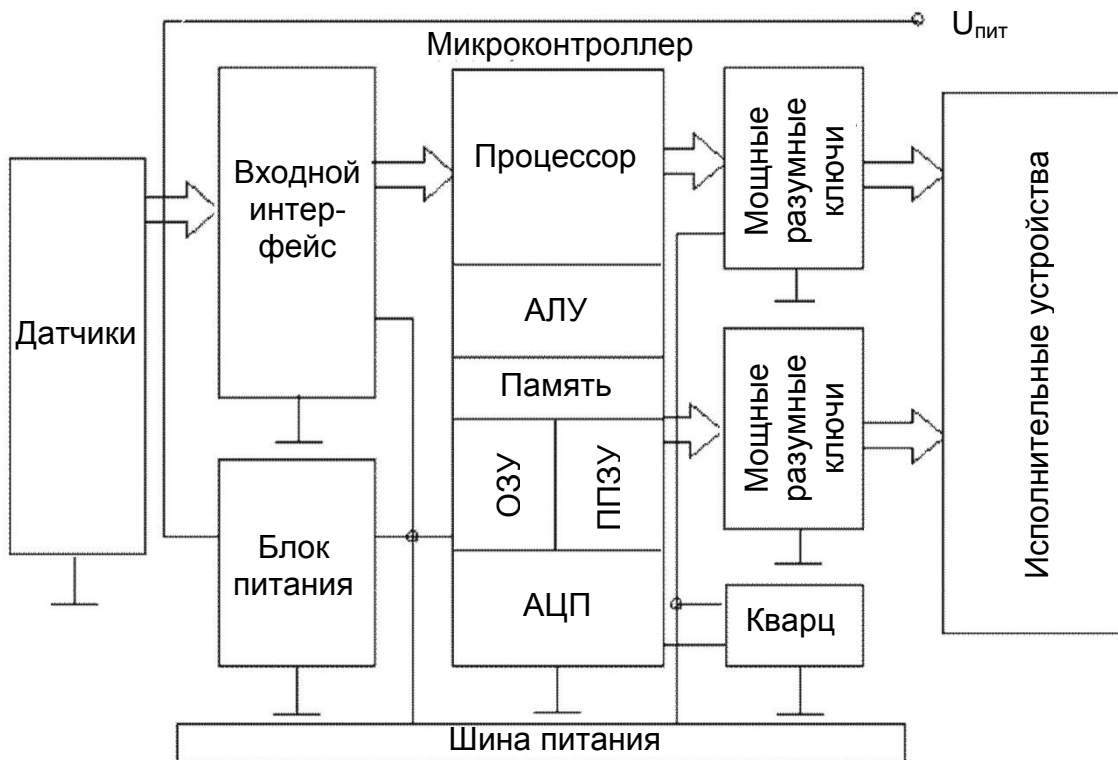


Рис. 1.4. Структурная схема микропроцессорной системы управления

Как видно из рис. 1.4, **микроконтроллер (МК)** содержит следующую минимум необходимых элементов:

- процессор;
- АЛУ-арифметико-логическое устройство;
- оперативные запоминающие устройства (ОЗУ);
- долговременные перепрограммируемые устройства памяти (ППЗУ);
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- другие устройства в зависимости от типа МК.

Кроме МК электронный блок управления системой должен содержать:

- стабилизированный источник питания;
- кварцевый стабилизатор опорной частоты микроконтроллера;
- входной интерфейс, преобразующий аналоговые сигналы датчиков различной физической природы к канонической форме, пригодной для подачи сигналов датчиков непосредственно к входным портам **микроконтроллера**;
- силовые ключи различного функционального назначения для управления исполнительными устройствами.

В настоящее время номенклатура и вычислительная мощность микроконтроллеров чрезвычайно велики, постоянно расширяются и могут обеспечить потребности практически любого потребителя. Сведения о некоторых типах микроконтроллеров, предлагаемых рынком, и их характеристиках можно найти в [6, 8, 9].

1.2.2. Структура микропроцессорного блока управления (контроллера) на базе микроконтроллера PIC16C7xx.

Основные функции

На рис. 1.5 представлена блок-схема контроллера КМПСЗ-1, разработанная предприятием «Молния» г. Уфы в сотрудничестве с ФГУП НИИАЭ и кафедрой «Электротехника и электрооборудование» МАДИ. Блок-схема представляет собой упрощенный вариант принципиальной схемы контроллера, в которой некоторые сложные узлы представлены в виде отдельных функциональных блоков.

Контроллер разрабатывался по техническому заданию АЗЛК и предназначался для микропроцессорной системы зажигания (МПСЗ) автомобиля модели «Москвич-2141» с двигателем УЗАМ-331.

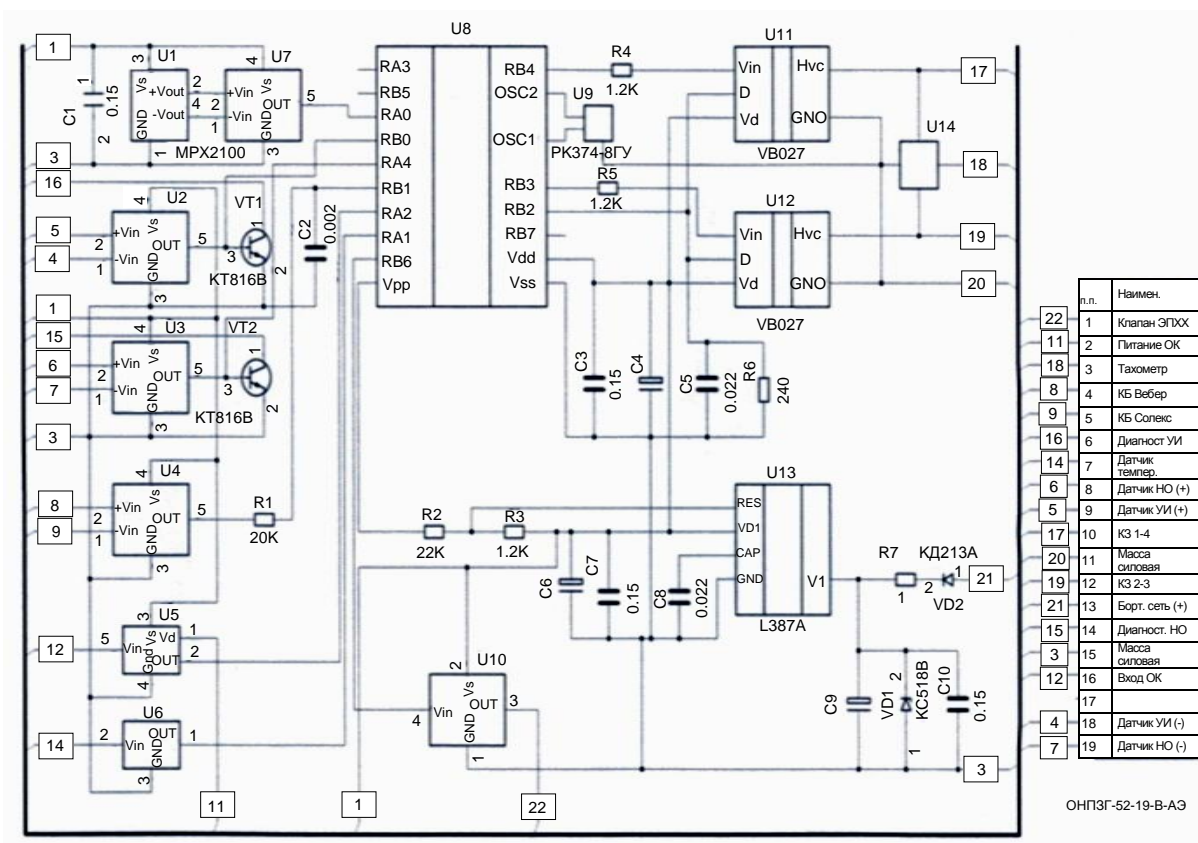


Рис. 1.5. Блок-схема контроллера КМПС3-1

Основой схемы является микроконтроллер PIC16C71 американской фирмы Microchip. Микросхема выполнена в 18-выводном пластмассовом корпусе. В исполнении корпуса DIP микросхема может быть установлена на специальную переходную панель, впаиваемую в печатную плату контроллера. Микроконтроллер легко извлечь из печатной платы для последующего перепрограммирования. Память контроллера, содержащая характеристики опережения зажигания для различных значений частоты вращения двигателя, нагрузок и температурных режимов, может в различных исполнениях контроллеров PIC:

- программироваться пользователем однократно;
- программироваться после предварительного ультрафиолетового стирания многократно;
- многократно электрически перепрограммироваться (так называемая flash-память).

Ниже приводится описание основных функциональных блоков контроллера зажигания.

U1 – датчик разрежения MPX2100 американской фирмы Motorola. Он имеет дифференциальный выход сигнала в диапазоне от 10

до 200 мВ. Для обеспечения помехоустойчивого линейного выхода в диапазоне до 5 В в схеме контроллера применен усилитель U18 на основе операционных усилителей микросхемы LM2902 фирмы Motorola. Выход усилителя соединен с портом RA0 микроконтроллера (вход АЦП).

U2, U3 - формирователи сигналов датчиков ДНО и ДУИ обеспечивают на входе микроконтроллера сигналы уровня цифровой логики при поступлении на дифференциальные входы усилителей сигналов от магнитоэлектрических датчиков ДНО и ДУИ синусоидальной формы и переменного уровня (зависящего от частоты вращения двигателя.) Кроме того, U2, U3 обеспечивают защиту микроконтроллера от импульсных помех, поступающих по соединительным кабелям датчиков.

Выходы усилителей соединены соответственно с портами RB0 и RA4 микроконтроллера. К этим же выходам подсоединены базы транзисторов VT1 и VT2. Открытый коллектор этих транзисторов подсоединен к выводам 6 и 14 соединительной колодки контроллера. Это позволяет осуществлять диагностирование работы датчиков и тракта усиления при наличии внешней нагрузки транзисторов и индикаторов сигнала (например, с помощью осциллографа).

Устройство U4 представляет собой формирователь сигнала, получаемого от датчиков положения дроссельной заслонки карбюраторов различного типа, используемых на отечественных автомобилях (карбюраторы типа «Вебер» или карбюраторы типа «Солекс»). При этом формируется требуемая амплитуда сигнала и устраняется возможность искажения сигнала, связанная с «дребезгом» контактной пары и другими нарушениями незащищенного электрического соединения. Устройство реализовано на операционном усилителе микросхемы LM2902. Выход U4 (вход RB1 микроконтроллера) защищен от импульсных помех фильтром R1C2.

Устройства U5 и U6 содержат настроечные резисторы, определяющие диапазон изменения сигнала, поступающего от октанкорректора U5 и датчика температуры U6 на входы соответственно RA2 и RA1 АЦП микроконтроллера U8. Кроме того, устройства U5 и U6 содержат стабилитроны и конденсаторы, защищающие входы контроллера от импульсных помех. Устройство U6 обеспечивает также стабилизированное питание внешнего делителя напряжения, входя-

щего в состав октан-корректора. Средняя точка делителя напряжения соединяется с клеммой 16 соединительной колодки U16 контроллера (вход ОК).

Стабилизация тактовой частоты микроконтроллера осуществляется подключением кварцевого генератора U9 (PK374-8ГУ) к выводам OSC2, OSC1 микроконтроллера. Устройство U9 содержит также конденсаторы, подключаемые к выводам микроконтроллера для защиты от импульсных помех.

Управление **силовыми ключами D11, D12** контроллера осуществляется через порты RB4 и RB3 микроконтроллера. В качестве ключей используется микросхема **VB027 фирмы SGS-Thomson**. Микросхема VB027 представляет собой транзисторный ключ, в коллектор которого (вывод Hvc) включается катушка зажигания. Длительность открытого состояния ключа определяется длительностью выходного сигнала микроконтроллера (порты RB4 и RB3). Благодаря наличию измерительного резистора, включенного в цепь эмиттера силового ключа, и специальных функциональных элементов, микросхема VB027 реализует также следующие функции:

- ограничение максимального значения тока коллектора ключа на уровне 8,5 А;
- появление единичного сигнала обратной связи на диагностическом выводе D при превышении значений тока коллектора $I_c > 4,5$ А;
- снятие единичного уровня диагностического сигнала при превышении значения тока $I_c > 5,8$ А.

Подробное описание параметров, принципов действия микросхемы VB027 можно найти в информационных материалах фирмы SGS-Thomson MICROELECTRONICS в Интернете. В прил. 1 приведен титульный лист информационного материала фирмы, посвященного микросхеме VB027.

Важнейшим элементом контроллера МПСЗ является **стабилизированный источник питания U13**, роль которого исполняет микросхема L387A.

Это устройство обеспечивает выходное напряжение на уровне 5 ($\pm 4\%$) В при изменении входного напряжения от 6 до 35 В и предназначено для питания всех микроэлектронных устройств контроллера, рассмотренных выше. В прил. 2 представлен титульный лист техниче-

ского описания микросхемы L387A с фотографией корпуса, основными параметрами и схемой включения. Схема содержит специальный выход (reset), предназначенный для сброса начальных параметров микроконтроллера в исходное положение при включении питания или при аварийных сбоях микроконтроллера под воздействием помех.

Питание самой схемы стабилизатора напряжения L387A осуществляется непосредственно от аккумуляторной батареи (бортовой сети автомобиля) через вывод 13 соединительной колодки U19 контроллера. В цепь питания включен силовой диод VD2 (КД 213А) и резистор R7 величиной 1 Ом и мощностью рассеяния до 5 Вт. Диод VD2 служит для защиты схемы контроллера при случайном (аварийном) изменении полярности бортовой сети. Резистор R7 является расчетной нагрузкой для обеспечения допустимого режима ограничителя напряжения VD1, предназначенного для защиты цепи питания контроллера от возможных перенапряжений в бортовой сети автомобиля, регламентированных стандартами электромагнитной совместимости. Конденсаторы C9 и C10 также служат для защиты цепи питания контроллера от высокочастотных импульсных перенапряжений.

Устройство U14 представляет собой диодно-резистивную сборку, позволяющую на выводе 3 колодки U16 получать последовательность импульсов напряжения с коллекторных выводов ключей U11 и U12, поочередно подключаемых к двухвыводным катушкам зажигания. Эта последовательность аналогична последовательности импульсов на клемме «К» катушки зажигания, применяемой при высоковольтном распределении искр в БСЗ с датчиком Холла. Это позволяет при переходе от БСЗ с датчиком Холла на микропроцессорную систему использовать существующий электронный тахометр без изменений.

Устройство U10 представляет собой усилитель - формирователь сигнала, формируемого на выходе порта RB6 микроконтроллера. Выходной транзистор усилителя позволяет управлять индуктивной нагрузкой по типу электромагнитного клапана экономайзера принудительного холостого хода.

Схема соединений элементов МПСЗ автомобиля «Москвич 2141» с контроллером КМПСЗ – 1 представлена на рис. 1.6.

Схемы на рис. 1.5 и 1.6 послужили основой для создания контроллера для микропроцессорных систем зажигания (МПСЗ) многоцилиндровых газовых двигателей (ГД), которые получают распростра-

нение в нашей стране и за рубежом в последние годы. Речь идет о газовых двигателях, которые создаются из дизельных прототипов методом **конвертации**. Процесс **конвертации** предусматривает оснащение ГД редуктором, смесителем для образования рабочей газовой смеси, системой зажигания и зажигательными свечами. Питание ГД осуществляется сжатым (компримированным) природным газом (метаном), либо газом, получаемым при добыче и переработке нефти (пропан-бутаном и производными). Подробнее о **конвертации** дизелей для работы на газовом топливе.

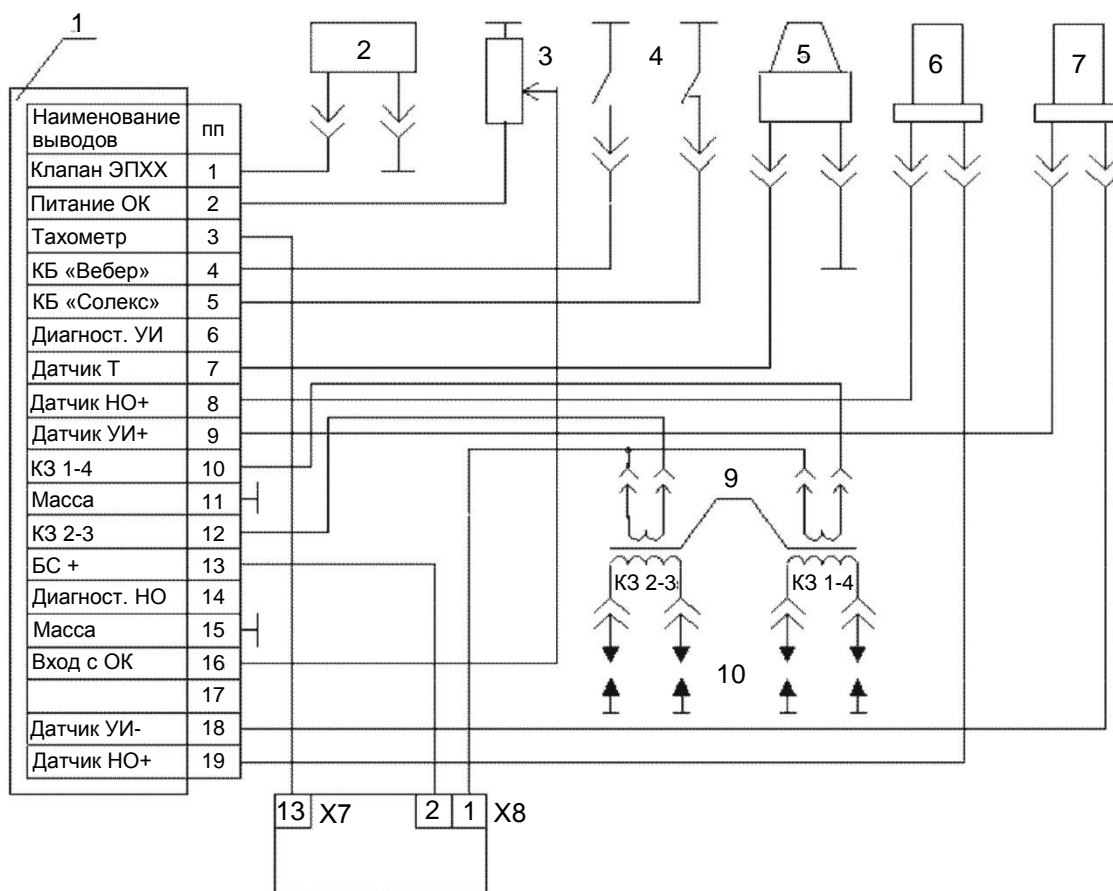


Рис. 1.6. Схема соединений контроллера КМПС3-1 в системе зажигания автомобиля «Москвич 2141»: 1 - контроллер; 2 - клапан ЭПХХ; 3 - потенциометр ОК; 4 - КВ карбюраторов типа «Вебер» или «Солекс»; 5 - датчик температуры; 6 - датчик НО; 7 - датчик УИ; 8 - монтажный блок предохранителей и реле автомобиля; 9 - двухвыводные катушки зажигания; 10 - свечи

Как правило, ГД - это моторы мощностью от 150 до 500 л.с. Размеры этих двигателей настолько велики, что применение на них высоковольтного распределения искр по цилиндрам связано с большими потерями энергии в высоковольтных проводах. Поэтому на таких двигателях используется низковольтное распределение искр с примене-

нием индивидуальных катушек зажигания на каждую свечу или двухвыводных катушек зажигания, обслуживающих по паре цилиндров двигателя. Кафедрой «Электротехника и электрооборудование» МАДИ совместно с ФГУП НИИАЭ и предприятием ООО «АСТРО» г. Пензы были разработаны схема и конструкция универсального контроллера КЗГД-1, предназначенного для различных модификаций газовых двигателей рядных, V-образных, с количеством цилиндров от 4 до 12.

В табл. 1.1 представлены возможные модификации дизельных двигателей, конвертированных для работы на газовом топливе. Как видно из табл. 1.1, количество возможных вариантов конструктивного исполнения двигателей с точки зрения обеспечения их системой зажигания достаточно велико. Однако объемы выпуска большинства представленных в табл. 1.1 модификаций невелики (не более нескольких десятков штук в год). Созданная конструкция контроллера КЗГД-1 позволяет обеспечить потребности практически всех представленных в табл. 1.1 модификаций двигателей. Причем все изменения требуемых характеристик систем зажигания могут быть реализованы программными методами.

По сравнению со схемой контроллера КМПС3-1 (см. рис. 1.5) схема контроллера КЗГД-1 имеет следующие основные отличия:

- увеличена вычислительная мощность микроконтроллера; вместо микроконтроллера PIC16C711(715) установлен микроконтроллер PIC16C72(PIC16F72); микроконтроллер выполнен в пластмассовом 28-выводном корпусе DIP и содержит однократно электрически программируемую (ПЗУ) память (PIC16C72), либо электрически перепрограммируемую (ППЗУ) память (PIC16F72);
- конструкция предусматривает установку максимального количества силовых ключей (VB027), равного 12. При количестве цилиндров двигателя <12 соответствующее количество ключей может не устанавливаться при изготовлении контроллера;
- вместо 19-выводной соединительной колодки ОНП-3Г-52-19-В-АЭ устанавливается 55-контактная колодка фирмы «AMP» X-963685-1.

Схема соединений контроллера КЗГД-1 в МПС3 газового двигателя на базе дизеля ЯМЗ-850 представлена на рис. 1.7.

Таблица 1.1

Количество цилиндров	4	6	8	10	12
Тактность	4	4	4	2	4
Последовательность искр: равномерная неравномерная	X	X; X X	X; X	X	X X X
Датчики: спецдиск (60-2) ДУИ на маховике ДНО на распредвале ДНО на маховике	X	X; X; X; X X X X	X X X; X	X	X X; X; X X X
Тип катушек : одновыводные двухвыводные	X	X X X X	X; X	X	X X X
Напряжение питания: 12 В 24 В	X		X X; X	X	X X X
Количество зубцов маховика	153	132	115	124	132; 115; 162
Регулирование угла: по скорости по нагрузке		X; X X; X	X X	X	X
Дополнительные функции: ограничение оборотов самодиагностика (просушка свечей)		X; X; X	X; X X; X	X X	X; X; X X; X; X

1.2.3. Контроллер МПСЗ как пример реализации микропроцессорной системы (МС)

Для того чтобы подробнее уяснить работу контроллера МПСЗ, принципы его проектирования и программирования, необходимо рассмотреть его как частный случай микропроцессорной системы (МС).

Выходные параметры МПСЗ следующие:

- уровень (амплитуда) коммутируемого тока в катушках зажигания;
- оптимальная длительность протекания импульса тока;
- момент размыкания тока (момент искрообразования) в зависимости от частоты вращения двигателя, нагрузки и температуры относительно ВМТ первого цилиндра в такте сжатия (опережение зажигания);

- последовательность работы силовых ключей катушек зажигания;
- момент включения и длительность открытия электромагнитного клапана;
- некоторые другие, менее важные параметры (например, аварийное выключение системы при превышении максимально допустимого предела частоты вращения двигателя, режим диагностирования системы, при котором искрообразование с фиксированной частотой следования искр обеспечивается при остановленном двигателе в отсутствии сигналов датчиков ДНО и ДУИ).

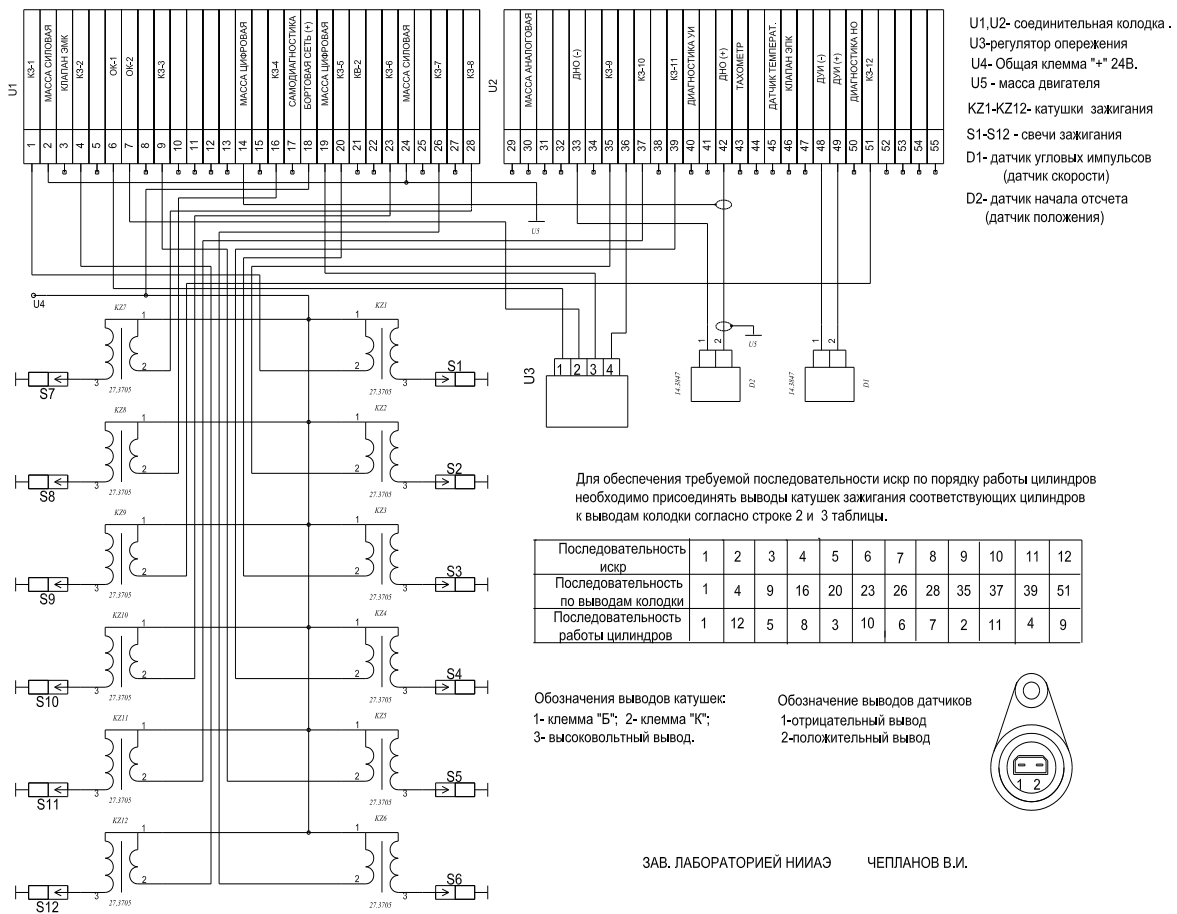


Рис. 1.7. Схема соединений контроллера КЗГД-1 в МПСЗ газового двигателя на базе дизеля ЯМЗ-850

Все эти параметры определяются в период между двумя последовательными искрами. Считается допустимым, если обновление информации, необходимой для изменения упомянутых выше параметров, будет происходить через временной интервал, соответствующий половине одного оборота двигателя либо одному обороту.

За этот интервал или кратный ему контроллер МПСЗ на основании сигналов, поступивших к нему от датчиков, должен:

- определить положение коленчатого вала двигателя, соответствующее началу процесса обработки информации в микроконтроллере;
- определить частоту вращения коленчатого вала двигателя и ее численное выражение (код);
- определить нагрузку двигателя и ее код;
- определить температуру двигателя и ее код;
- обратиться к ПЗУ контроллера и сравнить данные по текущим значениям режимов двигателя со значениями режимов, занесенных в таблицу требуемых характеристик системы;
- при совпадении текущих режимов с данными таблицы считать соответствующие текущим режимам значения углов опережения зажигания из ПЗУ и занести их в оперативную память (ОЗУ) микроконтроллера;
- при несовпадении значений (кодов) текущих режимов с табличными рассчитать значения углов опережения для промежуточных текущих режимов методом линейной интерполяции. Далее - занести их в ОЗУ микроконтроллера;
- провести аналогичные операции с ПЗУ и ОЗУ для значений длительности импульсов тока, момента включения (выключения) клапана ЭПХХ и других параметров, зависящих от частоты вращения двигателя, нагрузки и температуры;
- после поступления синхроимпульса, определяющего зону действия следующего по порядку следования цилиндра двигателя, считать информацию (коды), хранящуюся в ОЗУ. Далее реализовать ее в форме интервала времени относительно синхроимпульса (момента включения импульса тока), момента искрообразования и т.д.

Изложенная выше последовательность этапов преобразования и реализации информации в МПСЗ является алгоритмом действий контроллера и изложена простым инженерным языком. Для того чтобы этот алгоритм (изложенный крайне упрощенно) мог быть воспринят и реализован микроконтроллером (МК), являющимся базой управления контроллером МПСЗ, необходимо воспользоваться **системой команд МК**.

Структура и объем **системы команд МК** определяет быстродействие, гибкость, удобство использования МК. Разработчику кон-

троллера необходимо знать систему команд, **режимы работы МК**, а также правила взаимодействия процессора с внешним миром или, как их еще называют, **протоколы обмена информацией**. Для того чтобы уяснить эти понятия, необходимо рассмотреть общие принципы построения микропроцессорных систем.

1.3. Общие принципы построения микропроцессорных систем (МС)

1.3.1. Шинная структура связей МС

Для достижения максимальной универсальности и упрощения протоколов обмена информацией в микропроцессорных системах (МС) применяется так называемая **шинная структура связей** (ШСС) между отдельными устройствами, входящими в систему. При классической структуре связей (рис. 1.8) все сигналы и коды между устройствами передаются по отдельным линиям связи. Каждое устройство, входящее в систему, передает свои сигналы и коды независимо от других. При этом в системе получается очень много линий связи и разных протоколов обмена информацией.

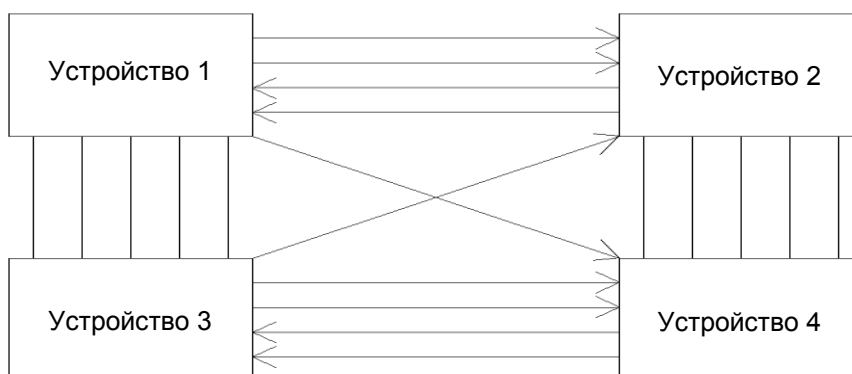


Рис. 1.8. Классическая структура связей

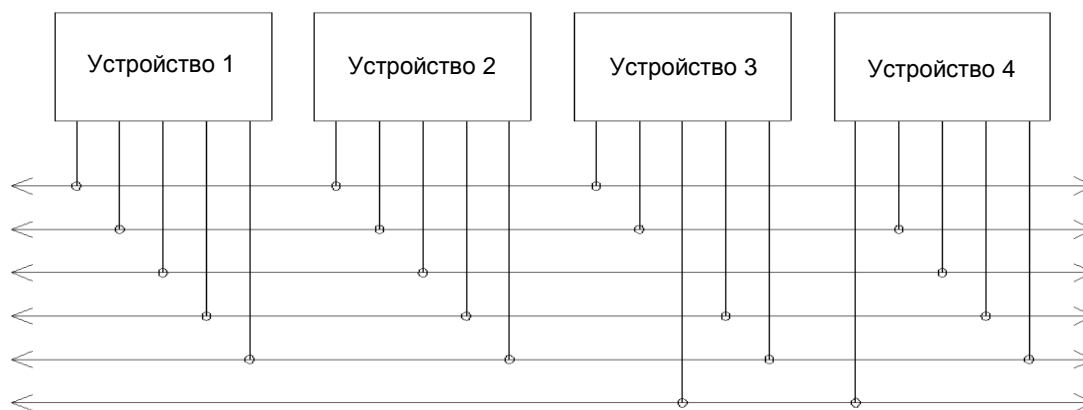


Рис. 1.9. Шинная структура связей

При шинной структуре связей (рис. 1.9) все сигналы передаются по одним и тем же линиям связи, но в разное время (это называется **мультиплексированной** передачей). Причем передача по всем линиям связи может осуществляться в обоих направлениях (двухнаправленная передача). В результате количество линий связи существенно сокращается, а правила обмена упрощаются. Группа линий связи, по которым передаются сигналы или коды, называется шиной (англ. bus).

Типичная структура микропроцессорной системы приведена на рис. 1.10.

Система включает в себя три основных типа устройств:

- процессор;
- память, включающую в себя оперативную память (ОЗУ, RAM- Random Access Memory) и постоянную память (ПЗУ, ROM- Read Only Memory);
- устройства ввода/вывода (УВВ, I/O- Input/ Output Devices), служащие для связи МС с внешними устройствами, для приема (ввода, чтения (Read)) входных сигналов и выдачи (вывода, записи (Write)) выходных сигналов.

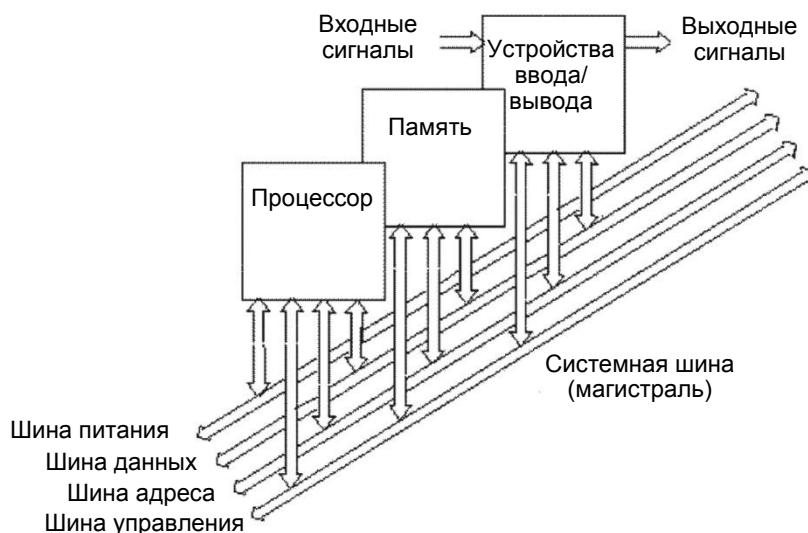


Рис. 1.10. Структура микропроцессорной системы (МС)

Все устройства МС объединяются общей **системной шиной** (она же называется **системной магистралью**). Системная магистраль включает в себя четыре основные шины нижнего уровня:

- шину адреса (Address Bus);
- шину данных (Data Bus);
- шину управления (Control Bus);

- шину питания (Power Bus).

Шина данных – это основная шина, которая используется для передачи информационных кодов между всеми устройствами МС. Количество ее разрядов (линий связи) определяет скорость и эффективность информационного обмена, а также максимально возможное количество команд. Шина данных всегда двунаправленная, так как предполагает передачу информации в обоих направлениях. Наиболее часто встречающийся тип выходного каскада для линий этой шины – выход с тремя состояниями. Обычно шина данных имеет 8, 16, 32, или 64 разряда. Разрядность шины определяет и разрядность всей магистрали.

Шина адреса служит для определения адреса (номера) устройства, с которым процессор обменивается информацией. Каждому устройству (кроме процессора), каждой ячейке памяти присваивается собственный адрес. Шина адреса - вторая по важности шина, которая определяет максимально возможную сложность МС, т.е. допустимый объем памяти и, следовательно, максимально возможный размер программы и максимальный объем запоминаемых данных. Количество адресов, обеспечиваемых шиной адреса, определяется как 2^N , где N- количество разрядов (линий связи). Разрядность шины обычно кратна 4 и может достигать 32.

Шина управления предназначена для передачи отдельных управляющих сигналов. Каждый из этих сигналов во время обмена информацией имеет свою функцию. Некоторые сигналы служат для стробирования передаваемых или принимаемых данных (т.е. определяют моменты времени, когда информационный код выставлен на шину данных). Другие управляющие сигналы могут использоваться для подтверждения приема данных, сброса всех устройств в исходное состояние, тактирования комплекта устройств и т.д. Линии шины управления могут быть однонаправленными или двунаправленными.

Шина питания предназначена не для обработки информации, а для питания системы. Она состоит из линий питания и общего провода. В МС может быть один источник питания (чаще +5 В) или несколько. Все устройства подключены к этим линиям параллельно. В контроллере КМПС3-1 микроконтроллер PIC содержит только один вход питания **Vdd** и общий вход **Vss**, являющиеся линиями **шины питания системной шины (магистрали)** микроконтроллера PIC.

Если в МС надо ввести входной код (входной сигнал), то процессор по шине адреса обращается к нужному устройству ввода/вывода и принимает по шине данных входную информацию. Если из МС надо вывести выходной код (или выходной сигнал), то процессор обращается по шине адреса к нужному устройству ввода/вывода и передает ему по шине данных выходную информацию.

Если информация должна пройти сложную многоступенчатую обработку, то процессор может хранить промежуточные результаты в системной оперативной памяти. Для обращения к любой ячейке памяти процессор выставляет ее на шину адреса и передает в нее информационный код по шине данных или же принимает из нее информационный код по шине данных. В памяти (ОЗУ и ПЗУ) находятся также и управляющие коды (команды выполняемой процессором программы), которые процессор также читает по шине данных с адресацией по шине адреса. ПЗУ используется в основном для хранения программы начального пуска МС, которая выполняется каждый раз после включения питания. Информация в нее заносится изготовителем раз и навсегда.

Итак, МС обеспечивает большую гибкость работы, она способна настраиваться на любую задачу. Это обуславливается прежде всего тем, что функции, выполняемые МС, определяются **программой (программным обеспечением, software)**, которую выполняет процессор. Аппаратура (**аппаратное обеспечение, hardware**) остается неизменной при любой задаче. Записывая в память системы программу, можно сконструировать МС, выполняющую любую задачу, поддерживаемую данной аппаратурой. Шинная организация связей МС позволяет довольно легко заменять аппаратные модули, например, заменять память на новую большего объема, добавлять или модернизировать устройства ввода/вывода, наконец, заменять процессор на более мощный. Сказанное может быть подтверждено рассмотренной выше заменой контроллера КМПСЗ-1 на контроллер КЗГД-1 применительно к газовым двигателям.

Практически любая развитая МС поддерживает три основных режима обмена по магистрали:

- программный обмен информацией;
- обмен с использованием прерываний (Interrupts);

- обмен прямого доступа у памяти (ПДП, DMA – Direct Memory Access).

Программный обмен информацией является основным в любой МС. Он предусмотрен всегда, без него невозможны другие режимы обмена. В этом режиме процессор является единоличным хозяином (задатчиком, Master) системной магистрали. Все операции (циклы) обмена информацией инициируются только процессором, все они выполняются строго в порядке, предписанном исполняемой программой.

Обмен по прерываниям используется тогда, когда необходима реакция МС на какое-то внешнее событие, приход внешнего сигнала. В режиме прерывания процессор, получив запрос прерывания от внешнего устройства, заканчивает выполнение текущей команды и переходит к программе обработки прерывания. Закончив выполнение программы обработки прерывания, он возвращается к прерванной программе с той точки, где его прервали.

Прямой доступ к памяти (ПДП) – это режим, отличающийся от двух ранее рассмотренных тем, что обмен по системной шине происходит без участия процессора. Операция ПДП сводится к пересылке информации из устройства ввода/вывода в память или же из памяти в устройство ввода/вывода. Как правило, в микроконтроллерах режим ПДП не используется, так как требует в структуре контроллера наличия дополнительного устройства (контроллера ПДП).

1.3.2. Архитектура микропроцессорных систем

В рассмотренной на рис. 1.10 структуре МС **шина данных** была единой для данных и команд. Это так называемая **одношинная прынстонская или фон-неймановская архитектура МС**. Соответственно в составе системы в этом случае присутствует одна общая память как для данных, так и для команд (рис. 1.11).

Существует также альтернативный тип архитектуры МС – это архитектура с отдельными шинами данных и команд (**двухшинная или гарвардская архитектура**). Эта архитектура предполагает наличие в системе отдельной памяти для данных и отдельной памяти для команд (рис. 1.12).

Архитектура с общей шиной распространена гораздо больше, она применяется в персональных компьютерах и сложных микрокон-

троллерах. Архитектура с отдельными шинами применяется в основном в *микроконтроллерах*, где ее преимущества проявляются в форме максимального быстродействия при постоянной заданной тактовой частоте.



Рис. 1.11. Архитектура с общей шиной данных и команд

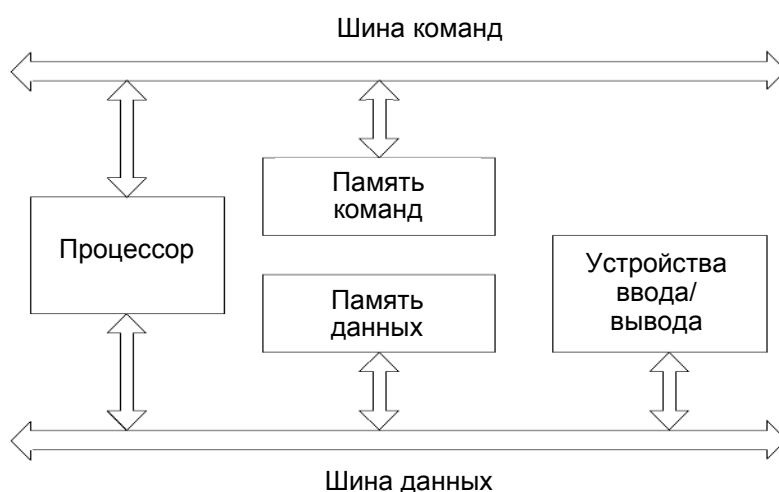


Рис. 1.12. Архитектура с отдельными шинами данных и команд

1.3.3. Циклы обмена информацией в МС

Обмен информацией в микропроцессорных системах происходит в **циклах обмена**. Под циклом обмена подразумевается временной интервал, в течение которого происходит выполнение одной элементарной операции обмена по шине. Например, пересылка кода данных из процессора в память или же пересылка кода данных из устройства ввода/вывода в процессор.

Циклы обмена информацией делятся на два основных типа:

- цикл записи (вывода), в котором процессор записывает (выводит) информацию;
- цикл чтения (ввода), в котором процессор читает (вводит) информацию.

Во время каждого цикла устройства, участвующие в обмене информацией, передают одно другому информационные и управляю-

щие сигналы в строго установленном порядке или, как еще говорят, в соответствии с **принятым протоколом обмена информацией**.

Длительность цикла обмена может быть постоянной или переменной, но она всегда включает в себя несколько периодов тактовой частоты системы. То есть даже в идеальном случае частота чтения информации процессором и частота записи информации оказываются в несколько раз меньшими тактовой частоты системы.

Чтение кодов команд из памяти также производится с помощью циклов чтения. В случае двухшинной архитектуры в отличие от одношинной циклы чтения команд и записи или чтения данных разделяются по разным шинам и могут выполняться одновременно.

Структура циклов (т.е. фазовые и амплитудные соотношения импульсов, проходящих по различным шинам МС в процессе обмена информацией) в настоящем пособии не рассматривается. Эти вопросы подробно рассмотрены в [4] применительно к микроконтроллерам серии PIC16Cxxxx.

1.3.4. Функции устройств МС

К этим устройствам относятся: **процессор, память (оперативная и постоянная), устройства ввода/вывода**.

1.3.4.1. Функции процессора

Процессор представляет собой часть микросхемы **микроконтроллера**. Микросхема процессора обязательно имеет выводы трех шин: шины адреса, шины данных (команд) и шины управления.

Важнейшие характеристики процессора - это количество разрядов (линий) шины данных, количество разрядов его шины адреса и количество линий управляющих сигналов в его шине управления. Разрядность шины данных определяет скорость работы системы. Разрядность шины адреса определяет допустимую сложность системы. Количество линий управления определяет разнообразие режимов обмена и эффективность обмена с другими устройствами.

Кроме выводов для сигналов трех основных шин процессор всегда имеет вывод (или два вывода) для подключения внешнего тактового сигнала или **кварцевого резонатора CLK**, так как процессор всегда представляет собой тактируемое устройство (рис. 1.13). Чем выше тактовая частота процессора, тем быстрее он работает, т.е. быстрее выполняет команды.

Еще один важный сигнал, который имеется в каждом процессоре, - это **сигнал начального сброса RESET**. При включении питания, аварийной ситуации или зависании процессора подача этого сигнала приводит к *инициализации процессора*, заставляет его приступить к выполнению программы начального запуска. Аварийная ситуация может быть вызвана помехами по цепям питания и «земли», сбоями в работе памяти, внешними ионизирующими излучениями и еще множеством причин. В результате процессор может потерять контроль над выполняемой программой и остановиться на каком-либо адресе. Для выхода процессора из этого состояния используется сигнал **RESET**. После включения питания процессор приходит в первый адрес программы начального пуска и выполняет эту программу, записанную в энергонезависимую память. Затем процессор начинает выполнять основную программу, записанную в постоянной или оперативной памяти, для чего выбирает по очереди все команды. От этой программы процессор могут отвлекать внешние прерывания или запросы на ПДП. Команды из памяти процессор выбирает с помощью циклов чтения. При необходимости процессор записывает данные в память либо устройства ввода/ вывода с помощью циклов записи или же читает данные из памяти или из устройства ввода/вывода с помощью циклов чтения.

Таким образом, функции процессора следующие:

- выборка (чтение) выполняемых команд;
- ввод (чтение) данных из памяти или из устройства ввода/ вывода;
- вывод (запись) данных в память или устройство ввода/вывода;
- обработка данных (операндов), в том числе арифметические операции над ними;
- адресация памяти, т.е. задание адреса памяти, которым будет производиться обмен;
- обработка прерываний и режима ПДП.

Упрощенно структуру процессора можно представить в следующем виде (см. рис. 1.13).

Схема управления выборкой команд выполняет чтение команд из памяти и их дешифрацию.

АЛУ предназначено для обработки информации в соответствии с полученной процессором командой. Это логические операции (типа

логического «И», «ИЛИ», «Исключающего ИЛИ» и т.д.), т.е. побитные операции над операндами, а также арифметические операции (типа сложения, вычитания, умножения, деления и т.д.). Над какими кодами производится операция, куда помещаются ее результаты – все это определяется выполняемой командой.

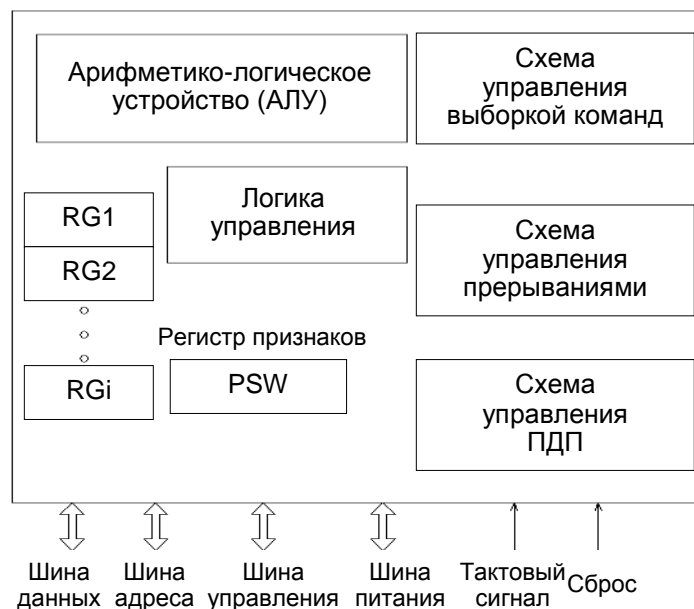


Рис. 1.13. Внутренняя структура микропроцессора

Регистры процессора представляют собой ячейки очень быстрой памяти (ОЗУ) и служат для временного хранения различных кодов: данных, адресов, служебных кодов.

Регистр признаков также является внутренним регистром процессора, однако содержание его не данные, не адрес, а слово состояния процессора (ССП, PSW- Processor Status Word). Каждый бит этого слова (флаг) содержит информацию о результатах предыдущей команды. Эти биты (флаги) используются командами условных переходов, например, командой перехода в случае нулевого результата предыдущей команды.

Схема управления прерываниями обрабатывает поступающий на процессор запрос прерывания, определяет адрес начала программы обработки прерывания, обеспечивает переход к этой программе после выполнения текущей команды и сохранение в памяти текущего состояния регистров процессора.

Схема управления ПДП служит для временного отключения процессора от внешних шин и приостановки работы процессора на время предоставления ПДП.

Логика управления организует взаимодействие всех узлов процессора, перенаправление данных, синхронизацию работы процессора с внешними сигналами, а также реализует процедуры ввода и вывода информации.

1.3.4.2. Функции памяти

Для подключения модуля памяти к системной магистрали необходимы блоки сопряжения, которые включают в себя дешифратор (селектор) адреса, схему обработки управляющих сигналов магистрали и буферы данных (рис. 1.14).

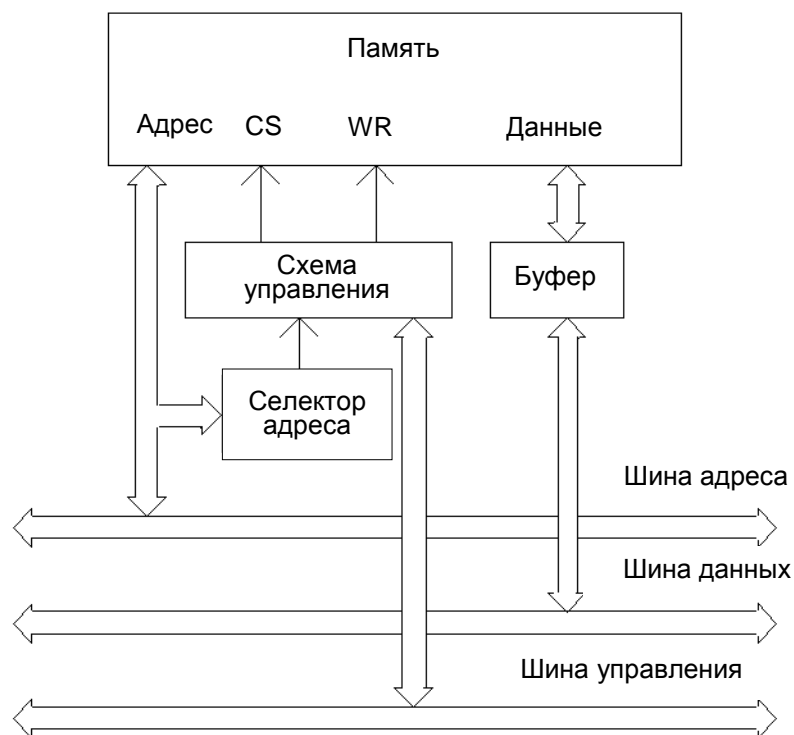


Рис. 1.14. Структура модуля памяти

Память МС выполняет функцию временного или постоянного хранения данных и команд. В случае микроконтроллера она выполняется как часть кристалла МК. Объем памяти определяет допустимую сложность выполняемых МС алгоритмов. Модули памяти выполняются на микросхемах (оперативной или постоянной). Все чаще в составе МК используется флэш-память (англ. - flash memory), которая представляет собой энергонезависимую память с возможностью многократной перезаписи содержимого.

Информация в памяти хранится в **ячейках**, количество которых пропорционально количеству **разрядов шины данных процессора**. Обычно оно кратно восьми (8, 16, 32, 64). Допустимое количество

ячеек памяти определяется как 2^N , где N- количество разрядов шины адреса. Совокупность ячеек памяти называется *пространством памяти* МС.

Оперативная память (ОЗУ) сообщается с системной магистралью в циклах *чтения и записи*, **постоянная память (ПЗУ)** - только в циклах *чтения*.

Память программы начального запуска всегда выполняется на ПЗУ или флэш-памяти. Именно с этой области процессор начинает работу после включения питания или после сброса его с помощью сигнала RESET.

Стек (Stack) - это особая часть оперативной памяти, предназначенная для временного хранения данных в режиме LIFO (Last In – First Out). В этом режиме число, записанное последним, будет прочитано первым, а число, записанное первым, будет прочитано последним.

Еще одна специальная область памяти – это **таблица векторов прерываний**. Любое прерывание обрабатывается через таблицу векторов (указателей) прерываний. В этой таблице находятся адреса начала программ обработки прерываний, которые и называются **векторами**. Таблица векторов прерываний располагается в начале пространства памяти (в ячейках с малыми адресами). Адрес начального элемента каждого вектора представляет собой номер прерывания. В случае *аппаратных прерываний* номер прерываний задается устройством, запросившим прерывание.

Программное прерывание тоже обслуживается через таблицу векторов прерываний, но номер прерывания указывается в составе команды, вызывающей прерывание.

Прерывание в случае аварийной ситуации обрабатывается точно так же, только адрес вектора прерывания (номер строки в таблице векторов) жестко привязан к данному типу аварийной ситуации.

1.3.4.3. Функции устройств ввода/вывода (УВВ)

Устройства ввода/вывода также являются частью микросхемы микроконтроллера и обмениваются информацией с магистралью по тем же принципам, что и память. Но модули памяти обмениваются информацией только с магистралью и процессором, а устройства ввода/вывода взаимодействуют еще и с внешними устройствами,

цифровыми или аналоговыми. Структура подключения модуля УВВ представлена на рис. 1.15.

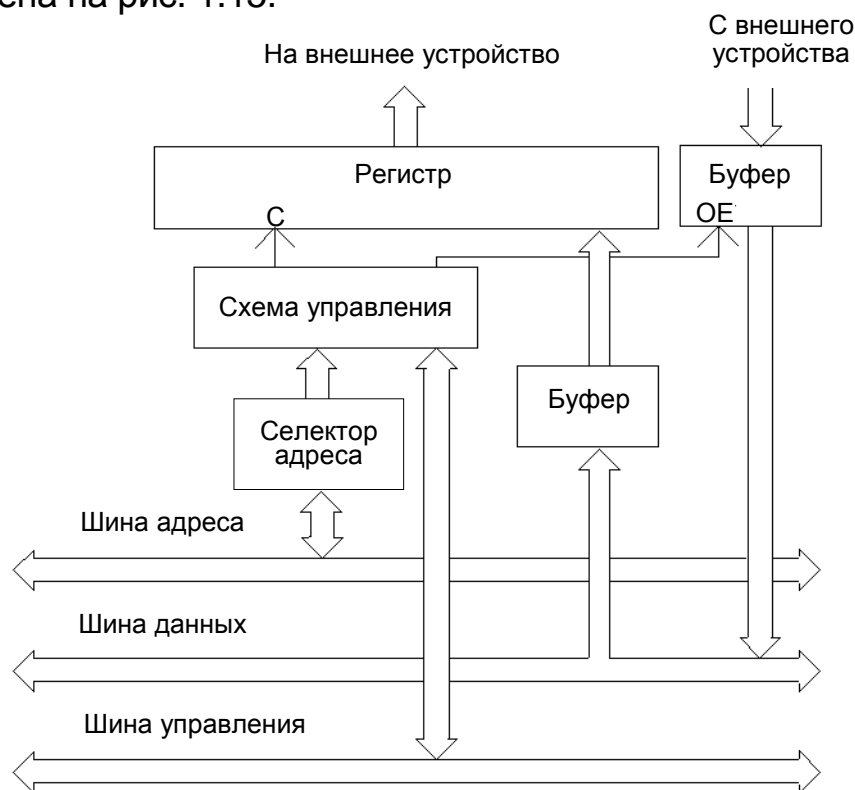


Рис. 1.15. Подключение модуля устройства ввода/вывода

Самые простейшие устройства ввода/вывода выдают во внешнее устройство код данных в параллельном формате и принимают из внешнего устройства код данных в параллельном формате. Такие устройства называют параллельными портами ввода/вывода. Параллельные порты обычно имеются в составе микроконтроллеров. Именно через параллельные порты микроконтроллер связывается с внешним миром.

Входной порт (порт ввода) устройства в простейшем случае представляет собой параллельный регистр, в который процессор может записывать информацию. Выходной порт (порт вывода) обычно представляет собой однонаправленный буфер, через который процессор может читать информацию от внешнего устройства.

Порт может быть и двунаправленным (входным/выходным) В этом случае процессор пишет информацию во внешнее устройство и читает информацию из внешнего устройства по одному и тому же адресу в адресном пространстве системы. Входные и выходные линии для связи с внешним устройством могут быть объединены поразрядно, образуя двунаправленные линии.

1.3.5. Работа процессора и система команд

Основная функция процессора – это выполнение команд, реализующих алгоритм управления. Последовательность команд определяется **программой**. Написание программ для МС – это важнейший и часто наиболее трудоемкий этап разработки МС. Самые компактные и быстрые программы создаются на языке Ассемблер, использование которого без знания **системы команд микроконтроллера** абсолютно невозможно. Ассемблер представляет собой символьную запись цифровых кодов машинного языка, **кодов команд процессора**. Ассемблер - язык программирования нижнего уровня, использующий **мнемонические обозначения** машинных команд.

Мнемотехника (мнемоника) - искусство запоминания и укрепления памяти, совокупность приемов и способов, облегчающих запоминание и увеличивающих объем памяти путем образования искусственных ассоциаций. Система, позволяющая записывать в мозг не визуальную информацию, а преобразованную в комбинацию образов. Например, использование (сокращение) некоторых английских слов (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Мнемоника	Описание команды
<u>ADD</u> W f, d	Сложение W с f
<u>AND</u> W f, d	Логическое И W и a
<u>CLRF</u> f	Сброс регистра f
<u>CLR</u> W	Сброс регистра W
<u>GOTO</u> k	Переход по адресу

Система команд процессора включает в себя следующие основные группы команд:

- команды пересылки данных;
- арифметические команды;
- логические команды;
- команды переходов.

Команды пересылки данных не требуют выполнения никаких операций над кодами данных (операндами). Операнды просто пересылаются из источника в приемник. Источником и приемником могут быть внутренние регистры процессора, ячейки памяти или устройства ввода/вывода. АЛУ в данном случае не используется.

Арифметические команды выполняют операции сложения, вычитания, деления, увеличения на единицу (инкрементирования), уменьшения на единицу (декрементирования) и т.д. Этим командам требуется один или два входных операнда. Формируют команды один операнд.

Логические команды производят над операндами логические операции, логическое И, логическое ИЛИ, исключающее ИЛИ, очистку, инверсию, разнообразные сдвиги. Этим командам, как и арифметическим, требуется один или два входных операнда, и формируют логические команды один выходной операнд.

Команды переходов предназначены для изменения обычного порядка последовательности команд. С их помощью организуются переходы на подпрограммы и возвраты из них, всевозможные циклы, ветвления программ, пропуски фрагментов программ и т.д. Именно эти команды позволяют строить сложные алгоритмы обработки информации.

Количество команд у процессоров может существенно различаться в зависимости от типа. Процессоры микроконтроллеров серии PIC с сокращенным набором команд (так называемые RISC- процессоры) содержат не более 35 команд.

1.3.6. Основные особенности микроконтроллеров семейства PIC, применяемых в контроллерах систем зажигания и управления рабочим процессом ДВС

Основные особенности микроконтроллеров следующие:

- высокая скорость выполнения команд: при тактовой частоте 20 МГц время машинного цикла составляет 200 нс (5 млн. операций/с);
- наличие мощных драйверов (до 25 мА) на линиях портов УВВ, что позволяет подключать непосредственно к ним мощную нагрузку, например, светодиоды;
- низкая потребляемая мощность;
- ориентация на ценовую нишу предельно низкой стоимости, определяющей использование дешевых корпусов с малым количеством выводов (8, 14, 18, 28), отказ от внешних шин адреса и данных (кроме PIC17C4х), использование упрощенного механизма прерываний и аппаратного (программно недоступного) стека;

- модификации в трех температурных диапазонах температур (от 0 до +70°C, от -40 до +85°C, от -40 до +125°C).

1.3.7. Программное обеспечение для PIC-контроллеров

Проектировщик МС завершает проектирование системы разработкой программы, написанной в соответствии с требуемым алгоритмом, который должен быть реализован контроллером. Реализация заключается в выдаче на выходных портах контроллера требуемых электрических сигналов на исполнительные устройства системы на основании информации, полученной МС от комплекта датчиков. Что необходимо, чтобы разработанная программа, выполненная разработчиком в виде компьютерного файла, написанного в соответствии с определенными требованиями (правилами), определенными изготовителем контроллера, была реализована в контроллере управления ДВС?

- Компьютер с универсальным ПО определенного уровня.
- Программатор (аппаратный посредник между компьютером и микроконтроллером).
- Специальное ПО, обеспечивающее согласование программных средств компьютера и микроконтроллера. Причем это специальное ПО используется на стадиях написания программ, их отладки и собственно записи программ в память микроконтроллера.

Отладка программ необходима для того, чтобы при последующей записи программ в память МК возможные технические ошибки не привели к повреждению МК, так как операция записи необратима.

Основным инструментом для профессиональной разработки программ является Ассемблер, предполагающий детализацию на уровне команд МК. Только Ассемблер позволяет максимально использовать ресурсы кристалла.

Ассемблер MPASM как раз и представляет собой интегрированную программную среду для разработки программных кодов МК.

Программа MPASM может использоваться для двух целей:

- генерации исполняемого кода, предназначенного для записи в МК с помощью программатора;
- генерации перемещаемого объектного кода, который затем будет связан с другими ассемблированными модулями.

Соответственно MPASM может использоваться как самостоятельно, так и в составе интегрированной среды разработки MPLAB. Она включает в себя несколько программ: собственно MPASM, MPLINK и MPLIB, причем каждая из них обладает собственным интерфейсом. Интерфейс MPASM представлен специальным файлом, диалоговое окно которого представлено на рис. 1.16.

The screenshot shows the MPASM dialog box with the following details:

- Source File Name:** C:\DOCUMENT~1\9335~1\0016~1\2C83~
- Options:**
 - Radix:** Default (selected), Hexadecimal, Decimal, Octal
 - Warning Level:** Default (selected), All Messages, Warnings and Errors, Errors Only
 - Hex Output:** Default (selected), INHX8M, INHX8S, INHX32
 - Generated Files:** Error File (checked), List File (checked), Cross Reference File (checked), Object File (unchecked)
- Macro Expansion:** Default, On (selected), Off
- Processor:** 16C72 (selected)
- Tab Size:** 8
- Extra Options:** Case Sensitive (checked)
- Buttons:** X Exit, V Assemble, Save Settings on Exit (checked), ? Help

Рис. 1.16. Диалоговое окно Ассемблера MPASM

Окно содержит загрузочную строку, в которую загружается адрес программы, написанной в редакторе Word.

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите структуру типового микропроцессорного блока управления, перечень и назначение базовых узлов.
2. Каковы новые свойства микропроцессорных систем зажигания по сравнению со свойствами ранее выпускавшихся систем?
3. Опишите упрощенный алгоритм работы контроллера микропроцессорной системы управления зажиганием.
4. Опишите контроллер МПСЗ как частный случай микропроцессорной системы (МС). Каковы шинная структура связей микропроцессорной системы, основные устройства шины МС, универсальность МС?
5. Какова архитектура микропроцессорных систем? Опишите два основных типа архитектуры МС.
6. Дайте перечень и назначение других (кроме контроллера) элементов микропроцессорных систем управления двигателем.

2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ (МПСЗ)

2.1. Область определяемых параметров

Под электрическими параметрами понимаются параметры, значения которых определяют выходные характеристики системы зажигания, такие как амплитуда развиваемого высокого напряжения U_{2m} ; энергия и длительность искрового разряда и ряд других. К числу определяемых в результате расчета параметров системы зажигания относятся следующие:

- индуктивность первичной обмотки катушки зажигания L_1 ;
- коэффициент трансформации w_2/w_1 ;
- сопротивление первичной обмотки катушки зажигания $R_{1к}$;
- величина тока разрыва I_p ;
- индуктивность вторичной обмотки катушки зажигания L_2 ;
- сопротивление вторичной обмотки катушки зажигания $R_{2к}$;
- оптимальное время накопления энергии t_n , реализуемое контроллером системы зажигания, при различных условиях эксплуатации.

2.2. Вводимые ограничения

Определение упомянутых выше параметров должно производиться при условии выполнения ряда ограничений, накладываемых условиями применения катушки зажигания. К этим условиям относятся:

- частота следования искр f_u ;
- диапазон изменения напряжения питания U_n ;
- допустимое значение первичного напряжения, прикладываемого к ключу, коммутирующему ток в первичной обмотке катушки зажигания;
- требуемые значения развиваемого высокого напряжения U_{2m} при нормируемых нагрузках;
- требуемые значения энергии и длительности искрового разряда;
- требуемая скорость нарастания импульса вторичного напряжения;
- допустимая мощность рассеяния в катушке зажигания и коммутирующем ключе.

- другие ограничения.

2.2.1. Ограничения, связанные с процессом накопления энергии в первичной обмотке катушки зажигания

Основная формула, описывающая процесс накопления энергии в первичной цепи катушки зажигания [4], имеет вид

$$I_p = \frac{U_n - \Delta U_k}{R_1} (1 - e^{-\frac{R_1 t_H}{L_1}}), \quad (2.1)$$

где U_n - напряжение источника питания; ΔU_k - падение напряжения на полупроводниковом ключе, включенном в первичную цепь катушки зажигания; t_H - период накопления энергии, т.е. время, в течение которого величина тока в катушке достигает заданного значения I_p ; R_1 - сопротивление первичной цепи системы зажигания; $R_1 = R_{1к} + R_{1н}$; $R_{1н}$ - сумма всех переходных сопротивлений в первичной цепи системы зажигания, влияющих на величину первичного тока в катушке зажигания.

Формула, отражающая связь некоторых параметров катушки зажигания при условии протекания процесса накопления энергии при **минимальных потерях**, [4] имеет вид

$$\frac{R_1}{L_1} t_H = 1,253; \text{ или } t_H = 1,253 \frac{L_1}{R_1} = 1,253 \cdot \tau, \quad (2.2)$$

где t_H - период, в течение которого ток нарастает до заданного значения I_p .

Возможно другое соотношение этих параметров, полученное из условия обеспечения накопления заданного уровня энергии в требуемом диапазоне напряжений питания [4]

$$t_H = -\frac{L_1}{R_1} \ln \frac{U_{бн} - U_{бп}}{U_{бн} - \Delta U_k}, \quad (2.3)$$

где $U_{бн}$ - напряжение аккумуляторной батареи при номинальном режиме (13,5 В для 12-вольтового электрооборудования; 27 В - для 24-вольтового); $U_{бп}$ - минимальное напряжение аккумуляторной батареи в режиме пуска; 6 В - для 12-вольтового электрооборудования; 12 В - для 24-вольтового электрооборудования.

2.2.2. Ограничения по максимальной частоте следования искр

Максимальная частота следования искр определяется по формуле

$$f_{\text{им}} = \frac{n_{\text{max}} \cdot i}{60}, \quad (2.4)$$

где n_{max} - максимальная частота вращения коленчатого вала двигателя (об/мин); i - требуемое число искр за один оборот коленчатого вала (КВ) двигателя; ограничивает, соответственно, длительность периода накопления энергии в катушке зажигания, так как

$$T_{\text{и}} = \frac{1}{f_{\text{им}}} = \frac{60}{n_{\text{max}} i} > t_{\text{н}}, \quad (2.5)$$

т.е. при максимальной частоте вращения двигателя период накопления энергии $t_{\text{н}}$ должен быть меньше, чем период следования искр; ($i=2$ для 4-цилиндрового 4-тактного двигателя; $i=3$ для 6-цилиндрового; $i=4$ для 8-цилиндрового и т.д.).

2.2.3. Ограничения, связанные с допустимыми режимами работы катушки зажигания и полупроводниковых ключей

2.2.3.1. Напряжение, возникающее на первичной обмотке катушки зажигания в момент образования высокого напряжения, не должно превышать допустимых значений, оговоренных техническими условиями на применяемый ключ:

$$U_{1\text{м}} \leq [U_{1\text{м}}]_{\text{доп}} \quad (2.6)$$

Развернутые выражения для $U_{1\text{м}}$ будут даны ниже. Здесь следует упомянуть только о том, что определение $U_{1\text{м}}$ может производиться двумя способами:

- в условиях, когда этот параметр может достигать своих максимальных значений. Например, когда нагрузки на вторичную цепь катушки зажигания минимальны (аварийное выпадение высоковольтного провода из гнезда катушки или распределителя зажигания). Применяемый ключ не содержит встроенных ограничителей напряжения;
- в условиях, когда величины вторичных нагрузок максимальны и $U_{1\text{м}}$ имеет минимальное значение. Снятие вторичной нагрузки приведет к условию $U_{1\text{м}} \geq U_{\text{ст}}$ (где $U_{\text{ст}}$ - напряжение стабилизации встроенного стабилитрона транзистора). В этом случае дополнительным ограничением, очевидно, будет являться ток стабилизации, протекающий через выходной ключ в период, когда $U_{1\text{м}} > U_{\text{ст}}$.

2.2.3.2. Максимальные значения токов первичной цепи катушки зажигания (токов разрыва) не должны превышать допустимых значений для применяемого ключа

$$I_{рм} \leq [I_{км}]_{доп}. \quad (2.7)$$

2.2.3.3. Эффективное значение тока через катушку зажигания не должно превышать допустимых значений ключа

$$I_{эфф} \leq [I_{к}]_{доп}. \quad (2.8)$$

2.2.3.4. Мощность, рассеиваемая катушкой зажигания и ключом, не должна превышать допустимых значений

$$P_{кат} = I_{эфф}^2 \cdot R_{1к} \leq [P]_{доп}; \quad P_{к} = I_{эфф}^2 \cdot R_{к} \leq [P_{к}]_{доп}. \quad (2.9.)$$

2.2.4. Ограничения, связанные с параметрами высоковольтного импульса, реализуемого системой зажигания

2.2.4.1. Амплитуда высоковольтного импульса, развиваемого катушкой зажигания, должна быть не менее заданного значения, при оговоренных также значениях шунтирующей и емкостной нагрузок вторичной цепи катушки зажигания

$$U_{2m} \geq U_{пр} \cdot K_з, \quad (2.10)$$

где $U_{пр}$ - напряжение пробоя свечи в заданном диапазоне режимов двигателя; $K_з$ - коэффициент запаса, обеспечивающий после пробоя искрового промежутка выделение в нем энергии, необходимой для воспламенения рабочей смеси. Значения $K_з$ находятся обычно в пределах 1,5...1,7.

2.2.4.2. Скорость нарастания вторичного напряжения dU_2/dt должна быть не ниже заданного значения.

2.2.5. Ограничения, связанные с параметрами искрового разряда, возникающего на электродах свечи или имитирующем разряднике после пробоя искрового промежутка. К этим параметрам относятся:

2.2.5.1. Длительность искрового разряда

$$\tau_{ур} \geq [\tau_{ур}]_{mp} \quad (2.11)$$

и должна быть не меньше требуемой.

2.2.5.2. Энергия искрового разряда

$$E_p = U_{up} i_{cp} \tau_{up} \geq [E_p]_{mp}, \quad (2.12)$$

где U_{up} - напряжение искрового разряда в стандартных условиях; i_{cp} - среднее значение тока искрового разряда; τ_{up} - длительность разряда.

Энергия искрового разряда должна быть не меньше требуемой.

2.3. Основные расчетные формулы

2.3.1. Формула для максимума вторичного напряжения

$$U_{2m} = I_p k \sqrt{\frac{L_1}{C_2}} \cdot D \quad (2.13)$$

где $D = e^{\frac{R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_3}}{\sqrt{4L_2 C_2 - (R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_3})^2}} \cdot \arctg \sqrt{\frac{4L_2 C_2 - (R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_3})^2}{R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_3}}}}$, k - коэффициент связи обмоток; $k=0,9 \dots 0,93$ для конструкций катушек с разомкнутой магнитной системой; $k=0,95 \dots 0,98$ для конструкций катушек с замкнутой магнитной системой. C_2 - емкость вторичной цепи катушки зажигания

$$C_2 = C_{2к} + C_{пр} + C_{св},$$

$C_{2к}$ - собственная емкость вторичной обмотки катушки зажигания; $C_{пр}$ - емкость высоковольтных проводов; $C_{св}$ - емкость свечи; R_2 - сопротивление вторичной цепи системы зажигания; $R_2 = R_{2к} + R_{пр} + R_{св}$; $R_{2к}$ - активное сопротивление вторичной обмотки катушки зажигания; $R_{пр}$ - распределенное активное сопротивление высоковольтных проводов или наконечника свечи; $R_{св}$ - активное помехоподавительное сопротивление, встраиваемое в изолятор свечи; L_2 - индуктивность вторичной обмотки катушки зажигания; R_3 - эквивалентное значение нагрузки вторичной цепи.

Примечание. Формула (2.1) справедлива для современных систем зажигания, в которых в отличие от ранее применявшихся систем не используется первичная емкость.

2.3.2. Формула для подсчета тока индуктивной части искрового разряда

$$i_2(t) = -\frac{U_{up}}{R_2} + \left(i_{20} + \frac{U_{up}}{R_2}\right) e^{-\frac{R_2}{L_2} t}, \quad (2.14)$$

где $i_{20} = U_{np} \left\{ \sqrt{\frac{C_2}{L_2} \left(\frac{U_{2m}^2}{U_{np}^2} - 1 \right)} + \frac{1}{R_3} \right\}$; U_{np} - напряжение пробоя искрового промежутка;

принято рассматривать пробивное напряжение стандартного 3-электродного искрового промежутка с зазором 7 мм ($U_{np}=12$ кВ); U_{up} - напряжение искрового разряда для упомянутого разрядника, при котором происходит выделение энергии в искровом промежутке ($U_{up} \approx 1000$ В).

Полагая в (2.2.1) $t = \tau_{up}$, при котором ток достигает предельного минимального критического значения $i_{2кр}$, определим выражение для длительности искрового разряда в виде

$$\tau_{up} = \frac{L_2}{R_2} \cdot \ln \left[\frac{i_{20} + \frac{U_{up}}{R_2}}{i_{2кр} + \frac{U_{up}}{R_2}} \right]. \quad (2.15)$$

Полагая $t=0$, определим из 2.2.1 начальное максимальное значение тока индуктивной части разряда

$$i_{2m} = i_{20}.$$

Среднее значение тока искрового разряда i_{2cp} определится по формулам

$$i_{2cp} = \frac{i_{20} + i_{2кр}}{2} \quad (2.16)$$

$$\tau_{up} = \frac{L_2}{R_2} \cdot \ln \left[\frac{i_{20} + \frac{U_{up}}{R_2}}{i_{2кр} + \frac{U_{up}}{R_2}} \right]. \quad (2.17)$$

Энергия искрового разряда определится по формуле (2.12).

В последние годы искровые разрядники при заводских испытаниях заменяются стабилитронами с напряжением стабилизации 800 В. Причем требования к параметрам искрового разряда в их численном выражении при обоих методах измерения остаются одинаковыми. Возникает серьезная ошибка при сравнительной оценке систем, параметры которых измеряются различными методами. Действительно, стабилитрон является аналогом искрового промежутка только после пробоя последнего. Но в реальном искровом промежутке индуктивная фаза искрового разряда начинается только тогда, ко-

гда значительная энергия (5...10% от первоначально запасенной) уже выделилась в емкостной фазе и при оценке эффективности искрового разряда не учитывается. Примерно на такую же величину (5...10%) отличаются значения энергии искрового разряда при обоих методах измерений. Естественно, при наличии стабилитрона длительность и энергия искрового разряда выше. Для определения параметров искрового разряда при наличии стабилитрона целесообразно применить следующую формулу:

$$\tau_{up} = \frac{L_2}{R_2} \cdot \ln \frac{i_p' \frac{w_1}{w_2} + \frac{800}{R_2}}{i_{2кр} + \frac{800}{R_2}}, \quad (2.18)$$

где i_p' - значение тока разрыва, определенное из энергетического соотношения $\frac{L_1 i_p'^2}{2} = \frac{L_1 (i_p')^2}{2} + P_{C2}$, где $P_{C2} = \frac{C_2 U_{np}^2}{2}$ - энергия емкостной фазы искрового разряда; C_2 - емкость вторичной цепи; U_{np} - пробивное напряжение искрового промежутка свечи (≈ 12000 В). Начальное значение разрядного тока

$$i_{20} = i_p' \frac{w_1}{w_2}. \quad (2.19)$$

2.3.3. Формулы для расчета скорости нарастания вторичного напряжения

Приводимые ниже формулы основаны на ряде известных допущений, которые исключают влияние на процесс возникновения высокого напряжения высокочастотной составляющей. Это обстоятельство может давать большие погрешности (до 20%) при вычислении реальной скорости нарастания вторичного напряжения, так как влияние высокочастотной составляющей сказывается именно на начальной части кривой вторичного напряжения $u_2(t)$. Практически использовать более сложные выражения для тока искрового разряда нецелесообразно, так как методы измерений индуктивности и вторичной емкости сопоставимы по уровню погрешностей с допущениями теории. Однако предлагаемые формулы просты и позволяют выявить относительную тенденцию изменения скорости нарастания при варьировании параметров катушек зажигания.

Для случая отсутствия первичной емкости классическая теория дает следующее выражение для $u_2(t)$ [4]:

$$u_2(t) = \frac{M I_p}{L_2 C_2 \Omega_1} e^{-\alpha_1 t} \sin \Omega_1 t, \quad (2.20)$$

где $M = \kappa \sqrt{L_1 L_2}$ - коэффициент взаимной индукции обмоток катушки;

$$\Omega_1 = \sqrt{\left[\frac{R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_3}}{2(L_2 C_2)} \right]^2 + \frac{R_2 + R_3}{R_3 L_2 C_2}}; \text{ или, полагая, что } R_2 \ll R_3$$

$$\Omega_1 = \sqrt{\left[\frac{R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_3}}{2(L_2 C_2)} \right]^2 + \frac{1}{L_2 C_2}} = \sqrt{\alpha_1^2 + \frac{1}{L_2 C_2}}; \quad (2.21)$$

$$\alpha_{11} = \frac{(R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_3})}{2(L_2 C_2)}. \quad (2.22)$$

Для синусоидальной функции справедливо соотношение

$$\sin \Omega_1 t_{np} \approx \frac{U_{np}}{U_{2m}}; \text{ откуда } t_{np} = \frac{\arcsin \frac{U_{np}}{U_{2m}}}{\Omega_1}. \quad (2.23)$$

Здесь под U_{np} понимается значение развиваемого вторичного напряжения $U_2 < U_{2m}$, при котором может наступить пробой искрового промежутка.

В технических условиях на катушке зажигания скорость нарастания вторичного напряжения определяется как отношение перепада вторичного напряжения от 2 до 20кВ к длительности изменения вторичного напряжения от 2 до 20 кВ. Пользуясь формулой (2.24), определим значения t_1 и t_2 как, соответственно, время достижения вторичного напряжения значений $U_{np}=2\text{кВ}$ и $U_{np}=20\text{кВ}$. Тогда скорость нарастания вторичного напряжения определится как отношение

$$v = \frac{\Delta U_2}{\Delta t} = \frac{20000 - 2000}{t_2 - t_1} = \frac{18000}{t_2 - t_1} \text{ (В/мкс)}, \quad (2.24)$$

где $t_2 = \frac{\arctg \frac{20000}{U_{2m}}}{\Omega_1}$; $t_1 = \frac{\arctg \frac{2000}{U_{2m}}}{\Omega_1}$; значения t в формулу (2.24)

принято подставлять в микросекундах.

2.3.4. Формулы для расчета мощности, рассеиваемой в катушке зажигания и силовой части коммутатора (контроллера)

Осциллограмма тока в первичной цепи системы зажигания изображена на рис. 2.1.

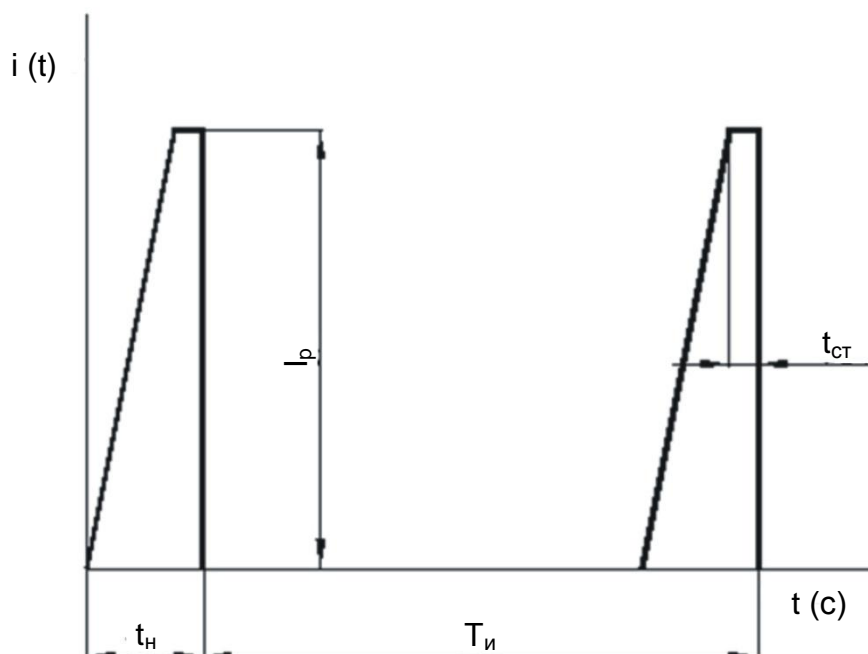


Рис. 2.1. Зависимость тока в первичной цепи катушки зажигания от времени: $T_{и}$ - период следования искры; $t_{н}$ - общее время накопления энергии в катушке зажигания; $t_{ст}$ - период стабилизации тока разрыва I_p ; $t_{н}$ - период накопления энергии до заданного тока разрыва

В общем случае

$$t_{н} = t_{н}' + t_{ст}. \quad (2.25)$$

Значения $t_{ст}$ для коммутаторов зажигания с нормируемым временем накопления энергии определяются характеристиками микросхемы нормирования и составляют обычно 3...7 % от $T_{и}$ для основного рабочего диапазона частоты вращения двигателя. Этот диапазон находится в пределах от частоты вращения холостого хода $n_{хх}$ до максимальной частоты вращения поддержания постоянства амплитуды тока разрыва n_{I_p} .

Значения $t_{н}$ определяются при выборе оптимальных параметров катушки зажигания (см. ниже) по различным критериям.

Значения n_{I_p} можно определить из соотношений

$$\frac{60}{n_{I_p} \cdot i} \cdot \alpha_3 = t_{н}; \quad n_{I_p} = \frac{60 \cdot \alpha_3}{t_{н} \cdot i}, \quad (2.26)$$

где α_3 - относительная замкнутость первичной цепи вне диапазона регулирования t_H (для большинства практических применений $\alpha_3=0,66$).

2.3.5. Формула для расчета максимума первичного напряжения на катушке зажигания

$$U_{1m} \cong U_{2m} \cdot \frac{W_1}{W_2}. \quad (2.27)$$

2.4. Пример расчета параметров катушки зажигания

2.4.1. Исходные данные для расчета

- Развиваемое вторичное напряжение при $R_{ш}=1,0$ МОм; $C_{ш}=100$ пкФ.
- Максимальная частота следования искр f_u ; $f=n_{max}i/60=6000 \cdot 2/60=200$ Гц.
- Диапазон изменения напряжения питания U_n ; $U_{бн}=13,5$ В; $U_{бп}=6$ В.
- Допустимое значение первичного напряжения, прикладываемого к ключу, коммутирующему ток в первичной обмотке катушки зажигания - $[U_{1m}] \leq 350$ В при $R_{ш}=1,0$ МОм; $C_{ш}=100$ пкФ.
- Требуемые значения энергии и длительности искрового разряда - $\tau_{ур} \geq 2,0$ мс; $E_{ир} \geq 50$ мДж.
- Требуемая скорость нарастания импульса вторичного напряжения $v \geq 600$ В/мс.
- Допустимая мощность рассеяния в катушке зажигания и коммутирующем ключе $P_k \leq 25$ Вт; $P_T \leq 5$ Вт.

2.4.2. Графо - аналитический расчет

2.4.2.1. Строим графическую зависимость $K_u=f(w_2/w_1)$ при $L_1=varia$ для установленных выше исходных параметров.

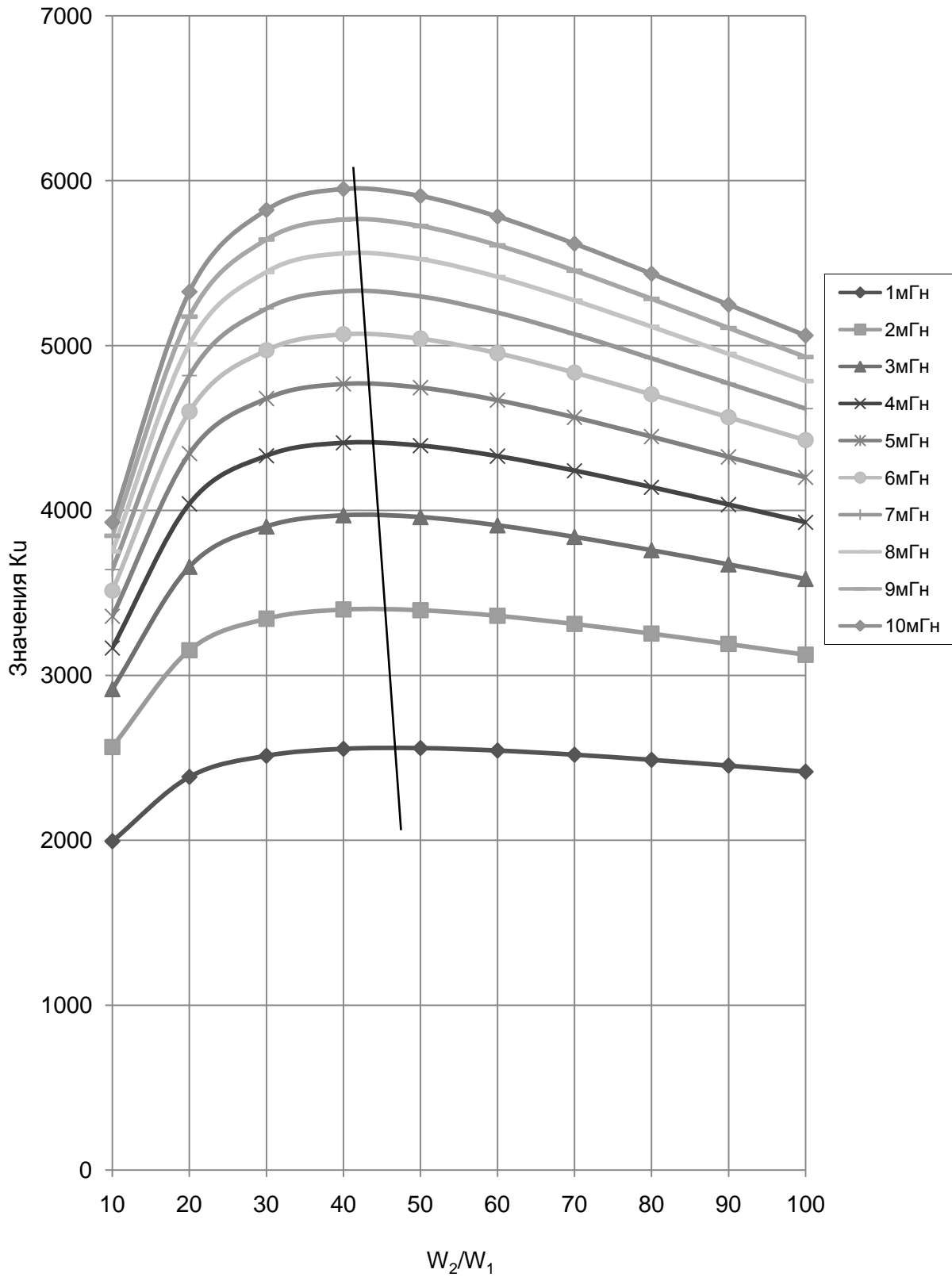
Здесь K_u - относительный коэффициент напряжения

$$K_u = \frac{U_{2m}}{I_p}. \quad (2.28)$$

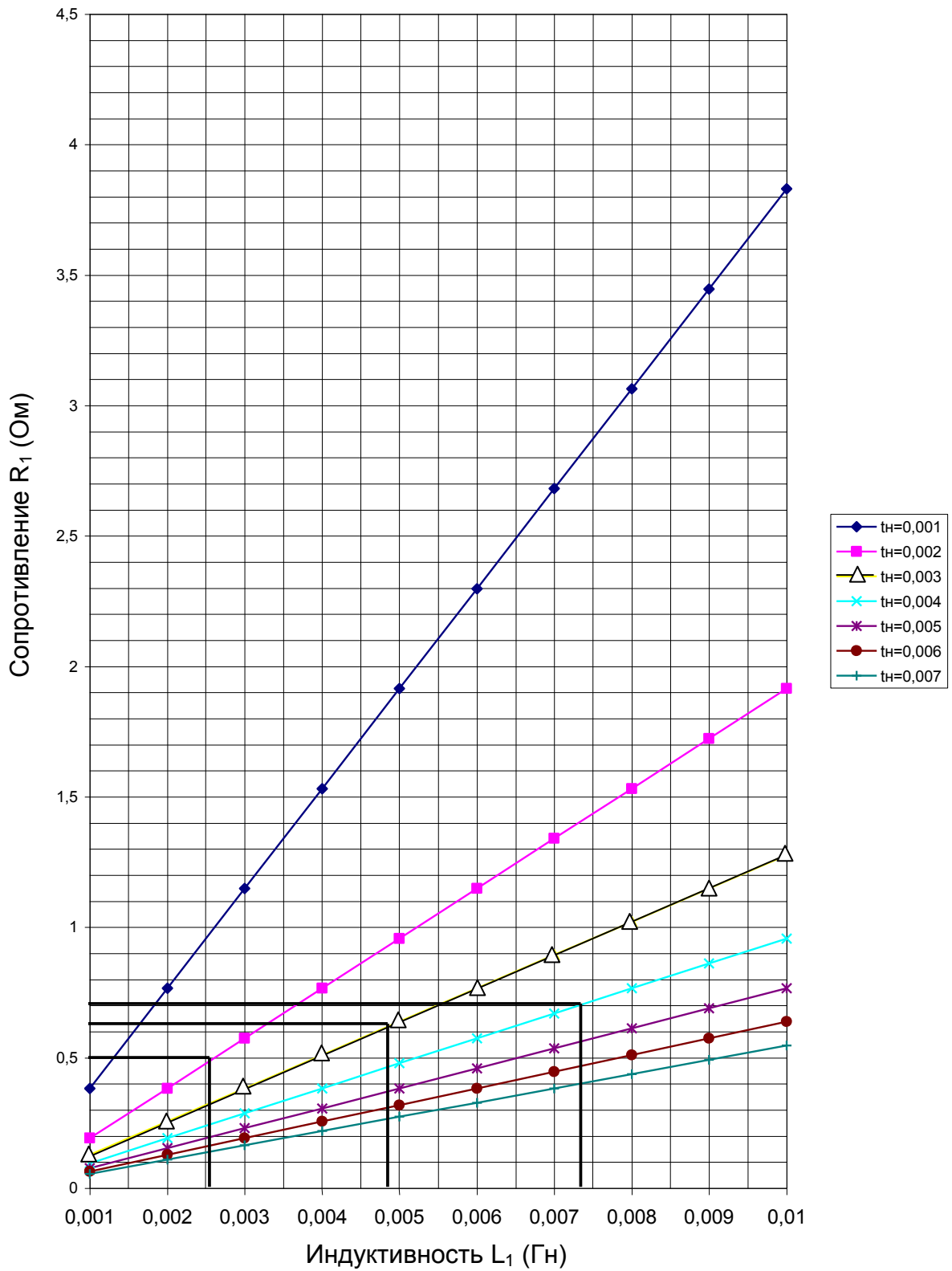
2.4.2.2. Принимая ограничение (2.3), определим значения $R_1=f(L_1)$ из (2.3) для диапазона времени накопления $t_H=1-7$ мс

$$R_1 = -\frac{L_1}{t_H} \ln \frac{U_{бн} - U_{бп}}{U_{бн} - \Delta U_k}.$$

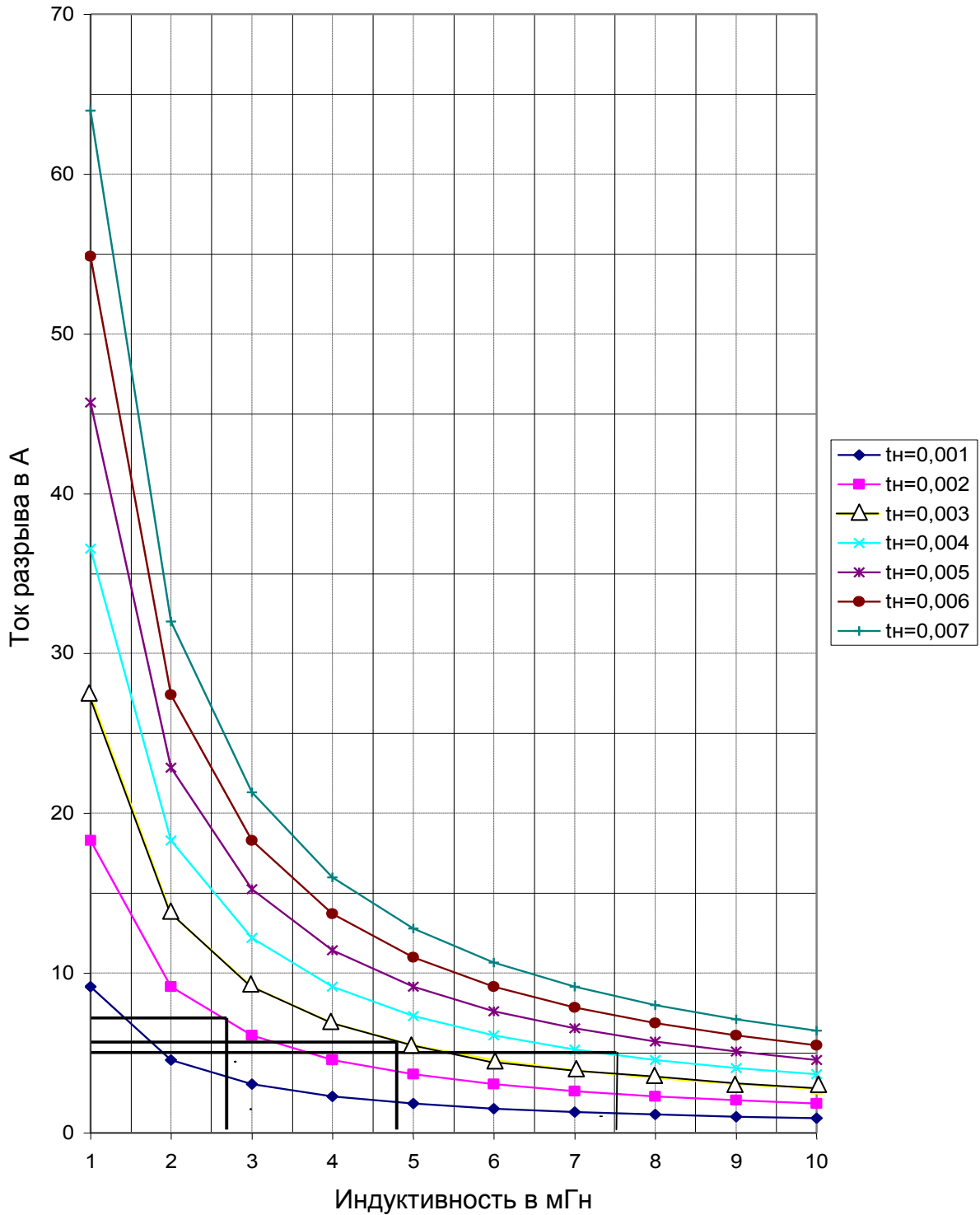
Зависимость K_u от коэффициента трансформации



Зависимость построена для диапазона значений $L_1=1-10$ мГн; коэффициента трансформации 10-100.

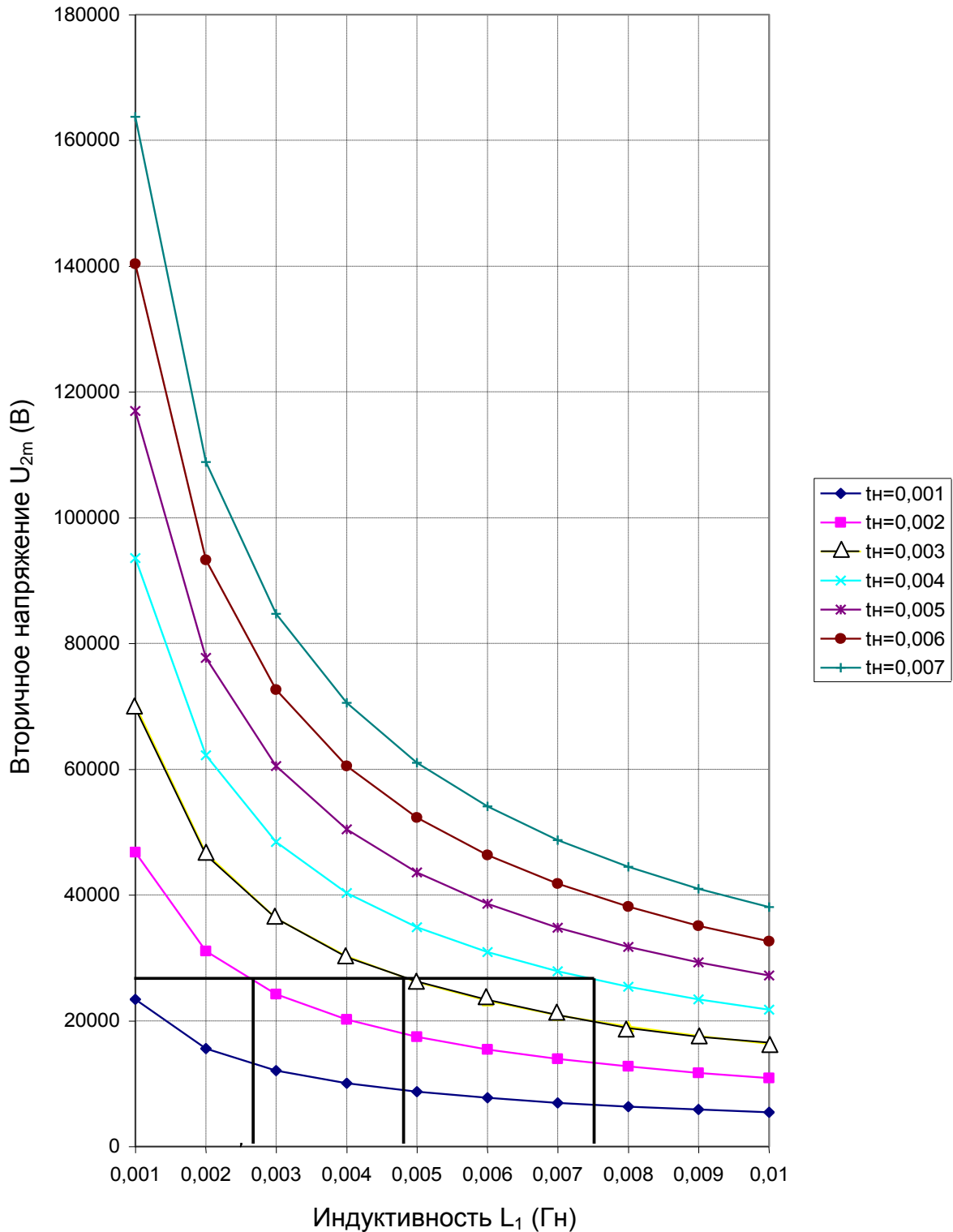
Зависимость R_1 от L_1 

2.4.2.3. Построим зависимость тока разрыва $I_p=f(L_1)$ по формуле (2.1) при ограничениях, аналогичных ограничениям предыдущего параграфа.

Зависимость тока разрыва от индуктивности L_1 

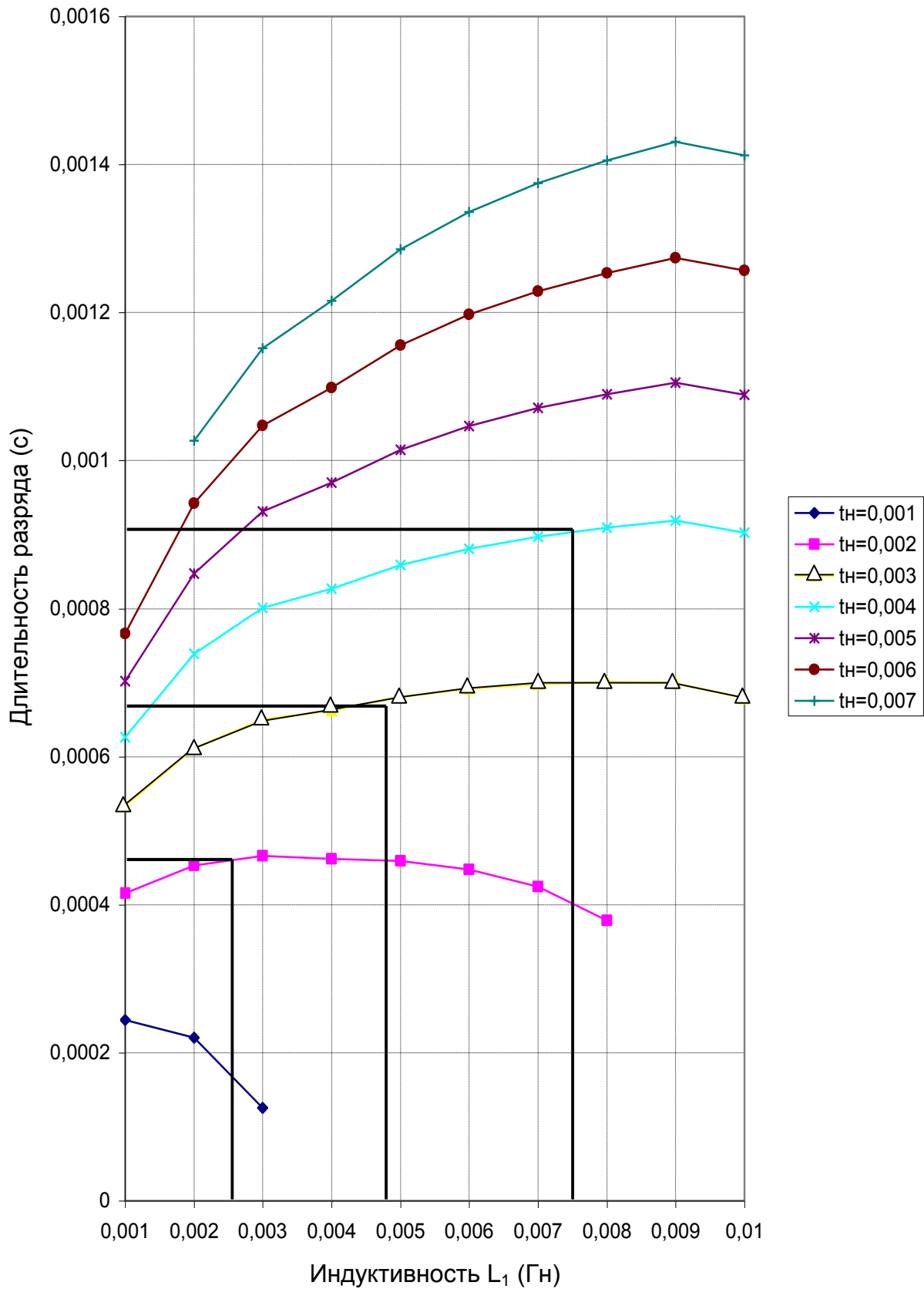
2.4.2.4. Построим значения развиваемого вторичного напряжения при аналогичных ограничениях $U_{2m}=f(L_1)$ для различных вариантов t_H , используя формулу (2.27), оптимальные значения K_i для каждого значения L_1 из параграфа 2.4.2.1 и значения I_p из параграфа 2.4.2.3.

Зависимость U_{2m} от индуктивности L_1 от индуктивности первичной обмотки

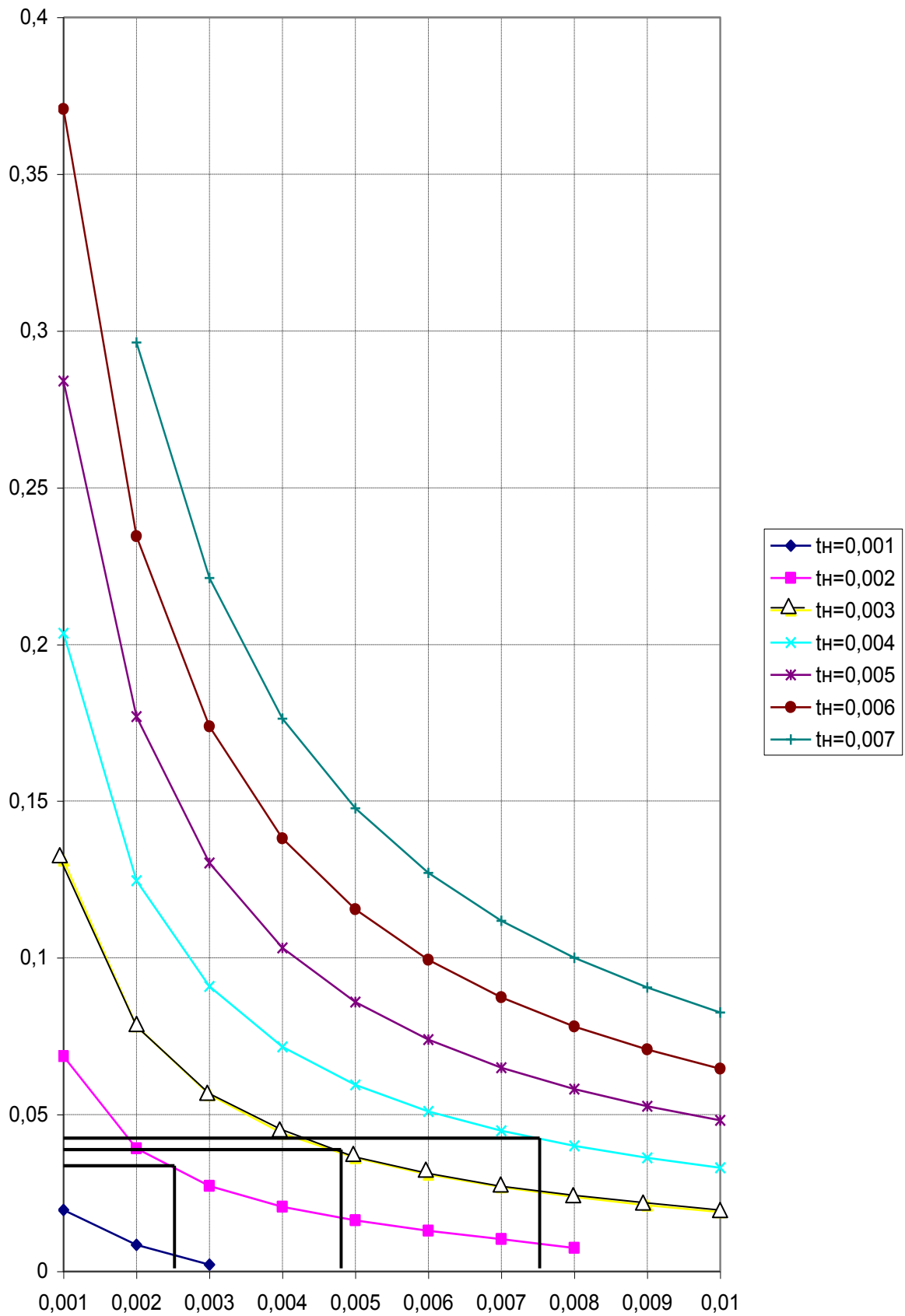


Аналогичным образом строятся зависимости длительности и энергии искрового разряда, амплитуды тока искрового разряда, скорости нарастания фронта высоковольтного импульса, амплитуды первичного напряжения по формулам (2.12), (2.14), (2.17), (2.24).

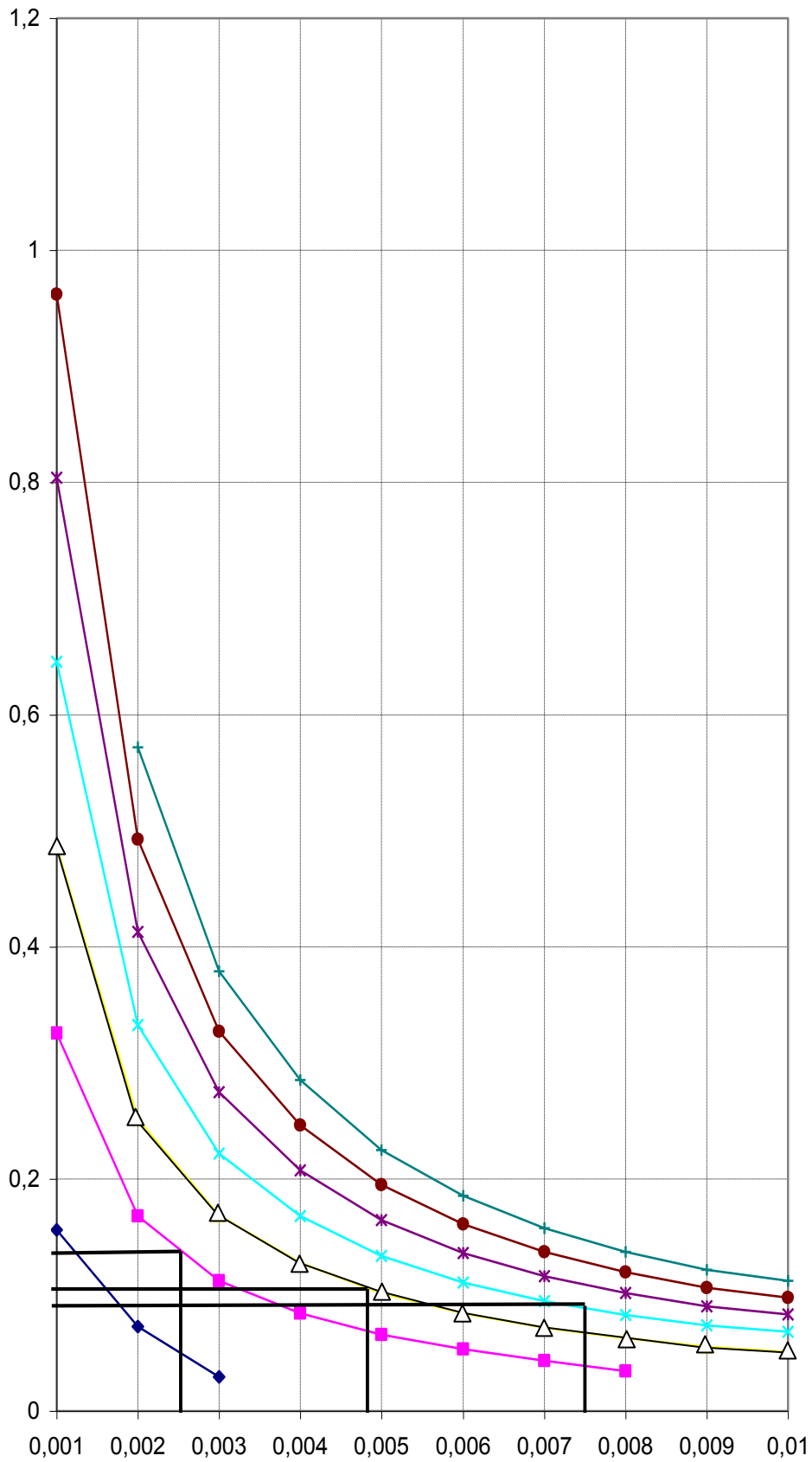
Зависимость длительности искрового разряда от индуктивности первичной цепи L_1 (Гн) при $R_{ш}=1$ Ом, $C_2=100$ пкФ

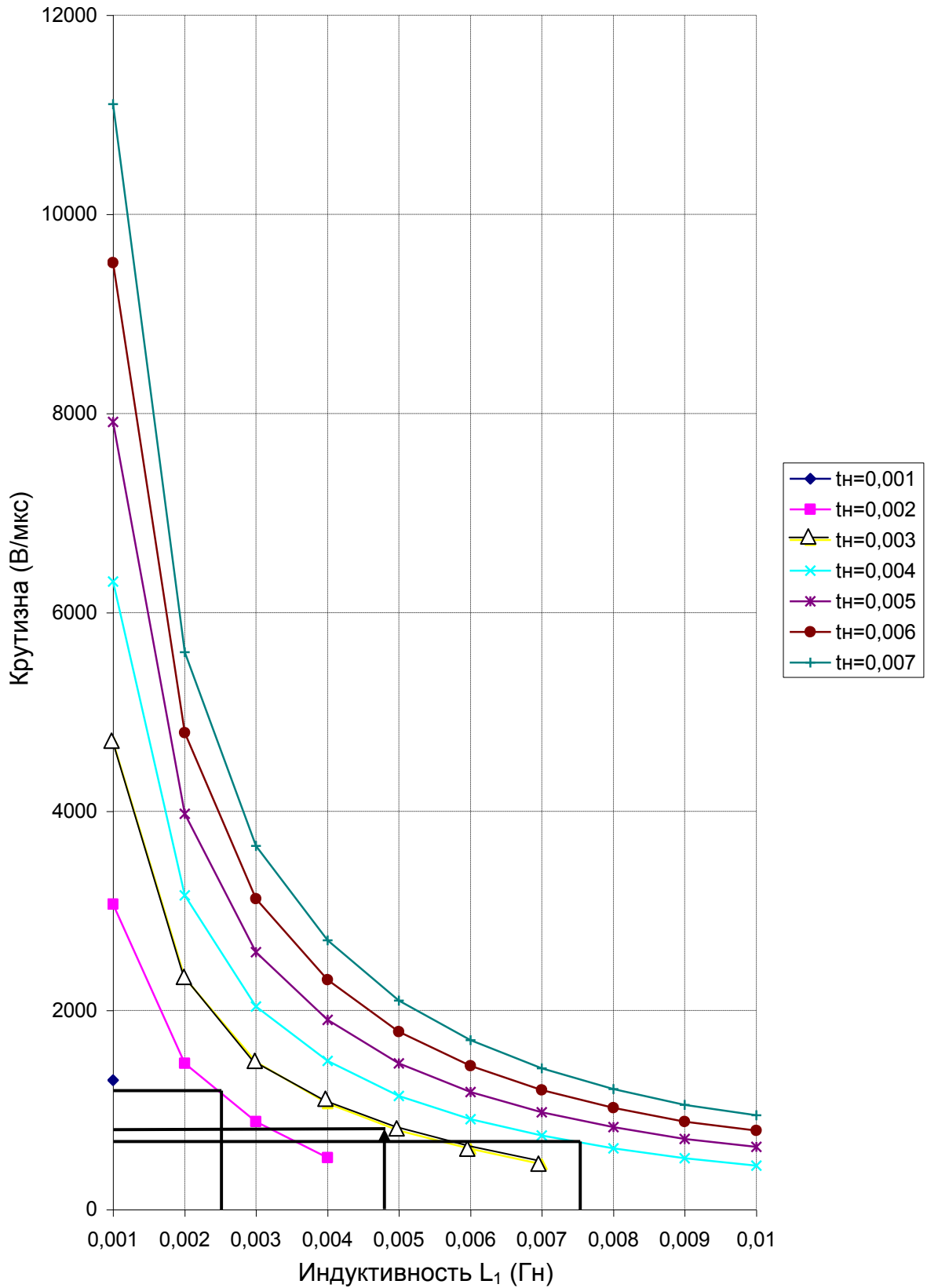


Зависимость энергии разряда от L_1 (Гн)
при $R_{ш}=1$ Ом, $C_2=100$ пкФ



Зависимость амплитуды тока разряда от L_1 (Гн)
при $R_{ш}=1$ Ом, $C_2=100$ пкФ



Зависимость крутизны от L_1 

После построения соответствующих графиков рассматривается возможность реализации требуемых параметров при выборе од-

ного из них в качестве приоритетного, например, вторичного напряжения U_{2m} .

Пример:

- на графике $U_{2m}=f(L_1)$ на стр. 58 проведем прямую, параллельную оси абсцисс на уровне 25 кВ. Точки пересечения этой прямой с кривыми на графике определяют значения индуктивности L_1 для различных значений времени накопления t_n ;
- обращаясь к последующим графикам и восстанавливая ординаты при полученных значениях индуктивности до пересечения с кривыми соответствующих параметров, можем найти значения R_1 ; I_p ; U_{1m} ; энергии и длительности искрового разряда и других параметров для значений t_n , удовлетворяющих условию обеспечения заданного уровня U_{2m} . Результаты расчета сводим в табл. 2.1.

Таблица 2.1

L_1 (мГн)	R_1 (Ом)	I_p (А)	w_1/w_2	U_{1m} (В)	τ_{up} (мс)	\mathcal{E}_{ip} (мДж)	v (В/мкс)	t_n (мс)	I_{20} (мА)	U_{2m} (кВ)
2,6	0,5	7,5	45	556	0,40	30	1200	2,0	140	25,0
4,8	0,62	6,0	43	581	0,67	36	800	3,0	100	25,0
7,3	0,7	5,0	41	610	0,90	42	650	4,0	85	25,0

Во множестве значений входных параметров, образованных перебором возможных значений параметров (L_1 ; w_1/w_2 ; t_n), локализована область параметров, удовлетворяющих условию $U_{2m}=25$ кВ. Область ограничена значениями $L_1=2,6...7.3$ мГн. Детализация значений L_1 внутри этого диапазона может быть получена за счет повышения дискретности значений t_n (например, 0,5 мс вместо 1,0 мс).

Дальнейшая локализация данных таблицы может производиться, исходя из критериев оценки (ограничений) других параметров. С точки зрения длительности искрового разряда предпочтительным является вариант с максимальным значением индуктивности. Кроме того, этот вариант обладает минимальными значениями амплитуды тока искрового разряда i_{20} . С этой точки зрения вариант с минимальным значением индуктивности является недопустимым, так как значения i_{20} превышают 100 мА, что свидетельствует о дуговом характере искрового разряда, неприемлемом для автомобильных систем.

Могут быть и другие направления поиска параметров системы. Если приоритетным выходным параметром принять длительность или энергию искры, то начинать поиск следует с графиков на стр. 59.

Для этого, например, на графиках $\tau_{up}=f(L_1)$ следует провести горизонталь на уровне требуемой величины длительности разряда. Тогда проекции точек пересечения этой горизонтали с кривыми $\tau_{up}=f(L_1)$ на ось значений L_1 определяют диапазон индуктивностей, при которых будет обеспечена требуемая длительность искры. Поиск других параметров системы производится аналогично приведенному выше примеру.

Общая теория поиска экстремальных (наилучших) параметров системы, обеспечивающей заданный уровень выходных характеристик, в данном пособии не рассматривается. Следует только отметить, что при безусловном выполнении требований к выбранному **приоритетному** выходному параметру получить желаемые значения всех других выходных параметров, как правило, не удаётся. Как и в других областях техники, необходим поиск компромисса.

Настоящая методика построена на формулах, полученных при ряде физических допущений, что не может обеспечить абсолютную достоверность значений параметров (погрешность может достигать $\approx 25\%$). Однако она достаточно верно отражает взаимосвязь задаваемых и рассчитываемых параметров и может служить эффективным инструментом в направлении их поиска.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите параметры МПСЗ, определяемые в результате электрического расчета катушки зажигания, их перечень, физический смысл и принцип организации расчета.
2. Дайте обобщенную формулу для максимума вторичного напряжения. Опишите значения параметров, их физический смысл.
3. Каковы коэффициент напряжения, его физический смысл и назначение графика $K_u=f(L_1)$ при электрическом расчете параметров МПСЗ?
4. Каковы основные ограничения при электрическом расчете параметров МПСЗ, накладываемые условиями применения катушки зажигания, их перечень, физический смысл и учет при организации расчета?
5. Какова максимальная частота следования искр и ее учет при определении электрических параметров МПСЗ?
6. Опишите ограничения, связанные с оптимизацией процесса накопления энергии в катушке зажигания МПСЗ, и их учет при организации электрического расчета параметров МПСЗ.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КАТУШЕК ЗАЖИГАНИЯ МПСЗ

3.1. Определение геометрических размеров катушки зажигания с замкнутой магнитной системой

3.1.1. Основные расчетные формулы и принимаемые допущения

Исходными уравнениями для расчета являются два электротехнических уравнения *индуктивности*:

$$L_1 = w_1^2 \cdot G, \quad (3.1)$$

где w_1 - количество витков первичной обмотки; G – проводимость магнитной цепи, сцепленной с витками обмотки катушки;

$$L_1 = \frac{\Psi}{I} = \frac{\Phi w_1}{I_p} = \frac{B_c S \cdot 10^{-4} \cdot w_1}{I_p}, \quad (3.2)$$

где B_c - индукция в стали сердечника; S_c - сечение сердечника; I_p - максимальное значение тока в обмотке (тока разрыва в катушке зажигания).

Для обычно применяемых сталей сердечника индукция в стали $B_c \approx 0,9 \div 1,5$ Тл.

Из (3.2) определяем значения

$$S_c w_1 = \frac{L_1 I_p}{B_c} \cdot 10^4. \quad (3.3)$$

То, что находится в правой части уравнения (за исключением B_c), определено при электрическом расчете. Значения L_1 и I_p соответствуют запасаемой катушкой энергии.

В левой части уравнения этой энергии сопоставлено произведение $S_c w_1$. Одно и то же значение $S_c w_1$, соответствующее заданному уровню энергии, может быть получено при больших сечениях и, соответственно, малом количестве витков. И, наоборот, при большом количестве витков потребуется малое сечение магнитопровода. Если не существует каких-либо других ограничений, то выбор соотношения S_c и w_1 диктуется в первом случае - экономией медного провода, а во втором - уменьшением габаритов и снижением массы катушки.

При конструировании катушки для системы зажигания высокой энергии имеется важный параметр, который диктует однозначный вы-

бор упомянутого соотношения. Этот параметр - активное сопротивление первичной обмотки катушки R_1 , определенное на стадии электрического расчета.

Эскиз рассчитываемой магнитной системы представлен на рис. 3.1.

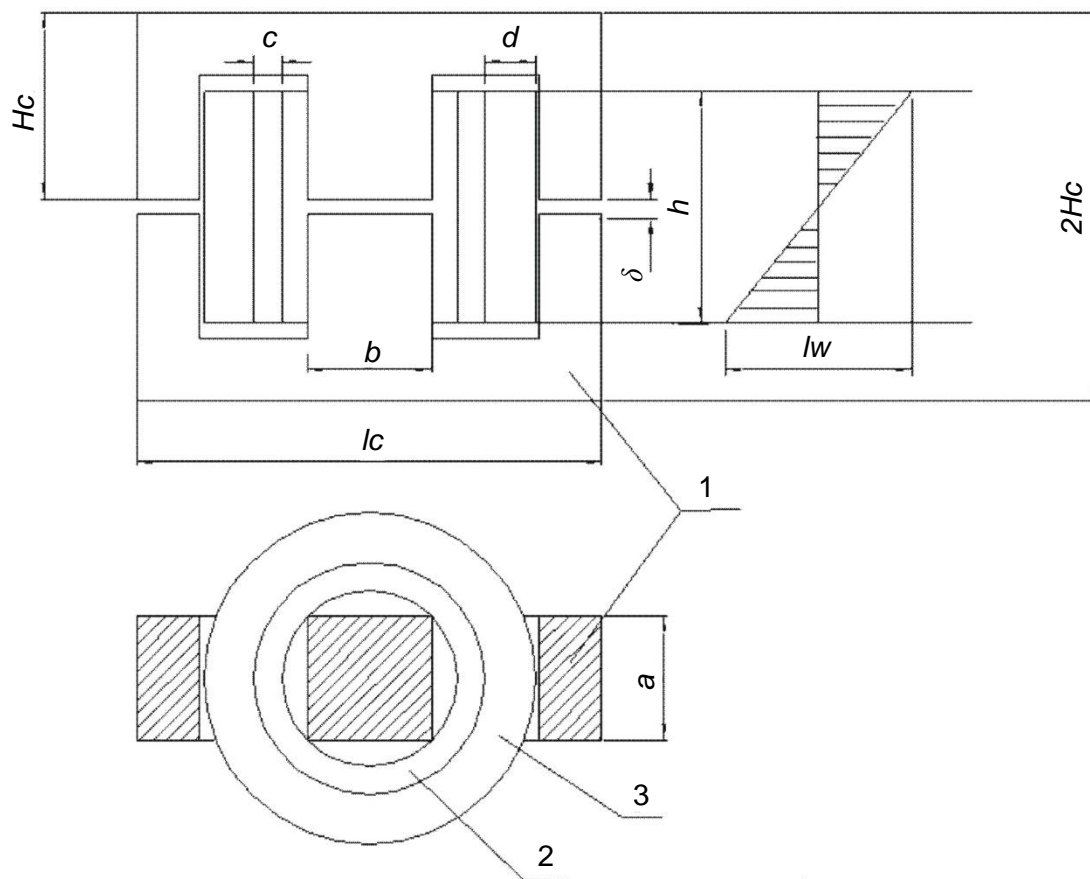


Рис. 3.1. Эскиз магнитной системы катушки с Ш-образным сердечником: 1 - Ш-образный, наборный сердечник, разрезной; 2 - первичная обмотка; 3 - вторичная обмотка; а – толщина сердечника; b - ширина центрального стержня; c - ширина сечения обмотки; h - высота обмотки; δ - ширина зазора

Если допустить, что площадь поперечного сечения магнитопровода по всей длине средней силовой линии одинакова, то проводимость G магнитной системы может быть представлена схемой замещения на рис. 3.2.

Общая проводимость магнитной цепи определяется согласно схеме замещения по рис. 3.2

$$G = G_{\text{пц}} + G_{\text{с}}; \quad (3.4)$$

$$G_{\text{пц}} = \frac{1}{R_1 + R_{\delta}} = \frac{1}{\frac{l_{\text{ср}}}{\mu_{\text{с}} S_{\text{с}} k_3 \cdot 10^{-4}} + \frac{\delta}{S k_{\text{в}} 0,4\pi \cdot 10^{-8}}}, \quad (3.5)$$

где l_{cp} - длина средней силовой линии магнитного потока по стали в см; μ_c - магнитная проницаемость стали при данной индукции (по кривым, имеющимся в справочнике). Размерность в Тл/(А/см); S_c - площадь поперечного сечения магнитопровода; k_3 - коэффициент заполнения сечения сталью (0,9...0,95); $\delta = \delta_1 + \delta_2$ - суммарный воздушный зазор; k_b - коэффициент выпучивания, учитывающий увеличение площади воздушных промежутков вследствие выпучивания.

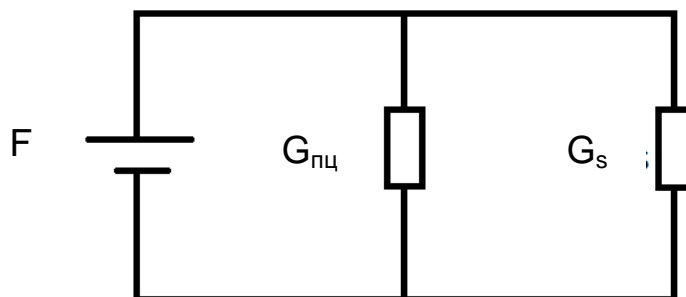


Рис. 3.2. Схема замещения магнитной цепи катушки зажигания с замкнутой магнитной системой, где $F = I_p w_1$ - магнитодвижущая сила; $G_{пц}$ - проводимость последовательной цепи магнитопровода; G_s - проводимость рассеяния

Зная произведение $S_c w_1$, выбрав стандартное значение площади S_c , определим количество витков первичной обмотки w_1 .

Выражение (3) показывает, что при постоянной правой части уравнения большим значениям сечения магнитопровода соответствует меньшее количество витков обмотки. Формально можно согласно (3) найти сечение сердечника, обеспечивающее требуемое значение правой части уравнения при одном витке обмотки. Практически накоплен большой опыт проектирования, при котором в объемной конструкции сердечника приняты априори некоторые соотношения, действительно минимизирующие объем катушки. Например: отношение высоты окна под обмотку h к толщине обмотки c принято равным $h/c=4$ (рис. 3.3); центральное сечение сердечника принимается квадратным и т.п.

Количество витков вторичной обмотки определится из соотношения $w_2 = w_1 \cdot k_{тр}$, где значение коэффициента трансформации $k_{тр}$ определено электрическим расчетом.

Диаметр провода первичной обмотки определяется из формулы

$$d_1 = \sqrt{\frac{4\rho \cdot D_{cp} w_1}{R_1}}, \quad (3.6)$$

где ρ - удельное сопротивление медного провода.

В формуле (3.6) неизвестной величиной является средний диаметр $D_{\text{cp}} = (D_{\text{max}} + D_{\text{min}}) / 2$.

Если обмотка наматывается на круглый каркас, как показано на рис. 3.4, то $D_{\text{min}} = a\sqrt{2}$, где a - толщина сердечника (при $a=b$).

При круглом каркасе имеется незаполненный объем при прямоугольном сечении сердечника. Экономичнее применять прямоугольный каркас, что и делается на практике. Но при круглом каркасе проще применяемые для расчета формулы.

Определение величины диаметра провода первичной обмотки можно провести из допустимой плотности тока

$$68\sigma = \frac{I_{\text{max}}}{s_1} = \frac{4I_{\text{max}}}{\pi \cdot d_1^2} \leq [\sigma]_{\text{доп}}, \quad (3.7)$$

где I_{max} - максимальное значение действующего (эффективного) тока в катушке.

Рекомендуемая плотность тока 8 A/mm^2 .

Из (3.7) определим d_1

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{\text{max}}}{\pi [\sigma]_{\text{доп}}}} \text{ мм.} \quad (3.8)$$

Из (3.6) определим средний диаметр обмотки, при котором обеспечивается требуемая величина R_1

$$D_{\text{cp}} = \frac{R_1 \cdot d_1^2}{4\rho \cdot w_1}. \quad (3.9)$$

Из определения понятия о среднем диаметре

$$D_{\text{cp}} = \frac{D_{\text{max}} + D_{\text{min}}}{2}. \quad (3.10)$$

определим $D_{\text{max}} = 2D_{\text{cp}} - D_{\text{min}}$; или, подставляя значения, получим

$$D_{\text{max}} = \frac{R_1 \cdot d_1^2}{2\rho \cdot w_1} - a\sqrt{2}. \quad (3.11)$$

Разность $(D_{\text{max}} - D_{\text{min}}) / 2 = c = \left(\frac{R_1 d_1^2}{2\rho \cdot w_1} - 2a\sqrt{2} \right) / 2 = (D_{\text{cp}} - D_{\text{min}})$ или

$$c = D_{\text{cp}} - a\sqrt{2} \quad (3.12)$$

позволяет определить *площадь окна первичной обмотки* (см. рис. 3.3)

$$S_{w1} = c \cdot h. \quad (3.13)$$

Формула (3.13) определяет значения площади окна первичной обмотки S_{w1} , которые при вариациях сечения сердечника S_c обеспечивают заданные значения сопротивления первичной обмотки R_1 .

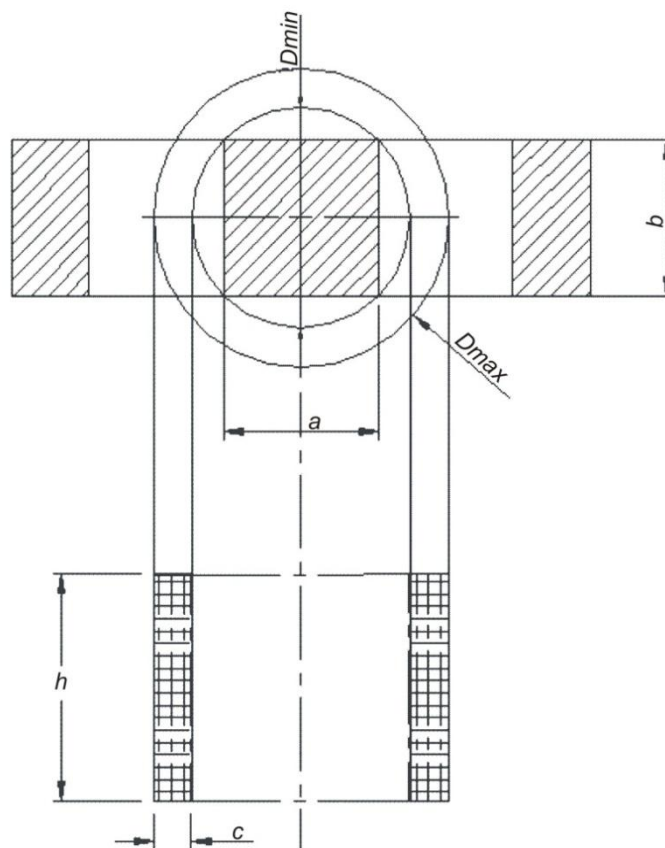


Рис. 3.3. Осевое сечение первичной обмотки

$$h=4c; D_{\min} = c\sqrt{2}; c = D_{\text{cp}} - a\sqrt{2}; c = D_{\text{cp}} - a\sqrt{2}; S_{w1} = c \cdot h.$$

Среди этих значений площади S_{w1} существует только одно значение, при котором заполнение окна выбранного сердечника обмоткой **оптимально**. Поиск этого значения площади S_{w1} приводится ниже.

Определение площади может производиться исходя из выбранного диаметра провода, известного количества витков обмотки, а также нормируемых коэффициентов заполнения окна обмотки проводом, изоляционной бумагой и т.п.

$$S_{w1p} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot w_1 k_{3M} k_{3B} k_{3П}. \quad (3.14)$$

Произведение $k_{3M} k_{3B} k_{3П}$ может быть заменено одним коэффициентом k_{30} при достаточно установившейся технологии изготовления катушек.

Среди множества значений S_{w1p} , зависящих от целого ряда параметров, может быть принято только такое значение, которое совпа-

дает по численности со значением S_{w1} , определенным по формуле (3.13), т.е. при котором обеспечивается заданное значение R_1 . Совпадение по числовому значению может иметь место только при пересечении кривых, характеризующих изменение S_{w1p} и S_{w1} в зависимости от сечения сердечника.

Расчет диаметров вторичной обмотки производится аналогично. При этом за D_{min} вторичной обмотки может быть принят D_{max} первичной обмотки. Диаметр провода вторичной обмотки d_2 принимается равным 0,05...0,07 мм. Целесообразно сразу воспользоваться формулой для площади окна вторичной обмотки, аналогичной формуле (3.14),

$$S_{w2p} = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot w_2 k_{3м} k_{3б} k_{3п}. \quad (3.15)$$

Зная S_{w2p} , можно определить толщину вторичной обмотки, задаваясь уже известной общей высотой обмоток h . На рис. 3.4 представлен эскиз расположения первичной и вторичной обмоток.

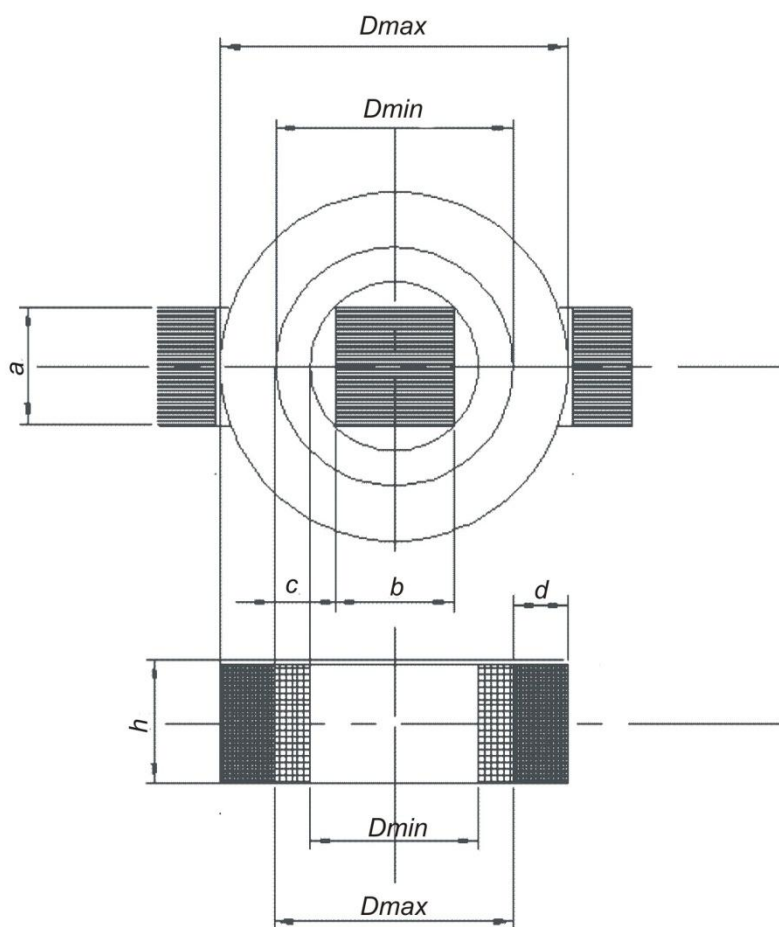


Рис. 3.4. Эскиз расположения обмоток катушки зажигания относительно сердечника

3.1.2. Пример расчета оптимальных геометрических параметров катушки зажигания по критерию минимального сечения сердечника

1. Определим $S_c w_1 = \frac{L_1 I_p}{B_c} \cdot 10^4 = \frac{0,003 \cdot 8}{1,1} \cdot 10^4 = 218,1818 \text{ см}^2$; при

заданных значениях $L_1=0,003 \text{ Гн}$ и $I_p=8,0 \text{ А}$; $B_c=1,1 \text{ Тл}$.

2. Полагая $a=b$, определим значения w_1 для значений a от 1,0 до 1,6 см по формуле

$$w_1 = \frac{L_1 I_p}{B_c} \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{a^2}. \quad (3.16)$$

3. Определим диаметр провода первичной обмотки, исходя из допустимой плотности тока $d_1 = \sqrt{(4 \cdot I_{\max}) / (\pi [\sigma]_{\text{доп}})}$; примем плотность $\sigma=8 \text{ А/мм}^2$; $I_{\max}=2,5 \text{ А}$.

4. Определим диаметр первичной обмотки с учетом изоляции

$$d_1' = d_1 + 0,05. \quad (3.17)$$

5. Определим значения среднего диаметра первичной обмотки по формуле для различных значений w_1

$$D_{\text{ср}} = \frac{R_1 \cdot d_1'^2}{4\rho \cdot w_1} \quad (3.18)$$

при $R_1=0,45 \text{ Ом}$.

6. Определим значения толщины первичной обмотки

$$c = (D_{\text{ср}} - a\sqrt{2}). \quad (3.19)$$

7. Приняв рекомендуемое отношение $h/c=4$, определим высоту первичной обмотки

$$h=4c. \quad (3.20)$$

8. Определим значения площади сечения первичной обмотки $S_{w1}=c \cdot h$, при которых обеспечивается заданная величина R_1 (0,45 Ом) при различных вариантах сечения сердечника.

9. По результатам проведенных расчетов строим зависимость $S_{w1}=f(a)$ (рис. 3.5).

С уменьшением сечения сердечника площадь окна обмотки S_{w1} уменьшается, так как при выбранном постоянном диаметре провода согласно (3.18) уменьшается средний диаметр и согласно (3.12) толщина обмотки. При толщине сердечника $a \leq 1,1 \text{ см}$ кривая $S_{w1}=f(a)$ те-

рывает физический смысл. Практически это означает, что при $a \leq 1,1$ см невозможно реализовать обмотку с заданным значением R_1 .

Зависимость площади обмотки от толщины сердечника

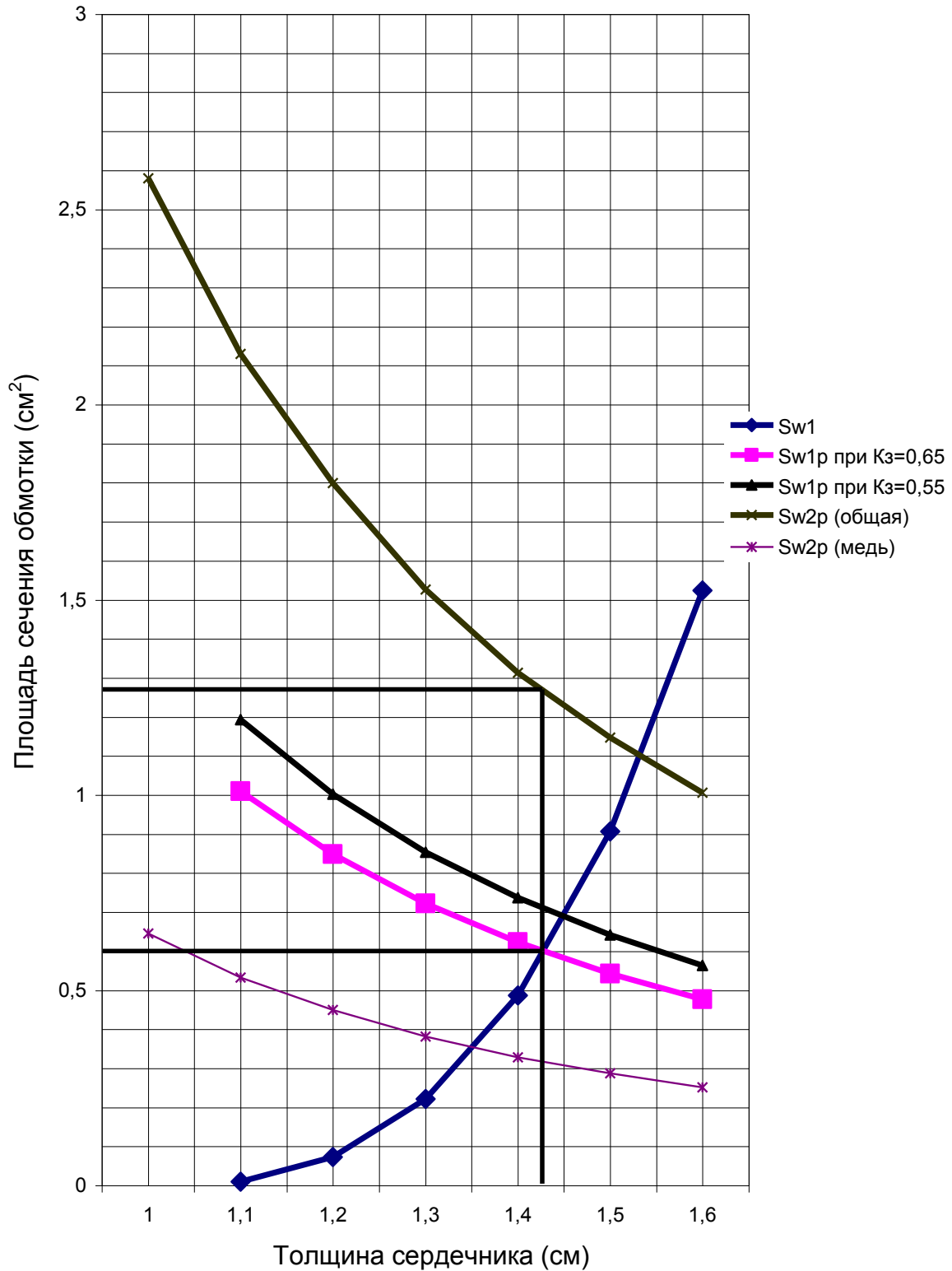


Рис. 3.5. Графические зависимости площадей сечений обмоток от толщины сердечника

10. Определим сечения обмоток для тех же вариантов сердечника, исходя из условий заполнения окна, при полученных значениях количества витков и диаметра провода обмотки

$$S_{w1p} = \frac{\pi \cdot (d_1')^2}{4} \cdot w_1 / k_3, \quad (3.21)$$

положив $k_3=0,65$; $k_3=0,55$.

11. Определим площадь вторичной обмотки, занимаемой медью, по формуле

$$S'_{w2p} = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot w_2 / k_{3м}, \quad (3.22)$$

положив $k_{3м}=0,65$, а $d_2=0,07$ мм (вместе с изоляцией). Общая площадь вторичной обмотки, включая каркас, определится по формуле $S_{w2p}=S'_{w2p} \cdot k_{3мк}$; значения $k_{3мк}$ могут находиться в пределах от 0,25 до 0,7. Большой разброс значений коэффициента $k_{3мк}$ объясняется тем, что при секционной намотке решаются вопросы электрической прочности вторичной обмотки и часть секций наматывается не полностью (рис. 3.7).

По результатам полученных данных построим диаграмму, представленную на рис. 3.5.

12. На диаграмме найдем точку пересечения кривых S_{w1p} и S_{w1} . Проекция точки пересечения на ординату обозначит значение S_{w1} , удовлетворяющее всем поставленным требованиям. Через абсциссу точки пересечения восстановим перпендикуляр до пересечения с кривой S_{w2p} . Проекция точки пересечения на ординату покажет значение общей площади вторичной обмотки с учетом секционного каркаса. На диаграмме эта величина составит $1,27 \text{ см}^2$.

13. Приняв высоту вторичной обмотки с каркасом, равной высоте первичной обмотки, определим толщину вторичной обмотки d

$$d=S_{w2p}/h.$$

14. Пользуясь данными расчета и диаграммы на рис. 3.5, построим вспомогательные диаграммы, представленные на рис. 3.6 и 3.7, и определим окончательно размеры сердечника и обмоток катушки. Результаты занесем в табл. 3.1.

Таблица 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
a (см)	b (см)	c (см)	d (см)	h (см)	S_{w1} (см^2)	S_{w2} (см^2)	d_1 (мм)	d_2 (мм)	δ (мм)	w_1
1,43	1,43	0,38	0,82	1,52	0,6	1,27	0,68	0,07		107

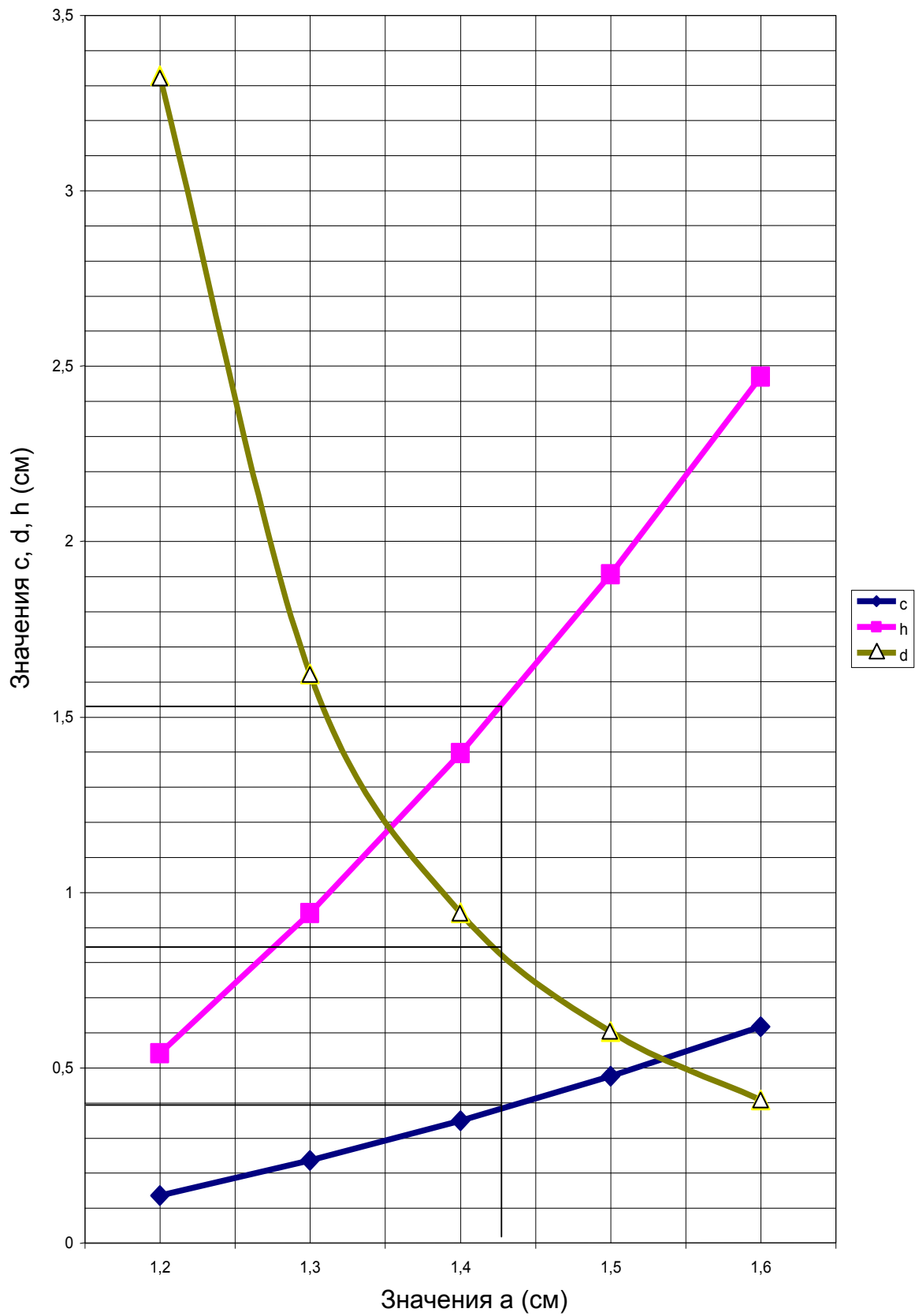
Зависимость c , d , h от a 

Рис. 3.6. Зависимость геометрических параметров катушки от толщины сердечника a

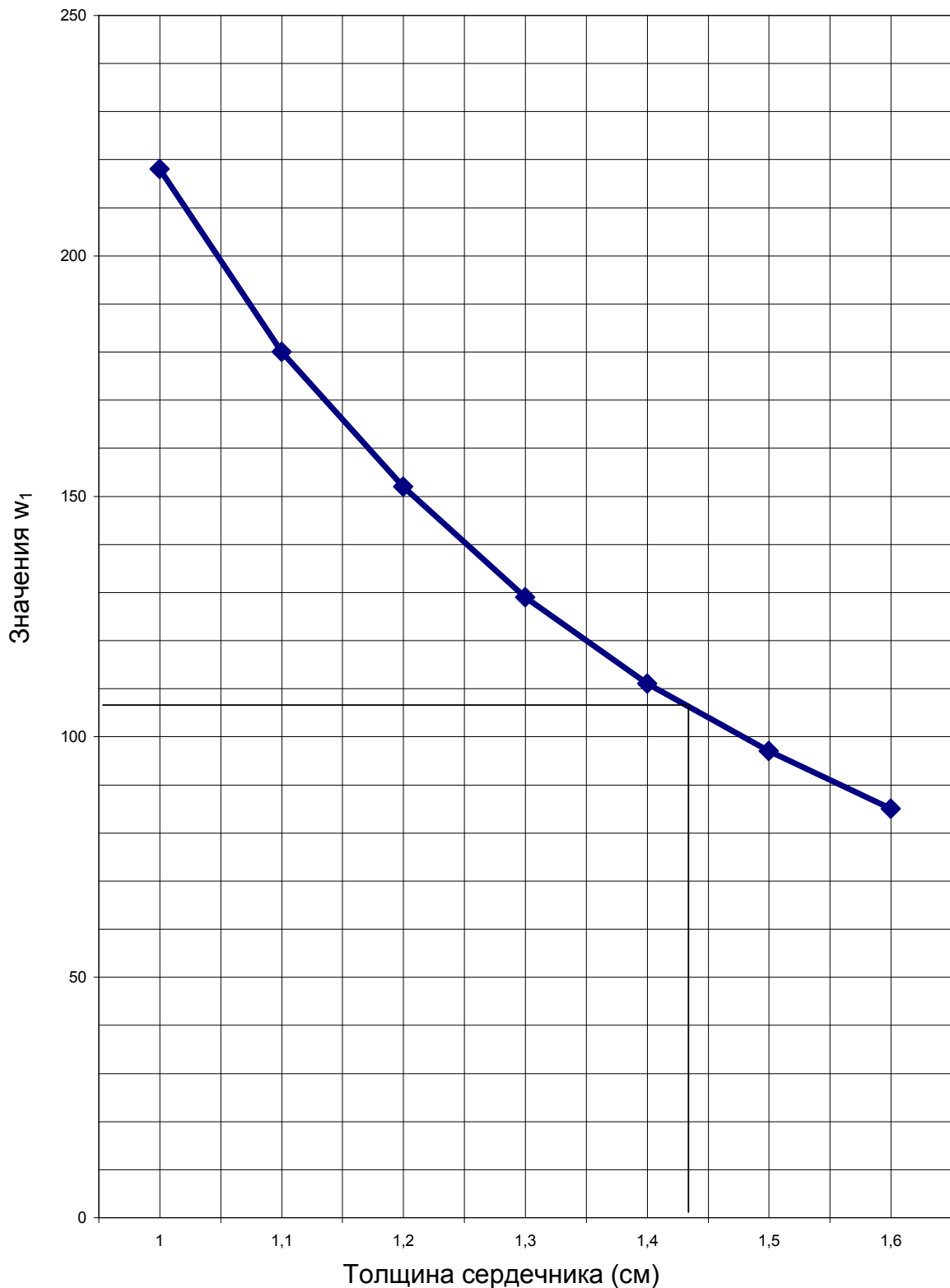
Зависимость w_1 от толщины сердечника

Рис. 3.7. Зависимость количества витков первичной обмотки w_1 от толщины сердечника a

15. В табл. 3.1 не заполнен столбец 10. Значение δ определяет величину зазора, устанавливаемого в магнитной системе катушки.

Для того чтобы осуществить эту операцию, необходимо построить общую конфигурацию магнитной системы катушки и расположение обмоток на ней по данным табл. 3.1 и определить величину средней линии магнитопровода (рис. 3.8).

16. По данным табл. 3.1 построим сборочный чертеж магнитной системы, а также первичной и вторичной обмоток катушки, см. рис. 3.8.

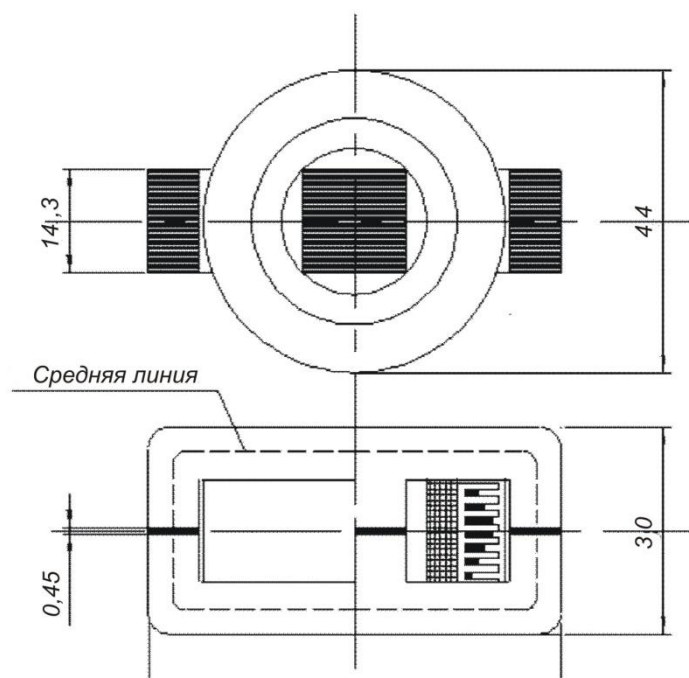


Рис. 3.8. Сборочный и габаритный чертежи катушки: сверху – вид со стороны торца обмоток; внизу - сечение обмоток и общий вид сердечника

17. Величина зазора определяется согласно чертежу на рис. 3.8 по формуле, получаемой из (3.4) в предположении, что проводимостью рассеяния пренебрегаем.

$$G_{\text{пц}} = \frac{L_1}{w_1^2} = \frac{1}{\frac{l_{\text{ср}}}{\mu S k_{\text{зс}} \cdot 10^{-4}} + \frac{\delta}{S k_{\text{в}} 0,4\pi \cdot 10^{-8}}}; \text{отсюда}$$

$$\delta = \left(\frac{1}{G_{\text{пц}}} - \frac{l_{\text{ср}}}{\mu S k_{\text{зс}} \cdot 10^{-4}} \right) S k_{\text{в}} \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8} = \left(\frac{w_1^2}{L_1} - \frac{l_{\text{ср}}}{\mu S k_{\text{зс}} \cdot 10^{-4}} \right) S k_{\text{в}} \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}. \quad (3.23)$$

Значения w_1 определяем из рис. 3.7. Значения длины средней линии $l_{\text{ср}}$ определяем по чертежу магнитопровода на рис. 3.8 для выбранного по рис. 3.5 сечения магнитопровода $S=a \cdot b$.

Коэффициент заполнения площади сталью $k_{\text{зс}}$ принимаем равным 0,95. Коэффициент выпучивания $k_{\text{в}}$ принимаем равным 1,1. μ - магнитная проницаемость стали при выбранной индукции в Тл/(А/см).

Значения μ выбираются из справочника по магнитным материалам из кривых намагничивания как отношение выбранной индукции (1,1 Тл) к напряженности магнитного поля в А/см. Для стали 1511 $\mu=1,1/6=0,18$.

По формуле (3.23) можно вычислить значение суммарного зазора $\delta=\delta_1+\delta_2=0,06$ см; соответственно значения зазора в ветвях магнитной цепи $\delta_1=\delta_2=0,03$ см или 0,3 мм. Обычно зазоры находятся в пределах 0,2 ... 1,2 мм.

18. Если на основе (3.1), (3.4), (3.5) рассмотреть полное выражение для L_1 (3.24), то можно видеть, что если учесть проводимость рассеяния, то это приведет к большим значениям индуктивности, чем при допущении $G_s=0$, которое сделано ранее. Погрешность определения индуктивности может достигать 30%.

$$L_1 = w_1^2 G = w_1^2 \left(\frac{1}{\frac{l_{cp}}{\mu S_c k_3 \cdot 10^{-4}} + \frac{\delta}{S_c k_B 0,4\pi \cdot 10^{-8}}} + G_s \right). \quad (3.24)$$

19. Расчеты проводимости рассеяния G_s достаточно громоздки и по этой причине неточны. Анализ полной формулы L_1 показывает, что параметр δ достаточно информативен и при налаженном производстве технологически воспроизводим. Упомянутая погрешность может быть легко скомпенсирована корректировкой зазоров.

Так, в данном примере требуемое значение индуктивности может быть получено при уменьшении величины расчетного зазора 0,3 мм на 0,15 мм. При этом никаких других изменений конструкции катушки не потребуется.

3.2. Определение геометрических размеров катушки зажигания с разомкнутой магнитной системой (стержневой катушки)

3.2.1. Особенности конструкции стержневой катушки (СКЗ)

Стержневые катушки зажигания получают в последнее время все большее распространение в микропроцессорных системах управления (МПСУ) бензиновыми двигателями. Стержневая конструкция катушек становится актуальной в связи с увеличением количества впускных и выпускных клапанов современных ДВС. Это обусловило конфигурацию головки цилиндров с глубоким (относительно внешней поверхности головки цилиндров) расположением зажигательной све-

чи. Одновременно развитие элементной базы современной электроники позволило легко реализовать бесконтактное распределение искр по цилиндрам двигателя при установке на каждую свечу индивидуальной катушки зажигания.

Разумеется, конструкция современной катушки зажигания, устанавливаемой непосредственно на свечу двигателя, существенно отличается от конструкции традиционной катушки зажигания для систем зажигания с высоковольтным распределением искр. Различия конструкции обусловлены следующими особенностями:

- конфигурация «колодца» в головке блока цилиндров для расположения свечи и катушки зажигания практически предопределяет стержневую (пальцевую) конфигурацию катушки. Диаметр «колодца» определяет внешний диаметр катушки с учетом ряда технологических и некоторых других соображений, о которых будет сказано ниже. Возможности конструктора изменять какие-либо выходные параметры катушки за счет ее диаметра отсутствуют;
- температурный режим стержневой катушки намного более жесткий, чем температурный режим традиционной катушки. Фактически он близок к температурному режиму изолятора свечи. Отсюда требования к термостойкости и электроизоляционной стойкости материалов катушки близки к аналогичным требованиям к изолятору свечи;
- суммарная стоимость всех индивидуальных катушек не должна существенно превышать стоимости одной обычной катушки с распределителем зажигания. При определении допустимого превышения стоимости следует учитывать также экономию от упрощения конструкции двигателя, снижения уровня радиопомех и ряд других факторов. Для снижения стоимости стержневых катушек освоен целый ряд новых технологических решений.

Реализация конструкции стержневой катушки основана, как правило, на использовании разомкнутой магнитной системы [4]. Однако существуют конструкции индивидуальных катушек, которые реализуются и на базе замкнутой магнитной системы. Термин «стержневые» к таким катушкам не совсем применим, так как наличие замкнутого магнитного сердечника искажает чисто цилиндрическую конфигурацию

катушки. Особенности конструкции и расчета параметров таких катушек рассмотрены в специальной главе.

На рис. 3.9 представлена конструкция одного из вариантов стержневой катушки зажигания фирмы «БОШ».

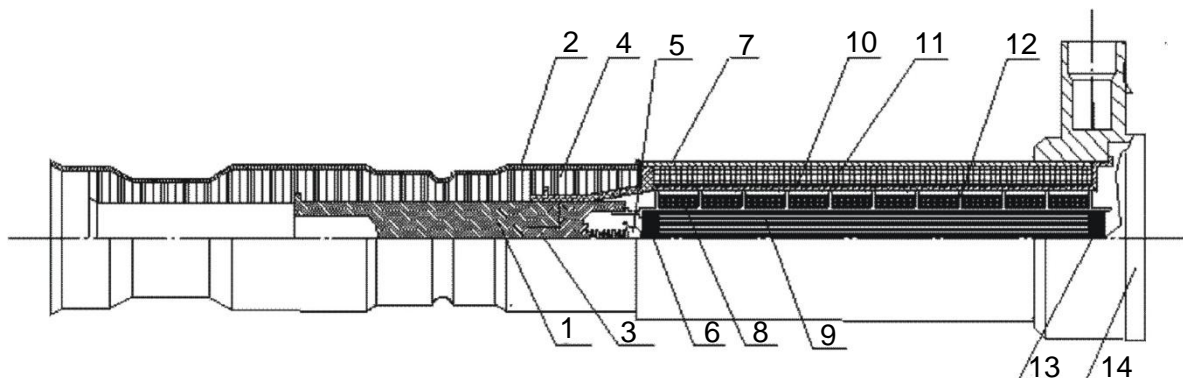


Рис. 3.9. Конструкция стержневой катушки (ф. БОШ): 1 – наконечник вывода ВН; 2 – экран металлический; 3 – соединитель вывода ВН; 4 – силиконовый уплотнитель; 5 – пружинная клемма вывода ВН; 6 – постоянный магнит; 7 – наружный магнитопровод; 8 – вторичная обмотка; 9 – внутренний сердечник обмоток, 10 – керамический каркас первичной обмотки; 11 – первичная обмотка; 12 – каркас вторичной обмотки; 13 – постоянный магнит; 14 – корпус коммутатора

В чем принципиальное различие конструкции стержневой катушки от конструкции обычной катушки зажигания с разомкнутой магнитной системой?

- Прежде всего это катушка «сухая».
- Электрическая и тепловая напряженность стержневых катушек по сравнению с аналогичными показателями маслонеполненной катушки значительно выше, так как при одинаковых (или даже более высоких) выходных энергетических параметрах по сравнению с традиционными стержневые катушки обладают существенно меньшими геометрическими размерами. Расположение катушек непосредственно в головке цилиндра двигателя обуславливает существенно более жесткий тепловой режим.
- Требование более высоких выходных энергетических параметров обеспечивается за счет оптимального рабочего режима катушки (нормирования процесса накопления энергии, стабилизации тока разрыва, исключения режима короткого замыкания и т.п.).
- В магнитной системе катушки в некоторых случаях используются постоянные магниты, позволяющие обеспечить требуемую за-

пасаемую энергию катушки при уменьшении количества витков обмоток.

- Учитывая, что необходимое количество катушек при использовании низковольтного распределения возрастает, а их стоимость не должна приводить к существенному увеличению стоимости комплекта электрооборудования, при их изготовлении используются самые совершенные технологические процессы, обеспечивающие высокую производительность при минимальной трудоемкости, экономном расходовании материалов и высоком качестве изделий.

3.2.2. Основные расчетные формулы и принимаемые допущения

Магнитная система стержневой катушки зажигания представлена на рис. 3.10.

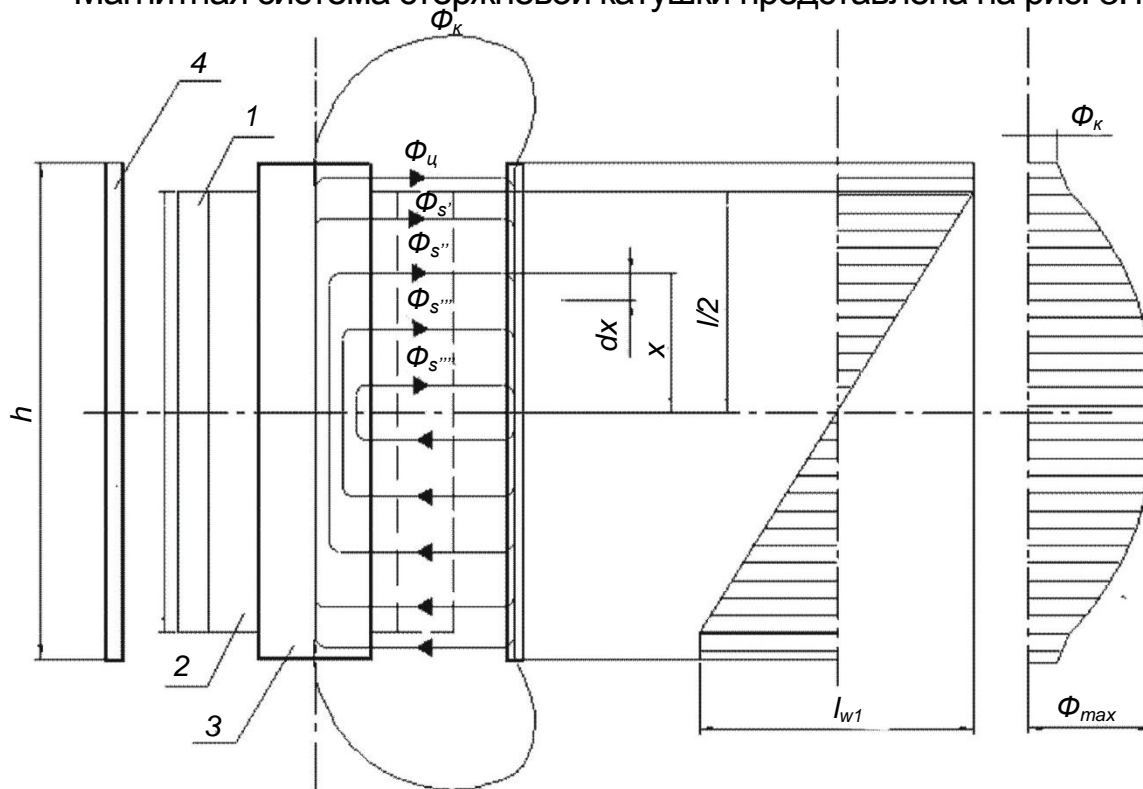


Рис. 3.10. Магнитная система стержневой катушки зажигания: 1 - первичная обмотка катушки; 2 - вторичная обмотка; 3 - внутренний магнитопровод; 4 - наружный магнитопровод; l - длина первичной обмотки; R_1 - радиус внутреннего магнитопровода; R_2 - радиус наружного магнитопровода

Вводятся следующие допущения:

- полагаем, что максимум потока в сердечнике находится в сечении напротив середины первичной обмотки, поскольку сердечник с обоих концов разомкнут;

- падение магнитного напряжения в сердечнике принимаем равным нулю, так как основное сопротивление для магнитного потока составляет воздух;
- полагаем, что все линии магнитного потока проходят через сердечник;
- полагаем, что оба магнитопровода (наружный и внутренний) являются *ненасыщенными*.

Имеются три участка поля (три проводимости):

- между коаксиальными цилиндрами *на длине первичной обмотки* (поток Φ_s и приведенная проводимость G'_{w1});
- между коаксиальными цилиндрами *вне зоны первичной обмотки* (поток $\Phi_{\text{ц}}$ и проводимость $G_{\text{ц}}$);
- между верхним концом сердечника и внешним магнитопроводом (Φ_k и проводимости $G_{\text{кв}}$ и $G_{\text{кн}}$). Так как при симметричной магнитной системе $G_{\text{кв}}=G_{\text{кн}}$, то можно говорить об общей проводимости $G_k=G_{\text{кв}}/2=G_{\text{кн}}/2$.

Потоки $\Phi_{\text{ц}}$ и Φ_k охватывают все витки первичной обмотки; каждая силовая линия потока Φ_s охватывает только часть витков первичной обмотки, поэтому при рассмотрении проводимости для потока Φ_s следует говорить о приведенной проводимости G'_{w1} .

Схема замещения для магнитных проводимостей всей катушки представлена на рис. 3.11.

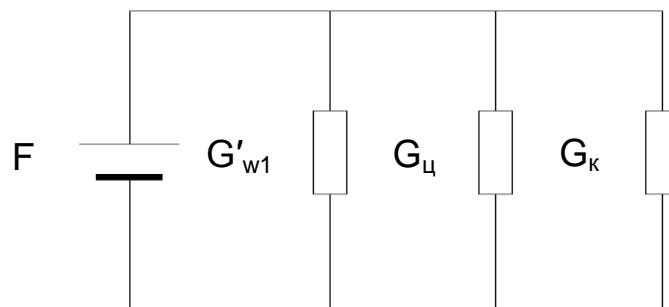


Рис. 3.11. Схема замещения проводимостей СКЗ

F - МДС, создаваемая первичной обмоткой катушки; $F=I_p w_1$; G'_{w1} - приведенная проводимость между коаксиальными цилиндрами на длине первичной обмотки; $G_{\text{ц}}$ - проводимость между коаксиальными цилиндрами вне длины первичной обмотки; G_k - торцевая проводимость катушки; $G_k = (G'_k \cdot G''_k) / (G'_k + G''_k)$, где G'_k и G''_k - проводимости по обоим торцам магнитной системы.

Результирующая проводимость магнитной цепи катушки

$$G = G'_w + G_{\text{ц}} + G_{\text{к}}. \quad (3.25)$$

Проводимость G'_w находим через потокосцепление Ψ_{w1} , соответствующее этой проводимости

$$\Psi_{w1} = L_{w1} \cdot i_1 = w_1^2 \cdot G'_w \cdot i_1, \quad (3.26)$$

где L_{w1} - индуктивность, соответствующая потокосцеплению Ψ_{w1} .

На расстоянии x от середины катушки на элементе dx намагничивающая сила F_x , элементарный поток $d\Phi_x$ и элементарное потокосцепление $d\Psi_w$ соответственно равны:

$$F_x = i_1 w_1 \frac{x}{l}; \quad (3.27)$$

$$d\Phi_s = i_1 w_1 \frac{x}{l} g dx = i_1 w_1 \frac{x}{l} \cdot \frac{2\pi}{\ln(R_2/R_1)} \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8} dx; \quad (3.28)$$

$$d\Psi_w = d\Phi_s \cdot w_1 \frac{x}{l} = i_1 \left(\frac{w_1}{l}\right)^2 x^2 \cdot \frac{2\pi \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot dx, \quad (3.29)$$

где $g = [2\pi \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}] / [\ln(R_2/R_1)]$ - магнитная проводимость между коаксиальными цилиндрами радиусами R_2 и R_1 на единицу длины в (Вб/А)/см (удельная проводимость, справочная величина); l - длина первичной обмотки; w_1 - число витков первичной обмотки.

Интегрируем выражение (3.29) и получаем

$$\Psi_w = 2 \int_0^{l/2} i_1 \left(\frac{w_1}{l}\right)^2 g x^2 dx = i_1 w_1^2 \frac{2\pi \cdot l \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}}{12 \ln \frac{R_2}{R_1}} = i w_1^2 G'_w. \quad (3.30)$$

Сравнивая выражения (3.30) и (3.26), видим, что

$$G'_w = \frac{2\pi \cdot l \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}}{12 \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{G_{\text{ц}}}{12}, \text{ где } G_{\text{ц}} = g \cdot l = \frac{2\pi \cdot l \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} -$$

проводимость между двумя коаксиальными цилиндрами на длине первичной обмотки в Вб/А.

Проводимость между коаксиальными цилиндрами вне зоны первичной обмотки $G_{\text{ц}}$ на длине $l_0 = (h-l)/2$ определится выражением

$$G_{\text{ц}} = \frac{2\pi \cdot l_0 \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (3.31)$$

где h - длина сердечника; l - длина обмотки ($h > l$).

Поток, проходящий между коаксиальными цилиндрами вне зоны первичной обмотки, охватывает все витки обмотки

$$\Phi_{\text{ц}} = iwG_{\text{ц}}; \Psi_{\text{ц}} = \Phi_{\text{ц}} w_1 = iw_1^2 G_{\text{ц}}. \quad (3.32)$$

Поток рассеяния, проходящий через торцевые части магнитной системы, также охватывает все витки обмотки

$$\Phi_{\text{к}} = iw_1 G_{\text{к}}; \Psi_{\text{к}} = iw_1^2 G_{\text{к}}. \quad (3.33)$$

Индуктивность катушки L_1 может быть определена выражением

$$L_1 = \frac{\Psi}{i_1} = w_1^2 G = w_1^2 (G'_{w1} + G_{\text{ц}} + G_{\text{к}}). \quad (3.34)$$

В (3.34) неизвестна величина $G_{\text{к}}$. Определение $G_{\text{к}}$ может производиться графоаналитическим методом построения поля [4], подробное рассмотрение которого в рамках настоящего пособия не предусматривается. Геометрические параметры обмоток катушки зажигания не влияют на величину $G_{\text{к}}$. Проводимость зависит только от геометрических параметров сердечника, наружного магнитопровода и магнитного сопротивления воздуха торцевой части магнитного поля катушки. Метод весьма громоздок, однако на практике обычно поступают следующим образом.

Из формулы (3.34) значение проводимости $G_{\text{к}}$ при вычисленных значениях G'_{w1} и $G_{\text{ц}}$ определяют при опытном измерении индуктивности L_1 на эталонном образце

$$G_{\text{к}} = \frac{L_1}{w_1^2} - G'_{w1} - G_{\text{ц}}. \quad (3.35)$$

Эталонный образец выполняют в единичном экземпляре с установленным количеством витков w_1 . Определенное таким образом значение $G_{\text{к}}$ может затем использоваться при всех вариациях параметров обмоток катушки при использовании **единого диаметра** выбранной магнитной системы и постоянном соотношении диаметров наружного и внутреннего магнитопроводов, так как торцевые проводимости будут при этом неизменны.

Магнитная цепь стержневой катушки зажигания с магнитом приведена на рис. 3.12.

В этом случае величина потоков, охватывающих обмотку СКЗ, увеличивается, так как увеличивается значение намагничивающей силы F , которая в данном случае определится выражением

$$F = i \cdot w + H \cdot l_m, \quad (3.36)$$

где H и l_m - параметры магнита (напряженность поля в рабочей точке и осевая длина магнита).

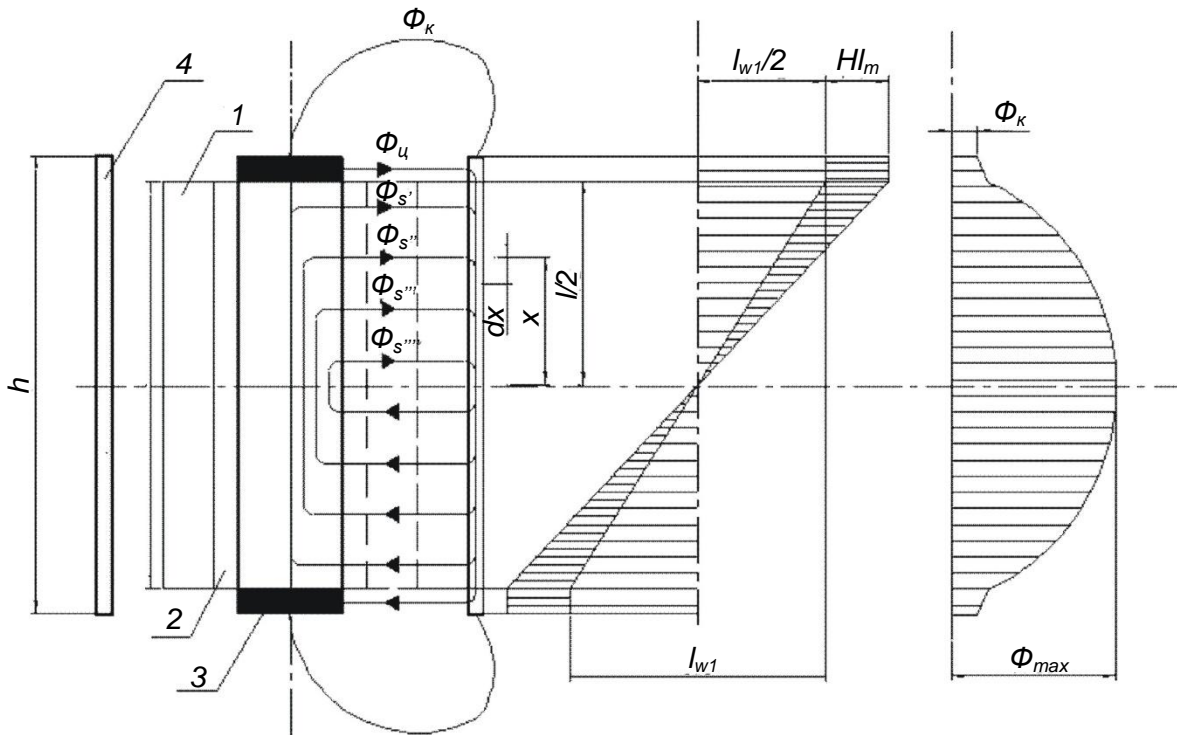


Рис. 3.12. Магнитная система стержневой катушки с постоянным магнитом: 1 - первичная обмотка катушки; 2 - вторичная обмотка; 3 - внутренний магнитопровод; 4 - наружный магнитопровод; l - длина первичной обмотки; R_1 - радиус внутреннего магнитопровода; R_2 - радиус наружного магнитопровода

Схема замещения проводимостей СКЗ для этого случая представлена на рис. 3.13.

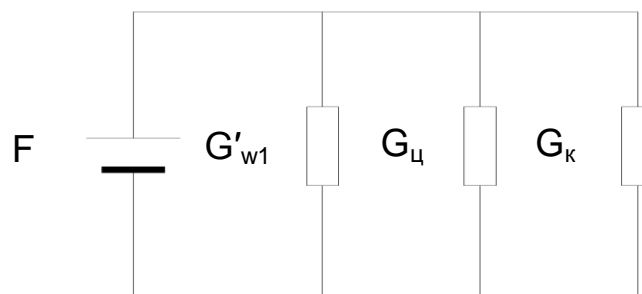


Рис. 3.13. Схема замещения магнитной цепи СКЗ с постоянным магнитом: $F = iw_1 + Hl_m$; G'_{w1} - приведенная проводимость на длине первичной обмотки; $G_{ц}$ - проводимость между коаксиальными поверхностями магнитопровода вне первичной обмотки; $G_{κ}$ - торцевая проводимость

Уравнения (3.27)-(3.29) приобретут следующий вид:

$$F_x = F \frac{x}{l} = (iw_1 + Hl_m) \frac{x}{l} \quad (3.37)$$

$$d\Phi_s = F_0 \frac{x}{l} g dx = (iw_1 + Hl_m) \frac{x}{l} g dx \quad (3.38)$$

$$d\Psi_w = d\Phi_s w_1 \frac{x}{l} = iw_1 \frac{x}{l} w_1 \frac{x}{l} g dx + Hl_m \frac{x}{l} w_1 \frac{x}{l} g dx = i\left(\frac{w_1}{l}\right)^2 g x^2 dx + Hl_m w_1 \left(\frac{1}{l}\right)^2 g x^2 dx. \quad (3.39)$$

Проинтегрируем (3.39) относительно центра симметрии на интервале половины длины первичной обмотки

$$\Psi_w = 2 \int_0^{l/2} i\left(\frac{w_1}{l}\right)^2 g x^2 dx + \int_0^{l/2} Hl_m w_1 \left(\frac{1}{l}\right)^2 g x^2 dx.$$

Производя интегрирование и подставляя пределы интегрирования, получим

$$\Psi_w = 2\left[i\left(\frac{w_1}{l}\right)^2 g \frac{l^3}{3 \cdot 8} + \frac{Hl_m w_1 g}{l^3} \frac{l^3}{3 \cdot 8}\right] = \frac{iw_1^2 G_{\text{ц}} + Hl_m w_1 G_{\text{ц}}}{12} = iw_1^2 \cdot \frac{G_{\text{ц}}}{12} \left(1 + \frac{Hl_m}{iw_1}\right). \quad (3.40)$$

Полагая $\frac{G_{\text{ц}}}{12} = G'_w$, а $\frac{Hl_m}{iw_1} = \frac{F_m}{F_{w1}} = Q$, получим

$$\Psi_{w1} = iw_1^2 G'_w (1 + Q). \quad (3.41)$$

Сравнивая выражения (3.26), (3.30) и (3.41), приходим к выводу, что выражение (3.41) является общим для определения потокосцепления первичной обмотки стержневой катушки как при наличии, так и при отсутствии магнитов. При отсутствии магнитов $F_m=0$ выражения (3.30) и (3.41) совпадают. Коэффициент Q показывает степень увеличения потокосцепления при применении постоянных магнитов.

Выражения для потоков и потокосцеплений при наличии постоянных магнитов для торцевых частей катушки и цилиндрической части вне зоны расположения обмоток представлены ниже:

$$\Phi_{\text{ц}} = iw_1 G_{\text{ц}} + Hl_m G_{\text{ц}}; \quad \Psi_{\text{ц}} = (iw_1 + Hl_m) w_1 G_{\text{ц}} = iw_1^2 (1 + Q) G_{\text{ц}} \quad (3.42)$$

$$\Phi_{\text{к}} = iw_1 G_{\text{к}} + Hl_m G_{\text{к}}; \quad \Psi_{\text{к}} = (iw_1 + Hl_m) w_1 G_{\text{к}} = iw_1^2 (1 + Q) G_{\text{к}}. \quad (3.43)$$

Индуктивность обмотки может быть представлена в виде

$$L_1 = \frac{\Psi_w + \Psi_{\text{ц}} + \Psi_{\text{к}}}{i} = w_1^2 (G_{\text{ц}} + G_{\text{к}} + G'_w) (1 + Q) = (L_1)_{\text{бм}} (1 + Q). \quad (3.44)$$

В формуле (3.44) можно определить расчетным путем значения $G_{\text{ц}}$ по формуле

$$G_{\text{ц}} = \frac{2\pi \cdot l_0 \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (3.45)$$

и G'_w по формуле

$$G'_w = \frac{2\pi \cdot l \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}}{12 \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{G_c}{12} \text{ (см. выше).} \quad (3.46)$$

После изготовления макетного образца заданного диаметра и измерения индуктивности можно определить торцевые проводимости G_k , которые будут неизменными при различных длинах обмоток катушки и при наличии или отсутствии постоянных магнитов. Поскольку единственно возможным переменным параметром катушки теперь будет являться длина обмоток l , зависящая от количества витков, то можно построить зависимости $L_1=f(l)$. Отложив на ординате L_1 требуемое значение L_1 , на оси абсцисс получим искомое значение длины обмотки l или соответствующее ей количество витков.

3.2.3. Пример расчета геометрических параметров катушки, обеспечивающей минимальную длину обмоток при фиксированном диаметре катушки

1. Исходные данные для расчета. В качестве эталонного образца использовался образец серийно производимой катушки зажигания фирмы «БОШ» 0-221-504-473.

Расчетная схема катушки представлена на рис. 3.14.

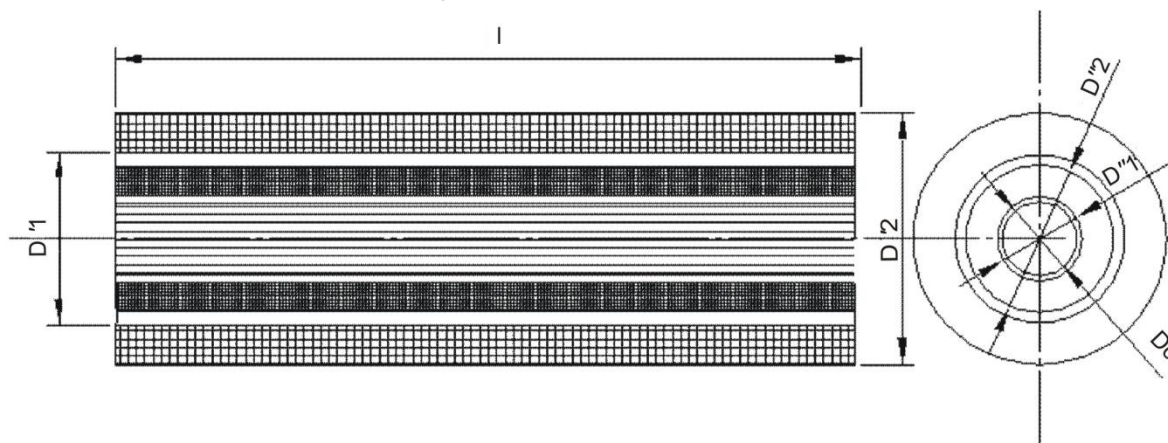


Рис. 3.14. Расчетная схема стержневой катушки: $D'1$, $D'2$ – внутренний и наружный диаметры первичной обмотки катушки; $D''1$, $D''2$ – внутренний и наружный диаметры вторичной обмотки; l – длина обмоток

2. Измерения действующего образца катушки дали следующие значения параметров:

- $L_1=0,006$ Гн.
- $R_1=0,5$ Ом.
- $I_p=7,2$ А.

3. Измерения геометрических параметров на осевом сечении катушки дали следующие результаты:

- число витков первичной обмотки $w_1=200$;
- длина (высота) первичной обмотки $h=7,1$ см;
- диаметр первичной обмотки – наружный $D'2=1,8$ см= $0,018$ м;
- диаметр первичной обмотки – внутренний $D'1=1,5$ см= $0,015$ м;
- толщина первичной обмотки $s=0,15$ см;
- средний диаметр обмотки $1,65$ см;
- радиус наружного магнитопровода $R_2\approx 1,2$ см;
- радиус внутреннего магнитопровода $R_1=0,35$ см;
- площадь сечения (осевого) первичной обмотки $S=2\cdot(0,15\cdot 7,1)=2,13$ см².

4. Устанавливаем значения торцевой проводимости G_k из формулы (3.44), полагая, что при выбранной конфигурации $G_c=0$, т.е.

$$G_k = \frac{L_1}{w_1^2 \Theta} - (G_c + G'_w) = \frac{L_1}{w_1^2 \Theta} - G'_w, \quad (3.47)$$

где G'_w определяем по формуле (3.46); а согласно (3.44)

$$\Theta = 1 + Q = 1 + \frac{F_m}{F_w} = 1 + \frac{Hl_m}{iw}. \quad (3.48)$$

Поскольку мы не знаем параметров используемых магнитов, зададим предварительно значения коэффициента Θ в пределах от 1,0 до 2,0 с интервалом 0,2. Для предварительной оценки возможных значений Θ можно рассмотреть кривые размагничивания магнитов, применяемых на фирме «БОШ» (рис. 3.15). Если принять к сведению рекомендации Купфмюллера [7], рассматривающего постоянный магнит как источник постоянной магнитодвижущей силы (МДС), равной произведению длины магнита l_m на коэрцитивную силу H_c , или рассчитать для цилиндрического магнита с размерами нашего эталона оптимальное соотношение B_m/H_m согласно [3], то для магнитов типа AlNiCo (1, 2, 4) (см. рис. 3.15) значения коэффициента Θ будут находиться в пределах 1,4...1,6. Большие значения Θ можно получить при использовании магнитов с применением редкоземельных элементов (самария, кобальта и др.).

При принятых выше параметрах эталонного образца значения торцевой проводимости, рассчитанные по формуле (3.47), будут представлены на графике (рис. 3.16).

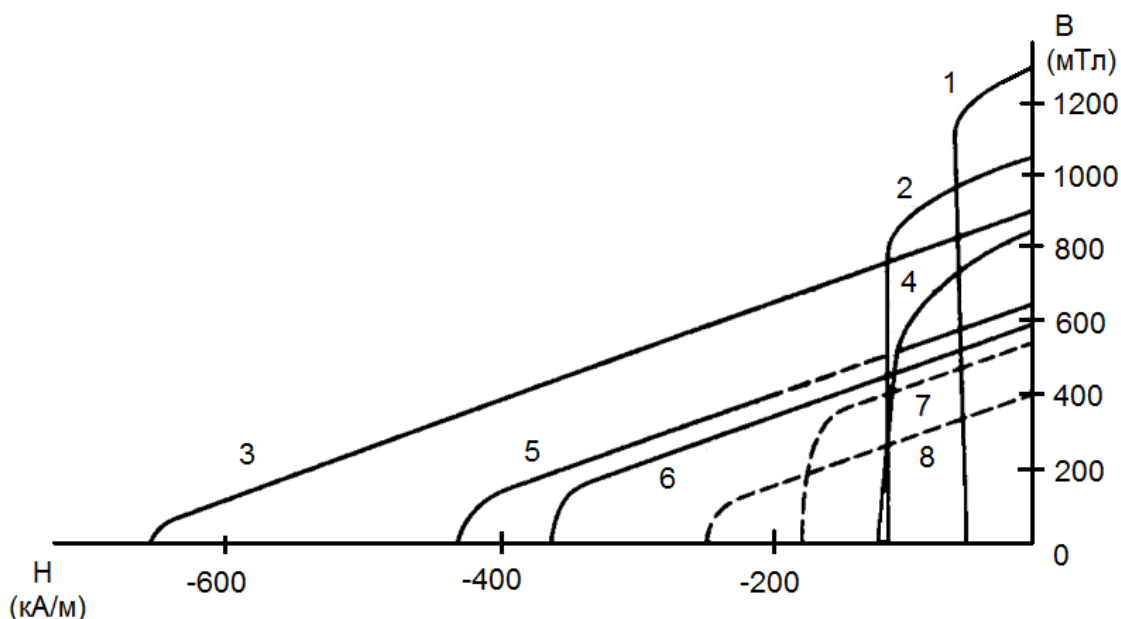


Рис. 3.15. Кривые размагничивания для различных типов магнитных материалов (по данным фирмы «БОШ»): 1 - AlNiCo 52/6; 2 - AlNiCo 60/11; 3 - SECo 112/100; 4 - ALNiCo 30/10; 5 – SECo 70/70p; 6 – PICO 60/40; 7 - MnAl 50/50; 8 – Hard ferrite 25/25

Для того чтобы определить параметры используемых магнитов, необходимо расчетным путем для исследуемого образца вычислить значение торцевой проводимости, используя классический метод [4]. При использовании метода картина поля моделировалась при следующих условиях:

- $R_1=0,35$ см; $R_2=1,2$ см;
- $n=6$ - число частей, на которое разделяется разность потенциалов между коаксиальными цилиндрами радиусами R_2 и R_1 ;
- $c = n \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = 1,2286$;
- $r_1=R_1c$; $r_2=R_1c^2$; $r_3=R_1c^3$ и т.д. – радиусы эквипотенциальных поверхностей внутри коаксиальных цилиндров;
- условие построения поля в нецилиндрической (торцевой) части магнитного поля $\frac{rb}{l_3} = \frac{a}{2} \cdot \frac{c+1}{c-1} = 0,4875$; где параметрами каждого звена нецилиндрической части поля являются l_3 - длина средней линии звена; b - образующая усеченного конуса; r - расстояние от средней линии звена до оси симметрии катушки;
- $a=0,1$ см расстояния между линиями магнитного потока в цилиндрической части поля катушки;

- $G'_k = \frac{m}{n} \cdot \frac{c+1}{c-1} \pi a \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-8}$ - значение торцевой проводимости на одной стороне катушки; полное выражение для торцевой проводимости в соответствии со схемой замещения на рис. 3.13: $G_k = (G'_k \cdot G''_k) / (G'_k + G''_k)$; где G'_k, G''_k - проводимости на обоих торцах катушки при полной симметрии торцов: $G_k = G'_k / 2$;
- $m=3$ – число силовых трубок, которые удается построить при выбранных параметрах разделения поля.*

*Примечание: подробное описание построения картины поля и установления по ней величины торцевой проводимости эталонного образца не приводится. Ниже дан только результат определения проводимости G_k .

При выбранных величинах сердечников и параметрах разделения величина торцевой проводимости эталонного образца составит $G_k=4,80656E-08=4,80656 \cdot 10^{-8}$.

Обращаясь к рис. 3.16, определяем величину коэффициента Θ , соответствующую торцевой проводимости эталонного образца, проводя на уровне $4,80656 \cdot 10^{-8}$ горизонталь до пересечения с кривой $G_k=f(\Theta)$. Проекция точки пересечения на ось абсцисс даст искомое значение Θ , характеризующее параметры постоянного магнита ($\Theta=1,67$).

5. Определяем значение диаметра провода первичной обмотки по формуле

$$d_1 = \sqrt{\frac{4I_{\text{эфф}}}{\pi[\sigma]}} = 0,68 \text{ мм}, \quad (3.49)$$

где $[\sigma]$ - рекомендуемая плотность тока 8 А/мм^2 (0,68), а значение $I_{\text{эфф}}$ выбираем таким, чтобы диаметр провода \approx соответствовал диаметру провода эталонного образца $d'_1 = d_1 + 0,04 = 0,68 + 0,04 = 0,72 \text{ мм}$ (с учетом толщины изоляции).

6. Определяем из известной формулы (3.6) значение среднего диаметра обмотки, при котором обеспечивается заданное значение сопротивления R_{w1}

$$D_{\text{cp}} = \frac{d_1^2 R_{w1}}{4\rho w_1}; \quad (3.50)$$

построим зависимость $D_{\text{cp}}=f(w_1)$ (рис. 3.19).

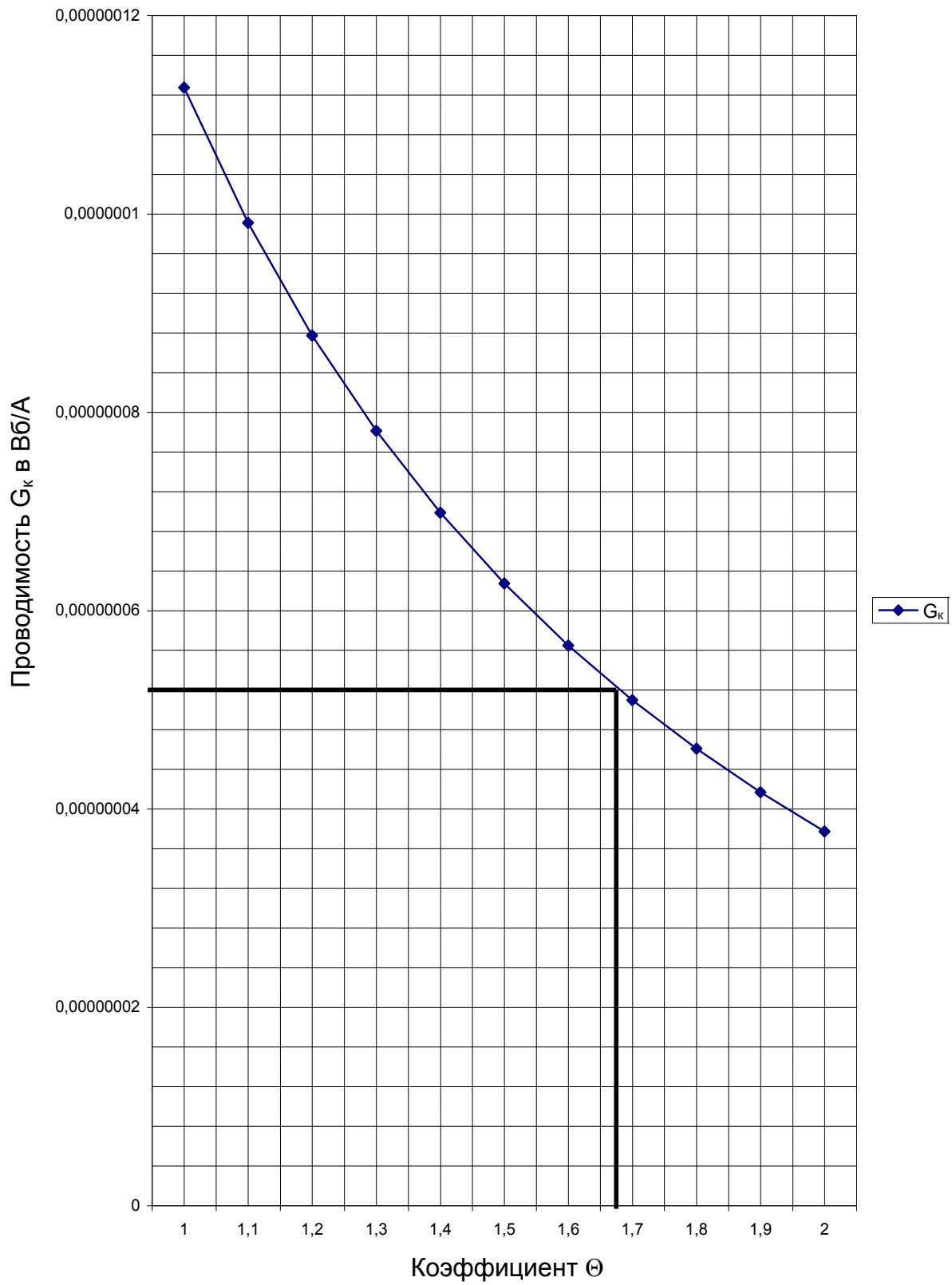
Зависимость G_k 

Рис. 3.16. Зависимость расчетных значений торцевой проводимости эталонного образца G_k от коэффициента θ . Ось абсцисс - значения коэффициента θ ; ось ординат - значения проводимости G_k

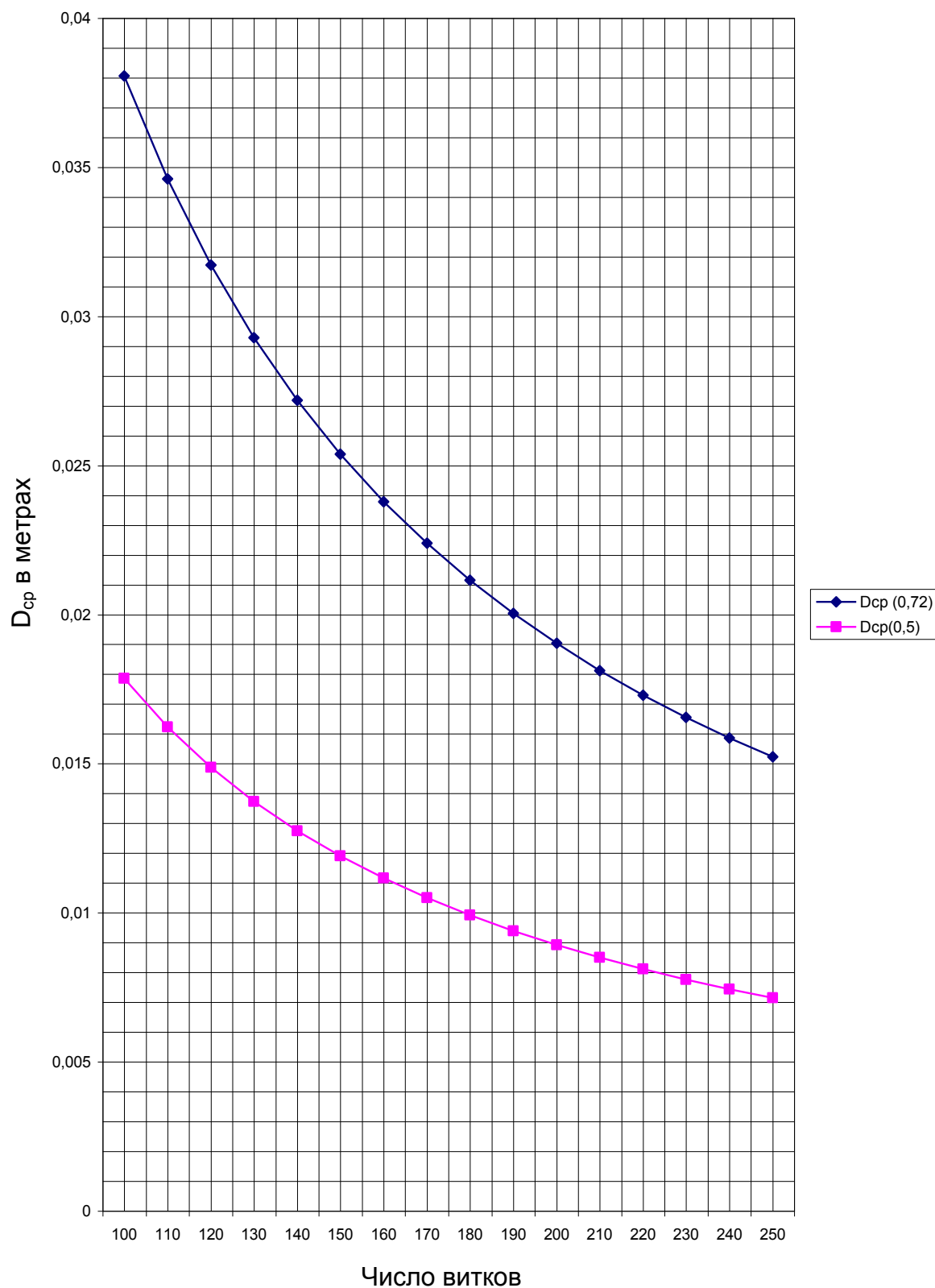
D_{ср} ОТ ЧИСЛА ВИТКОВ

Рис. 3.17. Зависимость среднего диаметра обмотки, при котором обеспечивается требуемое сопротивление обмотки, от числа витков (для различных диаметров провода обмотки): $D_{ср}(0,72)$, $D_{ср}(0,5)$ – средние диаметры обмотки при толщине провода 0,72 и 0,50 мм соответственно

Как следует из (3.50), величина среднего диаметра зависит от количества витков обмотки. Чем больше число витков, тем меньше средний диаметр, при котором обеспечивается заданное значение R_{w1} . Величина среднего диаметра зависит также от диаметра провода первичной обмотки (рис. 3.17).

7. Значение среднего диаметра обмотки зависит также от распределения заданного количества витков по длине обмотки l_1

$$S_{w1p} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot w_1 k_{3m} k_{3б} k_{3п} = l_1 c = l_1 (D_{cp} - D_{min}) = \frac{\pi d_1^2}{4} w_1 k_o. \quad (3.51)$$

Правая часть уравнения представляет собой площадь сечения первичной обмотки в зависимости от числа витков, выполненных проводом заданного диаметра по п. 5. Поэтому, задаваясь величиной D_{min} и данными рис. 3.17, можно для каждого значения выбранных витков определить соответствующую длину обмотки l_1 . Примем значения шага изменения D_{min} равными 0,1 см. Из (3.51) определим соответствующие им длины обмоток l_1 . Результаты представлены на рис. 3.18.

Из (3.51) следует также, что $c = (D_{max} - D_{min})/2$. Следовательно, при постоянном наружном диаметре обмотки $D_{max} = const$ и $D_{min} = varia$ изменяется также толщина сечения обмотки c .

Зависимость l_1 от w_1 при $D_{min} = varia$

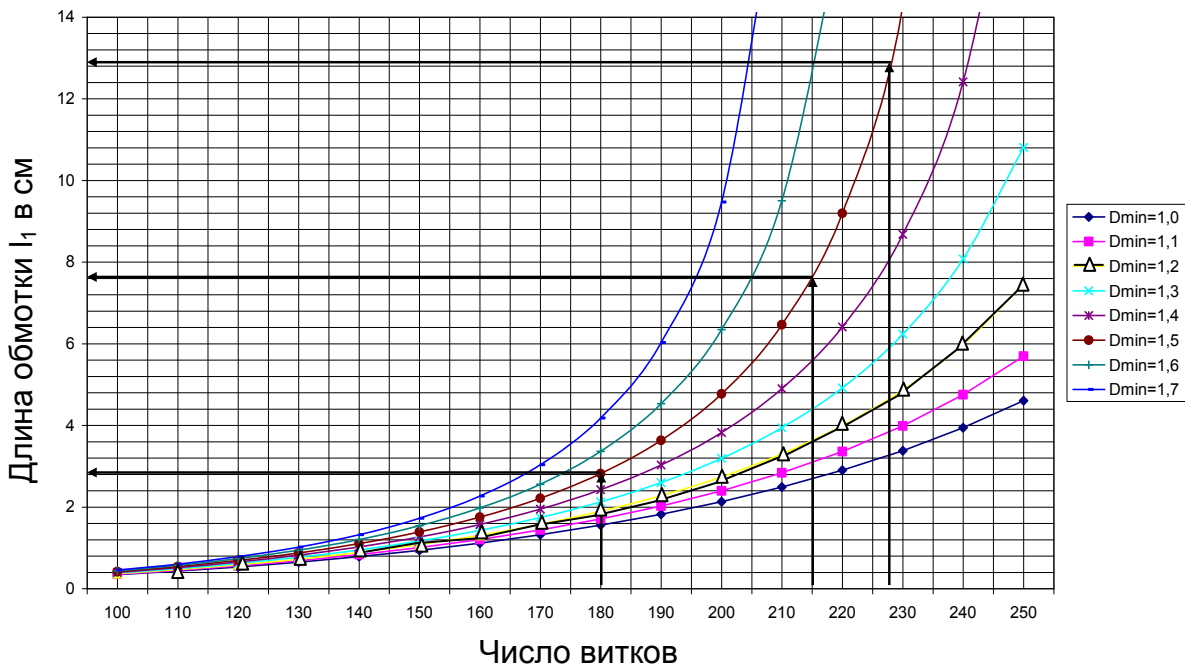


Рис. 3.18. Зависимость длины обмотки катушки от числа витков при различной величине минимального диаметра обмотки D_{min} . Диапазон изменения D_{min} от 1,0 до 1,7 см

8. Необходимое количество витков, обеспечивающих требуемую индуктивность обмотки, следует определять по графику, представленному на рис. 3.20 и построенному на основе формулы (3.44). Следует обратить внимание на то, что при построении кривых на рис. 3.19 значение коэффициента Θ принималось равным 1, что означает отсутствие в системе магнитов. Если провести на графике горизонталь на уровне 0,006 Гн, то проекция точки пересечения на ось абсцисс кривой, соответствующей $D_{\min}=0,15$ см (как у прототипа), определит значение количества витков, необходимых для получения индуктивности 0,006 Гн (как у эталонного образца - прототипа).

Как видно из графиков, требуемое значение индуктивности обеспечивается при количестве витков, существенно превышающем количество витков прототипа (200).

Если на графике рис. 3.18 восстановить перпендикуляр в точке на оси абсцисс, соответствующей точке на рис. 3.19, то точка пересечения перпендикуляра с соответствующей кривой при её проекции на ось ординат определит значение длины обмотки. Длина обмотки при $D_{\min}=1,5$ см, равном D_{\min} прототипа, существенно больше, чем длина обмотки прототипа (13 см вместо 7,1 см).

Зависимость L_1 от w_1 при $D_{\min}=\text{varia}$

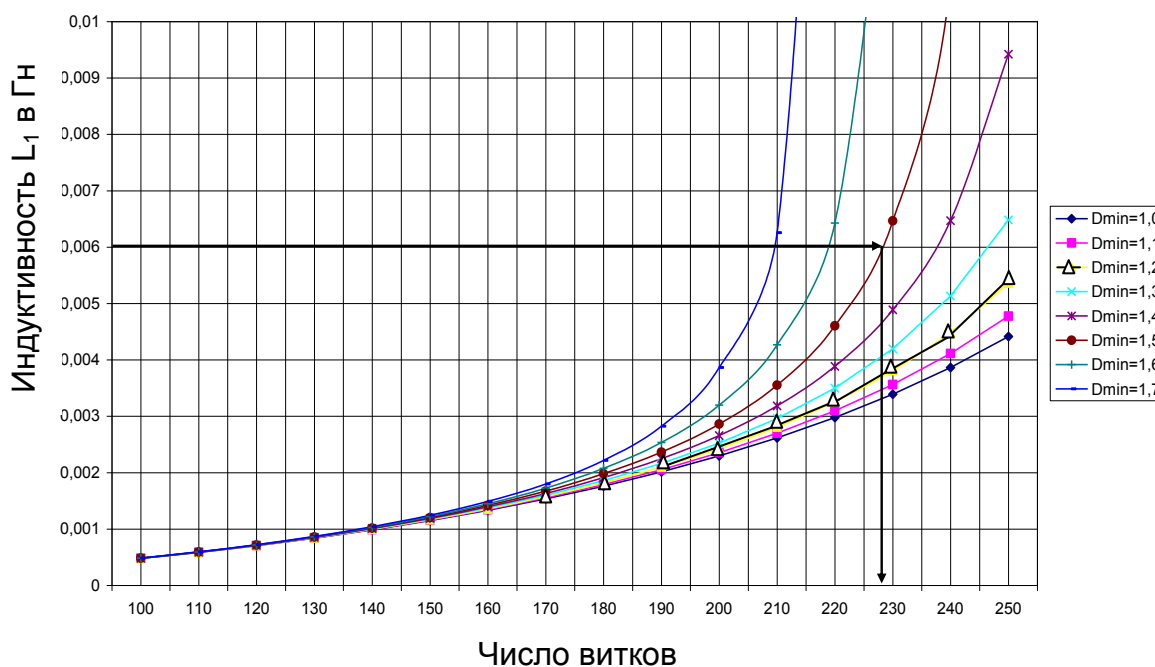


Рис. 3.19. Зависимость индуктивности от числа витков при различных минимальных диаметрах обмоток. Рассматривается случай отсутствия постоянных магнитов ($\Theta=1$)

Для того чтобы получить представление о влиянии на величину индуктивности катушки постоянных магнитов, рассмотрим только ситуацию с величиной D_{\min} первичной обмотки 0,15 см, аналогичной D_{\min} обмотки прототипа. Зависимости $L_1=f(w_1)$ рассчитываются по формуле (3.44). Результаты представлены на рис. 3.20.

Зависимость L_1 от w_1 при различных магнитах

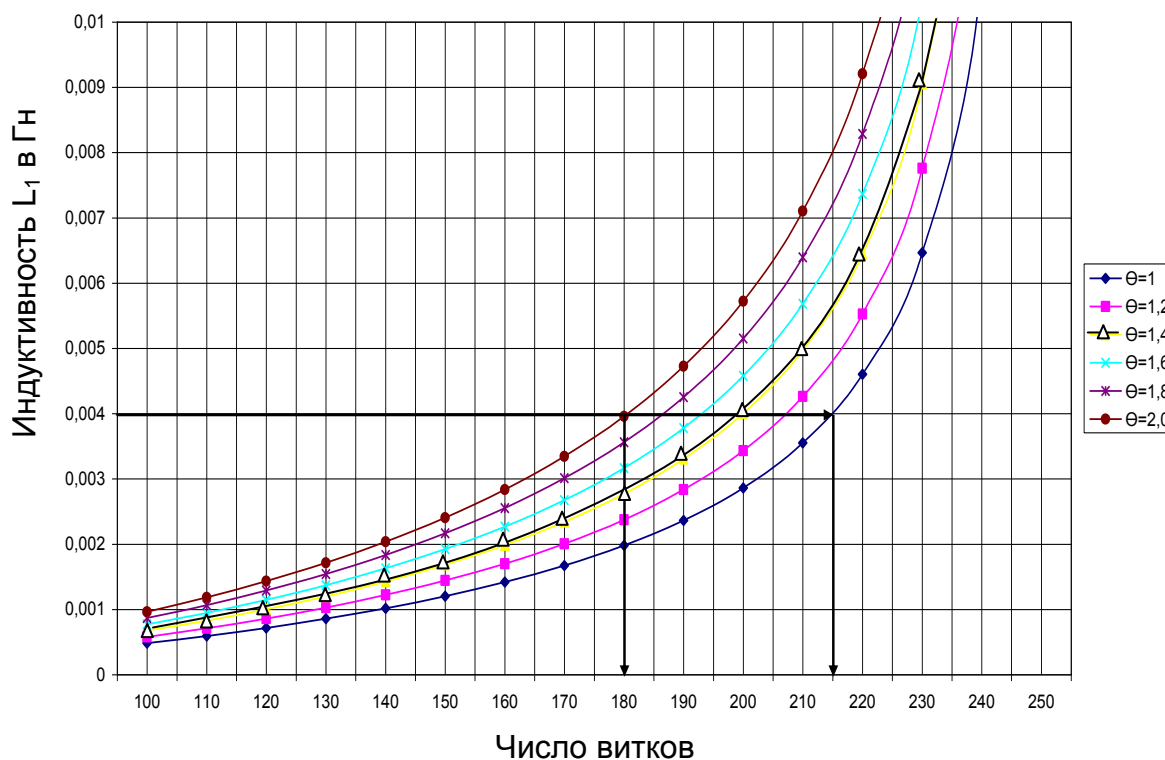


Рис. 3.20. Зависимость индуктивности L_1 от количества витков обмотки. Зависимости представлены для различных параметров постоянных магнитов (значений коэффициента θ)

Как видно из рис. 3.20, применение постоянных магнитов позволяет существенно сократить количество витков обмотки и, следовательно, ее габариты. Например, при требуемой индуктивности 4 мГн, при использовании магнитов с величиной коэффициента $\theta=2$ можно уменьшить количество витков с 215 до 180. Рассмотрев зависимости на рис. 3.18, можно увидеть, что при требуемой величине индуктивности, равной 4 мГн, длина обмоток при одинаковом диаметре может быть уменьшена с 7,5 до 3 см. Подобные зависимости могут быть получены и для других значений толщины первичной обмотки (диаметра катушки), что может оказаться полезным, когда при проектировании потребуется изменить соотношение и абсолютные значения радиусов R_2 и R_1 магнитной системы.

9. Интересно определить на зависимостях рис. 3.18 и 3.20 значения параметров прототипа, приняв, например, за опорный параметр индуктивность $L_1=0,006$ Гн и количество витков $w_1=200$.

Для повышения точности и удобства расчетов кривые, аналогичные кривым по рис. 3.18 и 3.20, но при меньшем количестве изменяемых параметров представим на рис. 3.21 и 3.22.

Зависимость l_1 от w_1 при $D_{\min}=1,5$

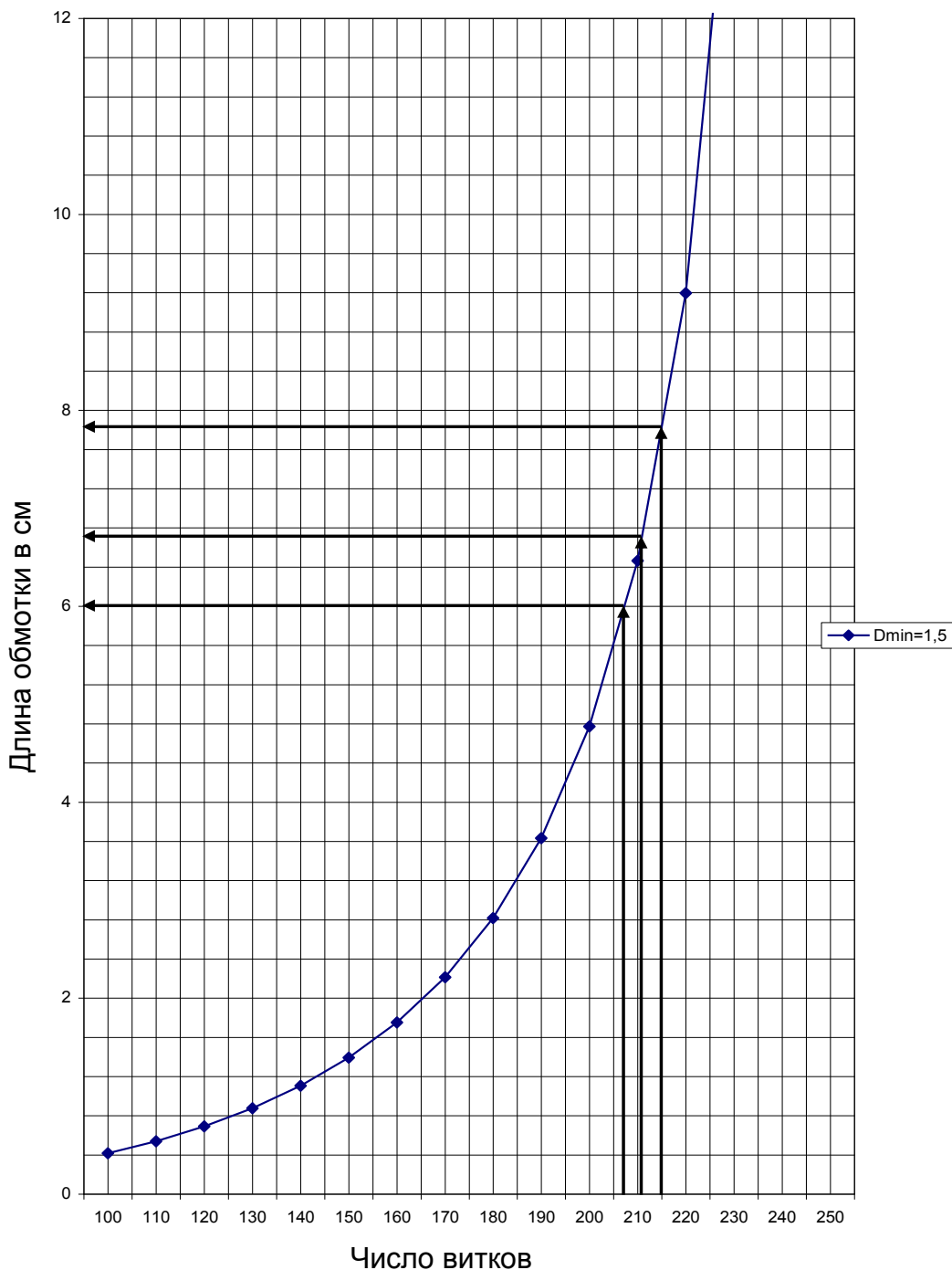


Рис. 3.21. Зависимость длины обмотки от количества витков при $D_{\min}=1,5$ см

Показано изменение длины намотки при различных параметрах магнитов (значений коэффициента Θ). На оси абсцисс установлены значения витков, соответствующих величине индуктивности эталона при различных значениях Θ по рис. 3.22.

Зависимость L_1 от w_1 при различных магнитах

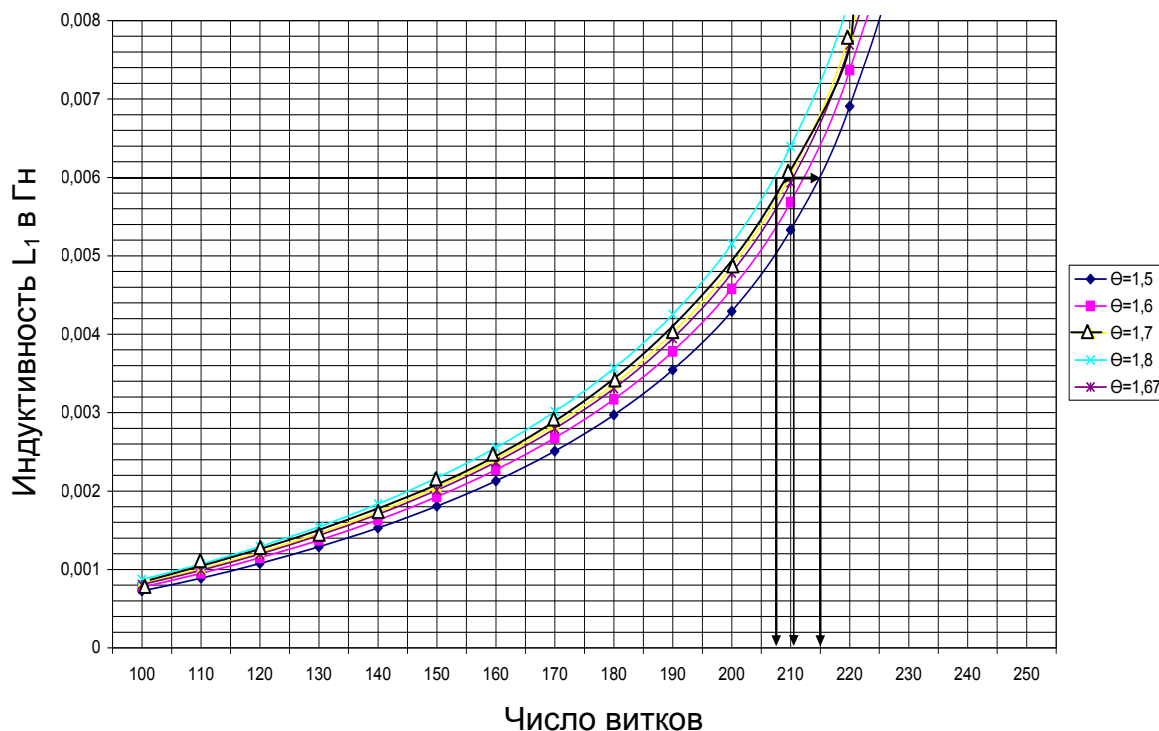


Рис. 3.22. Зависимость индуктивности L_1 обмотки от параметров (коэффициентов Θ) магнитов при фиксированном диаметре обмоток

Проведя на рис. 3.22 горизонталь на уровне 0,006 Гн, можно видеть, что пересечение горизонтали с кривыми $L_1=f(w_1)$, построенными в диапазоне значений $\Theta=1,5\dots1,8$, определяет на оси абсцисс диапазон возможных значений витков от 207 до 215. В этом же диапазоне витков следует рассматривать и изменение длин обмоток на рис. 3.21 (от 6 до 7,8). Подробнее данные расчетов и их сопоставление с параметрами эталонного образца представлены в табл. 3.2.

Как видно из табл. 3.2, оптимальным вариантом (по минимуму погрешностей) является вариант с магнитами, устанавливающими значения коэффициента $\Theta=1,67$. Эти значения Θ были установлены авторами ранее при определении торцевой проводимости и практически совпадают.

Полученные расчетные параметры катушки с минимальным диаметром первичной обмотки $D_{\min}=1,5$ см весьма близки к параметрам

рам эталонного образца. Погрешности определения количества витков и длины обмоток катушки не превышают 5...6%.

Таблица 3.2

Значения Θ	w_1	Отклонен., % от эталон. значений	Индуктивность L_1 , мГн	$\Theta = 1 + \frac{Hl_m}{I_p w_1}$	Длина обмотки, см	Отклонен., % от эталон. значений	Примечание
$\Theta=1,5$	215	+ 7,5	6,0	1,5	7,8	+10,0	
$\Theta=1,67$	211	+5,5	6,0	1,67	6,7	-5,6	Оптимальн.
$\Theta=1,8$	207	+3,5	6,0	1,8	6,0	-15,5	
Эталонный образец	200	0,0	6,0	1,67	7,1	0,0	

Основная причина погрешностей - использование для определения торцевой проводимости G_k громоздкого классического метода, к которому были вынуждены прибегнуть авторы, используя в качестве эталонного образца готовую конструкцию. Настоящая методика как раз и предусматривает отказ от классического метода при определении G_k . Простая конструкция эталонного образца, содержащего только сердечник и наружный магнитопровод заданного диаметра и произвольной длины, и низковольтная катушка (дроссель), помещенная между внутренним и наружным цилиндрическим магнитопроводами, – это все, что требуется перед началом проектирования стержневой катушки. Требования к материалу магнитопроводов – исключение насыщенного состояния при проведении экспериментов, связанных с определением индуктивности дросселя. Сказанное относится не только к процедуре определения торцевой проводимости. Освещение вопроса о выборе материалов сердечников для реальной катушки выходит за рамки настоящего пособия.

10. Параметры вторичной обмотки устанавливаются после окончательного определения параметров первичной обмотки. При этом могут быть использованы формулы, рассмотренные в подглаве 3.1, см. формулу (3.22). При проектировании вторичной обмотки следует учитывать следующее:

- диаметр обмоточного провода d_2 выбирается не по допустимой плотности тока, как для первичной обмотки, а по технологическим соображениям (настройке намоточного оборудования, стоимости провода, прочности электрической изоляции и т.п.). Наибольшее распространение получили медные провода с величиной $d_2=0,04\dots 0,07$ мм;
- длина вторичной обмотки $l_2 \approx l_1$, т.е. примерно равна длине первичной обмотки, без каких-либо осевых относительных смещений;
- вторичная обмотка, как правило, выполняется на многосекционном каркасе. Это обстоятельство при расчете геометрических параметров вторичной обмотки учитывается выбором соответствующего коэффициента заполнения. Значения коэффициентов заполнения определяются опытным путем после ряда технологических опробований, либо на основе данных прототипа;
- число витков вторичной обмотки w_2 определяется по формуле $w_2=w_1 \cdot k_{тр}$, где $k_{тр}$ - коэффициент трансформации, определяемый при электрическом расчете системы зажигания.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы исходные электротехнические уравнения для расчета замкнутой магнитной цепи катушки зажигания?
2. Опишите схему замещения замкнутой магнитной цепи катушки, расчетную схему и ее параметры, общую проводимость магнитной цепи.
3. Каковы формула площади сечения первичной обмотки S_{w1p} при заданном количестве витков, сечении провода и коэффициенте заполнения; зависимость S_{w1p} от сечения сердечника; физический смысл нахождения оптимальной точки этой зависимости?
4. Опишите расчетную схему магнитной системы стержневой катушки без постоянных магнитов и принимаемые допущения; схему замещения магнитной цепи катушки.
5. Каковы расчетная схема магнитной системы стержневой катушки при наличии постоянных магнитов и схема замещения магнитной цепи катушки?
6. Опишите формулы для потокосцепления и проводимостей магнитной цепи катушки с постоянными магнитами и формулу для индуктивности первичной обмотки стержневой катушки зажигания с постоянными магнитами.

4. ДАТЧИКИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВС

4.1. Датчики положения и скорости ДВС

Датчики положения и скорости вращения коленчатого вала поршневого ДВС являются основой для создания любой системы управления рабочим процессом двигателя, поскольку получаемая от них информация является исходной для начала процесса управления, а в дальнейшем будет необходима для синхронизации этого процесса.

В настоящее время наибольшее распространение получили два типа датчиков: магнитоэлектрические датчики и датчики на эффекте Холла.

4.1.1. Магнитоэлектрические датчики (МЭД)

Конструкция распространенного МЭД представлена на рис. 4.1.

Магнитоэлектрический датчик основан на известном явлении электромагнитной индукции, заключающемся в том, что при изменении магнитного потока в контуре, сцепленном с этим потоком, возникает э.д.с. самоиндукции e . Величина e не зависит от способа, которым осуществляется изменение магнитного потока Φ , а определяется лишь скоростью изменения Φ , т.е. $d\Phi/dt$.

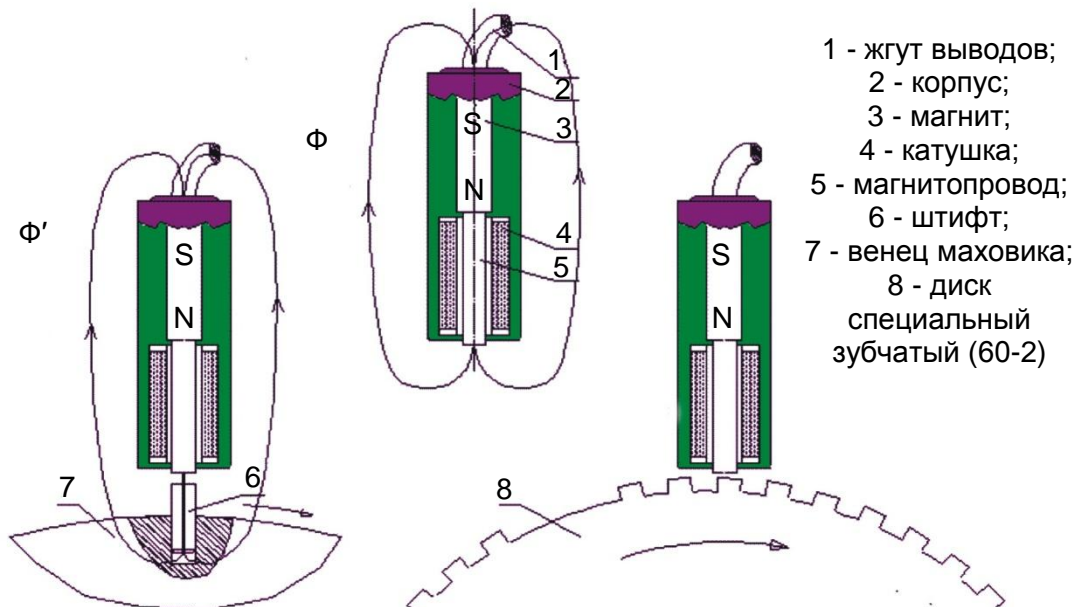


Рис. 4.1. Датчик магнитоэлектрический (МЭД) для МПСЗ: слева - МЭД в качестве датчика положения; в центре - основные элементы МЭД; справа - МЭД в качестве датчика положения и скорости; Φ' - максимальное значение потока в сердечнике; Φ - значение потока при отсутствии внешнего магнитопровода, $\Phi' > \Phi$

Как видно из рис. 4.1, изменение магнитного потока в сердечнике катушки датчика связано с изменением проводимости внешней воздушной магнитной цепи датчика за счет введения в неё участков с более высокой, чем у воздуха, проводимостью.

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt} = -wS_c \frac{dB_c}{dt}, \quad (4.1)$$

$$\text{где } \frac{dB_c}{dt} \cong \frac{\Delta B_c}{\Delta t} = \frac{B_m k_{\max} - B_m k_{\min}}{\Delta t} = \frac{B_m K}{T_{\text{и}}},$$

где $k_{\max} = B_{c\max}/B_m$ - коэффициент, характеризующий падение индукции в сердечнике для случая совпадения положения оси сердечника с осью зубца зубчатого диска; $k_{\min} = B_{c\min}/B_m$ - коэффициент, характеризующий падение индукции в сердечнике для случая предельного несовпадения упомянутых осей, при котором значение ΔB_c достигает максимального значения; w - число витков обмотки датчика; $K = (k_{\max} - k_{\min})$ - обобщенный конструктивный коэффициент, характеризующий влияние геометрических размеров и конфигурации магнитной системы, образованной магнитом, магнитопроводом и зубчатым диском из магнитомягкого материала; $T_{\text{и}} = 1/f_{\text{и}}$ - период следования импульсов датчика; $f_{\text{и}} = n \cdot i / 60$ - частота следования импульсов; n - частота вращения зубчатого диска, об/мин; i - число зубцов диска.

С учетом сделанных пояснений выражение (4.1) примет вид

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt} = -wS_c \frac{dB_c}{dt} \cong -wS_c B_m K \cdot \frac{n \cdot i}{60}. \quad (4.2)$$

Как видно из (4.2), э.д.с, создаваемая датчиком, зависит от количества витков обмотки w , площади сечения цилиндрического магнитопровода S_c , \approx равного сечению цилиндрического магнита; индукции B_m , пропорциональной остаточной индукции магнита B_r ; скорости зубчатого диска n при постоянном числе зубцов диска i .

Варианты применения МЭД представлены на рис. 4.1. В качестве зубчатого диска могут также использоваться зубцы маховика двигателя. При этом на цилиндрической образующей маховика может быть установлен штифт, положение которого фиксирует ВМТ первого цилиндра.

Главное преимущество МЭД – простота и надежность конструкции. Основной недостаток датчика очевиден из формулы (4.2). Это зависимость э.д.с от частоты вращения двигателя и связанного с ним зубчатого диска.

4.1.2. Датчики на эффекте Холла

На рис. 4.2 представлен датчик положения и скорости для микропроцессорной системы управления двигателем, основанный на использовании эффекта Холла. Как и ранее изучавшийся микропереключатель на эффекте Холла, предназначенный для использования в БСЗ высокой энергии автомобилей ВАЗ, датчик положения и скорости построен на основе той же микросхемы чувствительного элемента Холла, разработанного фирмой Хонейвел (США).

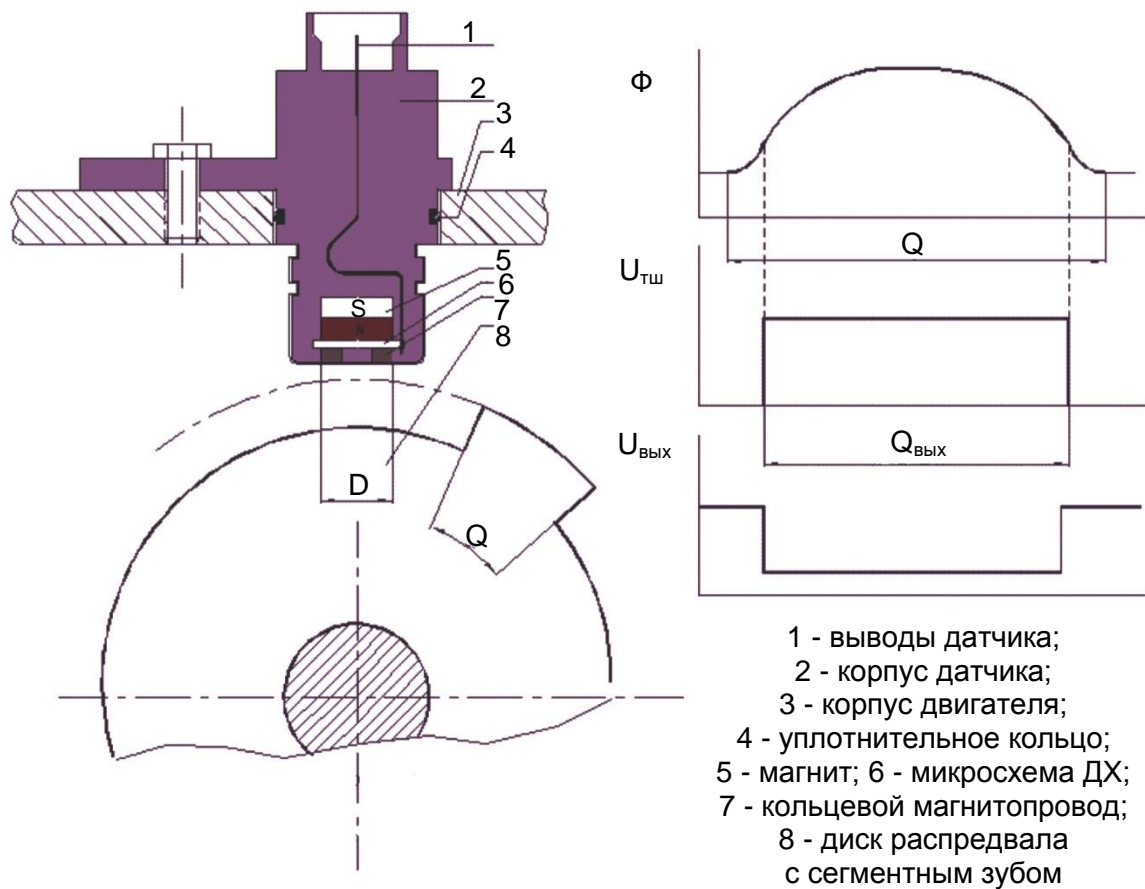


Рис. 4.2. Датчик на эффекте Холла для микропроцессорных систем зажигания и впрыска топлива: слева - конструктивное исполнение датчика совместно со специальным диском с сегментным зубом; справа - диаграммы потока; выходного напряжения триггера Шмитта; напряжения на коллекторе выходного транзистора датчика

Однако магнитная система датчика имеет существенные отличия. Микросхема с чувствительным элементом Холла располагается в зазоре между цилиндрическим магнитом и кольцевым цилиндрическим магнитопроводом. Кольцевая форма магнитопровода обеспечивает более благоприятную форму изменения магнитного потока по углу поворота сегментного зуба диска.

4.2. Датчики нагрузки двигателя

Нагрузка двигателя является вторым важнейшим параметром ДВС (наряду с частотой вращения), требующим учета при оптимизации рабочего процесса двигателя. При изменении нагрузки требуется корректировка угла опережения зажигания, а также корректировка количества подаваемого топлива, а в некоторых случаях и момента его впрыска. Теоретически в каждый момент времени можно измерить момент сопротивления (нагрузку), прикладываемый к колесам автомобиля, а через систему передач - к коленчатому валу двигателя. Однако на практике оказывается значительно проще измерять косвенные параметры двигателя, пропорциональные этой нагрузке. К числу этих параметров относятся:

- положение дроссельной заслонки впускного тракта двигателя (угол ее отклонения относительно положения на холостом ходе);
- положение педали управления дроссельной заслонкой, обеспечивающее движение автомобиля с требуемой скоростью при заданной нагрузке;
- расход воздуха или топливной смеси, пропорциональный углу открытия дроссельной заслонки и, следовательно, нагрузке двигателя;
- давление (разрежение) во впускном тракте двигателя, которое является функцией расхода воздуха во впускном трубопроводе и, следовательно, функцией нагрузки.

В соответствии с изложенным для целей управления рабочим процессом ДВС в зависимости от нагрузки используются датчики **положения дроссельной заслонки**, датчики **положения педали акселератора**, датчики **расхода воздуха**, датчики **давления (разрежения)** во впускной магистрали двигателя.

4.2.1. Принцип работы датчика положения дроссельной заслонки можно уяснить из рассмотрения рис. 4.3 - 4.5.

На рис. 4.4. приведена электрическая принципиальная схема датчика.

Основой датчика является механический потенциометр. Это резистор с тремя выводами. Средний вывод потенциометра (ползунок) может перемещаться по поверхности резистора. При этом общее сопротивление резистора r изменением положения среднего вывода де-

лится в соотношении $r_1/r_2=l_1/l_2$ (где $l=l_1+l_2$ - общая длина резистора; l_1, l_2 - длины активных частей резистора; r_1, r_2 - значения сопротивлений, соответствующих этим длинам). Потенциометры могут быть линейными либо круговыми. В последнем случае изменение положения средней точки может быть достигнуто вращением оси потенциометра, которая в датчике положения дроссельной заслонки жестко связана с осью дроссельной заслонки.

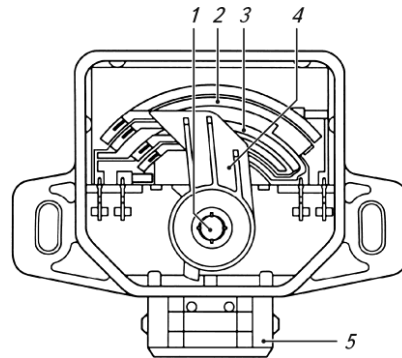


Рис. 4.3. Датчик положения дроссельной заслонки: 1 – ось дроссельной заслонки; 2, 3 – резисторные дорожки; 4 – рычаг с ползунком; 5 – штекер соединительный

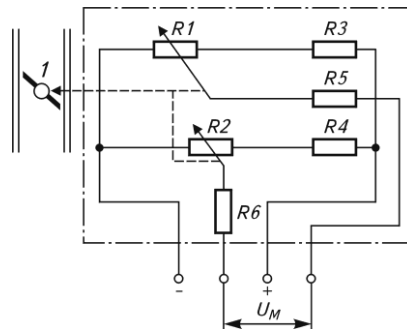


Рис. 4.4. Схема датчика дроссельной заслонки: U_M – выходное напряжение датчика; R_1, R_2 – потенциометры резистивных дорожек; R_3, R_4 – подстроечные резисторы; R_5, R_6 – ограничительные резисторы выходного тока; «+» и «-» - полярность подсоединения выводов источника питания с напряжением U_{Γ}

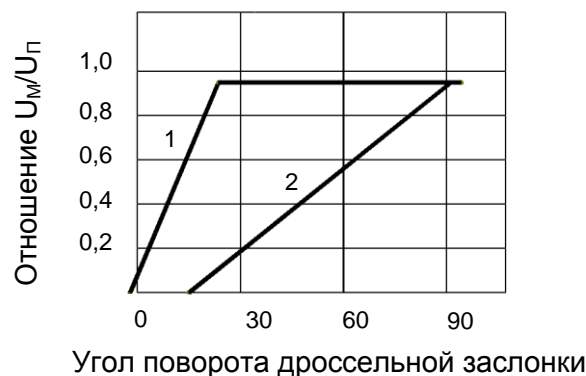


Рис. 4.5. Зависимость отношения U_M/U_{Γ} от угла поворота дроссельной заслонки для каждой резистивной дорожки 1 и 2

Использование датчика дроссельной заслонки в качестве основного датчика нагрузки предъявляет повышенные требования к его точности, что достигается за счет установки двух потенциометров. Обработка сигналов датчика на дифференциальном входе контроллера позволяет рассчитывать не только положение, но и скорость перемещения дроссельной заслонки.

Необходимость двух линий потенциометра (сопротивления R_1 и R_2) объясняется требованием высокой надежности, а также необходимостью обеспечения точности показаний датчика при крайних положениях дроссельной заслонки.

4.2.2. Аналогичный по принципу действия потенциометрический датчик используется для индикации положения педали газа.

Однако для повышения надежности системы управления дроссельной заслонкой в последнее время все большее распространение получают бесконтактные датчики с использованием эффекта Холла, не содержащие трущихся элементов.

4.2.3. Датчики массового расхода воздуха

Датчиками массового расхода воздуха называют нитевые или пленочные ***термоанемометрические*** датчики. Они устанавливаются во впускной магистрали между воздушным фильтром и дроссельной заслонкой и измеряют массу воздуха, поступающего в двигатель (кг/ч). Принцип действия обоих датчиков одинаков. В потоке поступающего воздуха находится электрически нагреваемое тело, которое охлаждается воздушным потоком.

Схема регулирования тока нагрева рассчитана таким образом, что всегда поддерживается положительная разность температуры измерительного тела относительно проходящего воздуха. Чем выше скорость воздушного потока, тем больше масса проходящего воздуха и тем интенсивнее охлаждается измерительный элемент. Для поддержания заданной разности температур необходимо увеличивать ток подогрева измерительного элемента при увеличении скорости потока. В данном случае величина тока нагрева является мерой массы воздушного потока. При таком методе измерения производится также учет плотности воздуха, так как она также определяет величину теп-

лоотдачи обтекаемого потоком тела. Отсутствие в датчике подвижных частей делает его более надежным по сравнению с чашечным или лопастным анемометром.

4.2.3.1. Нитевой датчик массового расхода воздуха (рис. 4.7)

У данного датчика нагреваемым элементом является платиновая нить толщиной 70 мкм. Для учета изменения температуры поступающего воздуха в плечо моста R_1+R_K вводится компенсационный терморезистор R_K . Нагреваемая нить R_H и терморезистор R_K размещены в потоке поступающего воздуха Q_M . Остальные компоненты схемы размещены вне впускной магистрали. Ток нагрева нити R_H образует на прецизионном резисторе R_K падение напряжения U_M , пропорциональное массе проходящего воздуха.

С целью предупреждения дрейфа за счет отложения загрязнений на платиновой нити после отключения двигателя осуществляется ее принудительный нагрев («прожиг») в течение нескольких секунд до температуры, ведущей к испарению или осыпанию отложений и тем самым к ее очистке.

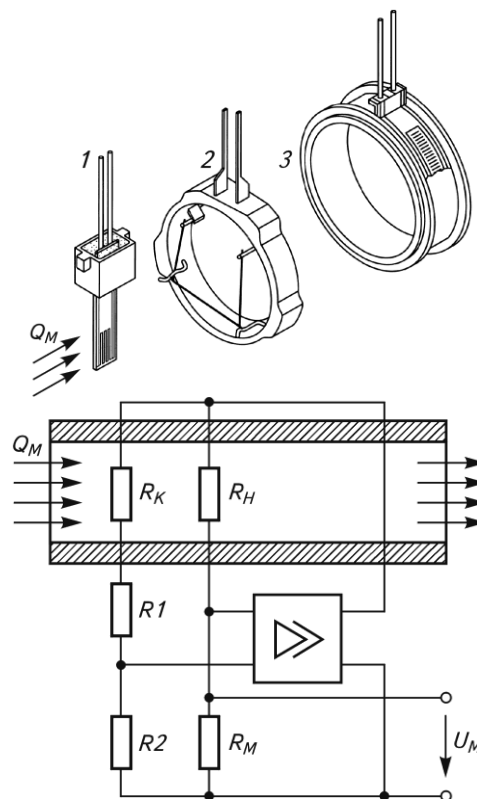


Рис. 4.6. Компоненты нитевого датчика массового расхода воздуха и его электрическая схема: 1 – узел компенсационного резистора R_K ; 2 – кольцо с нагреваемой нитью R_H ; 3 – узел прецизионного резистора R_M ; Q_M – поступающий воздух; R_1R_2 – балансирующие резисторы моста

4.2.3.2. Пленочный датчик массового расхода воздуха

Принципиальное отличие электрической схемы нитевого и пленочного датчиков заключается в том, что в последнем случае цепи измерения и подогрева элемента R_s разделены, что делает работу датчика более надежной и стабильной (рис. 4.8).

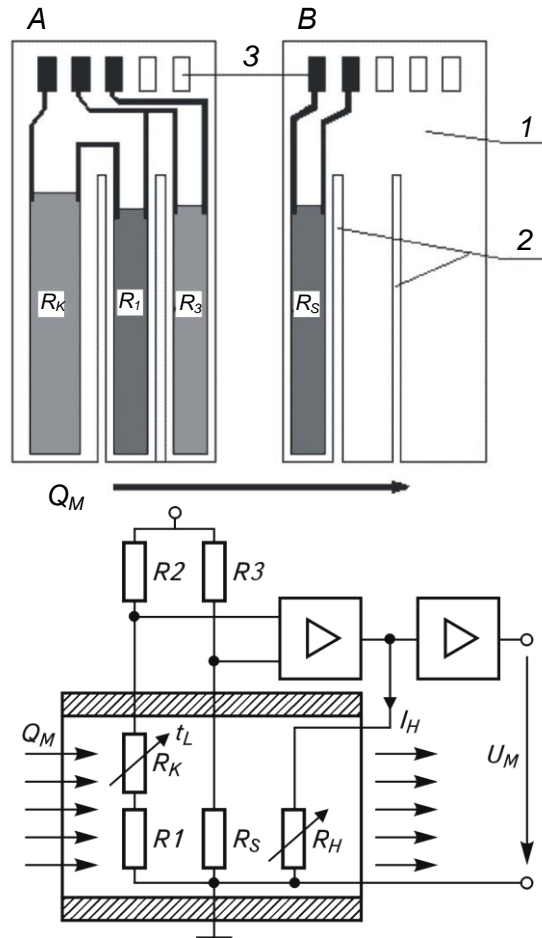


Рис. 4.7. Чувствительный элемент и электрическая схема пленочного датчика массового расхода воздуха: А – передняя сторона керамической подложки; В - задняя сторона; 1 - керамическая подложка; 2 - разделительные пазы; 3 - контактные площадки. R_K – термокомпенсирующий резистор; R_H – нагревательный резистор; $R_1 R_2 R_3$ - эталонные резисторы моста; R_S - базовый термозависимый резистор; Q_M - воздушный поток; I_H - регулируемый ток нагрева R_H ; t_L - температура поступающего воздуха; U_M - выходной сигнал датчика

4.3. Специальные датчики

4.3.1. Датчики содержания кислорода в отработанных газах автомобиля

Применение первых датчиков кислорода было обусловлено необходимостью поддерживать стехиометрический состав рабочей смеси ($\lambda=1$) при работе бензинового двигателя для обеспечения на-

дежного функционирования трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. Наличие нейтрализатора являлось безальтернативным решением для обеспечения требований норм Евро-3 и последующих. Идея конструкции и принцип действия датчика представлены на рис. 4.8.

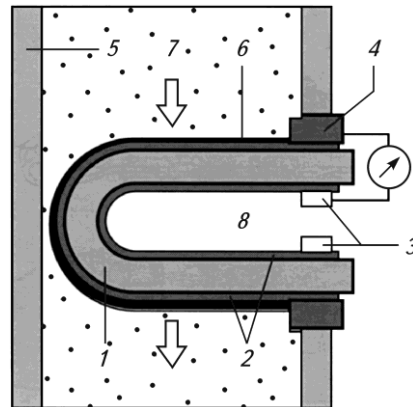


Рис. 4.8. Устройство датчика кислорода: 1 – диоксид циркония – твердый электролит; 2 – электроды из пористой платины; 3, 4 – контакты; 5 – выпускная труба; 6 – пористый защитный слой; 7 – отработанные газы; 8 – атмосферный воздух

Датчик этого типа работает как химический источник э.д.с. Основа конструкции датчика – колпачок, изготовленный из порошка диоксида циркония, выполняющего функцию твердого электролита. С внутренней и внешней сторон на колпачок нанесены электроды из пористой платины, имеющие электрические выводы. С внешней стороны датчик покрыт также оболочкой из перфорированного алюминия, через отверстия которой могут проникать ОГ (на рисунке не показан). Внутренняя поверхность колпачка доступна окружающему воздуху. При различии в концентрациях кислорода между внутренней и наружной поверхностями датчика на платиновых электродах возникает разность потенциалов. Содержание кислорода в воздухе практически постоянно и составляет 21%. Содержание кислорода в ОГ меняется и зависит от состава рабочей смеси двигателя, определяемого коэффициентом λ . Зависимость выходного сигнала датчика от коэффициента λ представлена на рис. 4.9.

Как видно из рис. 4.9, сигнал датчика резко изменяется при незначительных изменениях концентрации кислорода, что является следствием специфических физико-химических процессов, характерных только для данного типа используемых материалов. Однако проводимость керамического электролита при температуре ниже 150°C

практически равна 0. Рабочая температура датчика, при которой обеспечивается необходимая скорость срабатывания, составляет 600°C . Предельно допустимая температура 850°C . Диапазон рабочих температур является определяющим при выборе места установки датчика в выпускной системе. Современные датчики оснащаются электроподогревом, включаемым по команде БУ. Реальная конструкция датчика кислорода, называемая иногда λ -зондом, представлена на рис. 4.10.

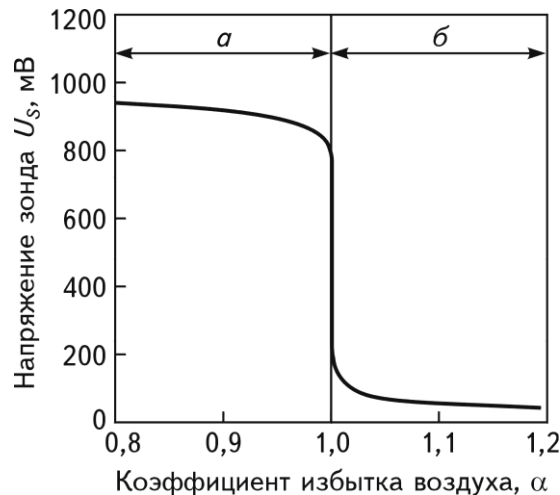


Рис. 4.9. Кривая напряжения датчика кислорода при рабочей температуре 600°C : а – богатая смесь (недостаток воздуха); б – бедная смесь (избыток воздуха)

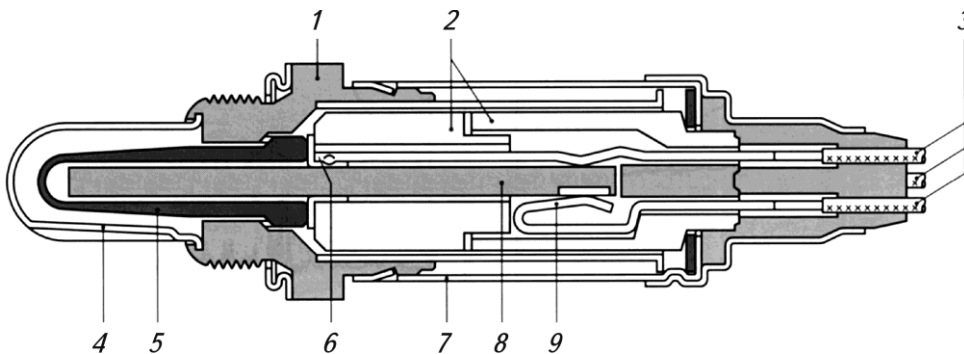


Рис. 4.10. Датчик кислорода с подогревом: 1 – корпус зонда; 2 – керамическая опорная трубка; 3 – подсоединительные провода; 4 – защитный колпачок с перфорацией; 5 – чувствительный элемент; 6 – контакты; 7 – защитная гильза; 8 – нагревательный элемент; 9 – токоподводящая клемма нагревательного элемента

4.3.2. Датчик детонации

Датчики детонации по принципу действия относятся к датчикам вибрации и применяются для регистрации специфических акустических колебаний, возникающих в конструктивных элементах двигателя при некоторых режимах. Эти колебания возникают в двигателе при

неконтролируемом «детонационном» сгорании рабочей смеси. Они преобразуются датчиком в электрические сигналы и после их обработки по специальному алгоритму в контроллере используются для корректировки базовых характеристик управления рабочим процессом с целью устранения явления детонации. Наличие детонационного сгорания может привести к выходу двигателя из строя.

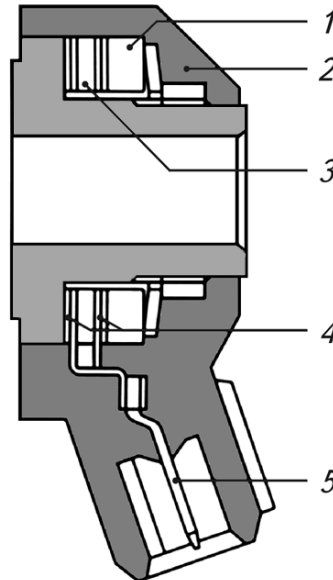


Рис. 4.11. Датчик детонации широкополосный: 1 – инерционная масса; 2 – корпус; 3 – пьезокерамическая шайба; 4 – обкладки с выводами; 5 – выводы соединительного разъема

Представленный на рис. 4.11 *широкополосный датчик* способен воспринимать колебания и генерировать электрические сигналы в диапазоне частот 4...8 кГц, характерных для детонационных процессов широкого класса автомобильных двигателей. Это отличает его от *узкополосного* резонансного датчика, «откликающегося» только на колебания частоты, характерной для двигателей одного типа.

Шайба 1, благодаря своим инерционным свойствам, создает усилия сжатия на кольцеобразном пьезокерамическом элементе 3 той же частоты, что и возбуждающие ее колебания двигателя. При этом возникает электрическое напряжение, снимаемое контактными шайбами 4 и выводимое на разъем. Корпус датчика крепится к поверхности блока цилиндров специальным болтом. При этом должны соблюдаться следующие условия:

- затяжка болта должна осуществляться калиброванным усилием;
- контактные поверхности датчика и посадочная поверхность блока должны быть тщательно обработаны.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы датчики скорости и положения коленчатого вала двигателя (магнитоэлектрические) и их характеристики?
2. Опишите датчики скорости и положения коленчатого и распределительного вала двигателя (на эффекте Холла) и их характеристики.
3. Опишите датчики детонации, принцип действия пьезоэлектрического датчика детонации (конструкция) и природу явления детонации в ДВС.
4. Каковы алгоритмы управления углом опережения зажигания по сигналу датчика детонации?
5. Опишите датчики нагрузки ДВС, типы датчиков, назначение, принцип действия.
6. Опишите датчики содержания кислорода в отработанных газах автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные двигатели. Системы управления и впрыска топлива. Руководство по обслуживанию и ремонту. - Хельсинки: Альфамер, 2000.
2. Акимов, С.В. Электрооборудование автомобилей: учебник для вузов / С.В. Акимов, Ю.П. Чижков. - М.: За рулем, 2001. – 384 с.
3. Арнольд, Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами / Р.Р. Арнольд. - М.: Энергия, 1969. – 175 с.
4. Балагуров, В.А. Аппараты зажигания / В.А. Балагуров. - М.: Машиностроение, 1968. - 479 с.
5. Гируцкий, О.И. Электронные системы управления агрегатами автомобиля / О.И. Гируцкий, Ю.К. Есеновский-Лашков, Д.Г. Поляк. - М.: Транспорт, 2000. - 213 с.
6. Новиков, Ю.В. Основы микропроцессорной техники: учеб. пособие / Ю.В. Новиков, П.К. Скоробогатов. - М.: Интернет–Университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. - 359 с.
7. Купфмюллер, К. Основы теоретической электротехники / К. Купфмюллер. - М.: Энергоиздат, 1960. – 350 с.
8. Яценков, В.С. Микроконтроллеры Microchip: практическое руководство / В.С. Яценков. - М.: ДМК Пресс, «Издательский дом «Додека-XXI», 2002. - 296 с.
9. Тавернье, К. PIC-контроллеры. Практика применения; пер. с франц. / К. Тавернье. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 272 с.
10. Системы управления бензиновыми двигателями; пер. с немец. С40. Первое русское издание. - М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005. – 432 с.
11. Системы управления дизельными двигателями; пер. с немец. С40. Первое русское издание. - М.: ЗАО «Книжное издательство «За рулем», 2004. – 480 с.
12. Балбашов, А.М. Магнитные материалы для микроэлектроники / А.М. Балбашов, А.Я. Червоненкис. - М.: Энергия, 1979.
13. Февралева, Н.Е. Магнитотвердые материалы и постоянные магниты. Определение характеристик / Н.Е. Февралева. - Киев: Наукова думка, 1969.
14. Преображенский, А.А. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники / А.А. Преображенский, Б.В. Шамрай. – М.: Высшая школа, 1982.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Микропроцессорные системы – новый этап развития традиционных систем управления автомобильным двигателем и их аппаратов	3
1.1. Аппараты и системы зажигания 80-90-х годов XX века. Тенденции развития	3
1.2. Структура микропроцессорных систем управления ДВС	15
1.3. Общие принципы построения микропроцессорных систем (МС).....	29
Вопросы для самоконтроля	44
2. Расчет электрических параметров системы зажигания высокой энергии (МПСЗ).....	45
2.1. Область определяемых параметров.....	45
2.2. Вводимые ограничения	45
2.3. Основные расчетные формулы	49
2.4. Пример расчета параметров катушки зажигания	54
Вопросы для самоконтроля	64
3. Определение геометрических размеров катушек зажигания МПСЗ	65
3.1. Определение геометрических размеров катушки зажигания с замкнутой магнитной системой	65
3.2. Определение геометрических размеров катушки зажигания с разомкнутой магнитной системой (стержневой катушки).....	77
Вопросы для самоконтроля	98
4. Датчики микропроцессорных систем управления ДВС	99
4.1. Датчики положения и скорости ДВС.....	99
4.2. Датчики нагрузки двигателя.....	102
4.3. Специальные датчики	106
Вопросы для самоконтроля	110
Литература	110

Учебное издание

ЮТТ Владимир Евсеевич
МОРОЗОВ Виталий Вениаминович
ЧЕПЛАНОВ Вячеслав Иванович

АППАРАТЫ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ЗАЖИГАНИЕМ И ВПРЫСКОМ
ТОПЛИВА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор Н.П. Лапина

Подписано в печать 05.08.2013 г. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 5,6. Тираж 500 экз. Заказ . Цена 112 руб.
МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64.