# ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Учебное пособие

#### МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕУЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

## ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Учебное пособие

Самара Самарский государственный технический университет 2012 Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 629.113.006 Т 33

Т 33 Теория, конструкция и расчет электронных систем зажигания:

учеб. пособие / Сост. А.Л. Мигунов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – 94 с.

Рассмотрены вопросы проектирования и расчета транзисторных систем зажигания, изложена методика расчета и выбора элементов выходного каскада коммутатора системы зажигания, методика расчета электронных параметров, магнитной цепи и обмоточных данных катушки зажигания, приведены краткие теоретические сведения по теории транзисторных систем зажигания.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Теория, конструкция и расчет электрооборудования автомобилей с классическим и гибридным приводом».

УДК 629.113.006

T 33

Рецензенты: д-р техн. наук A.H. Крючков, канд. техн. наук Л.Я. Макаровский

<sup>©</sup> А.Л. Мигунов, составление, 2012

<sup>©</sup> Самарский государственный технический университет, 2012

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭСЗ – электронная система зажигания

БСЗ – бесконтактная система зажигания

КТСЗ – контактно-транзисторная система зажигания

МПСЗ – микропроцессорная система зажигания

С3 – система зажигания

КСЗ – классическая (контактная) система зажигания

КПС – коммутатор с постоянной скважностью

КНС – коммутатор с нормируемой скважностью

КЗ – катушка зажигания

БВН – блок времени накопления

БОТ – блок ограничения тока

БО – блок безискровой отсечки

ДХ – датчик Холла

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

ЭСУД – электронная система управления ДВС

ЛС – логическая схема

ДНО – датчик начала отсчета

ДУИ – датчик угловых импульсов

РТМ – регламентируемые технические материалы

СЧПГ – смещенная частная петля гистерезиса

ТУ – технические условия

#### ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее издание предназначено для студентов вузов, а также может быть полезно инженерам-электромеханикам, работающим в области производства и эксплуатации систем зажигания автомобилей и тракторов.

Глава 1 содержит описание основных типов электронных систем зажигания; рассматриваются вопросы схемотехники коммутаторов контактно-транзисторных, бесконтактных, микропроцессорных систем зажигания; рассмотрены основные типы датчиков бесконтактных систем зажигания, приведены основные способы защиты от перенапряжения выходных каскадов коммутаторов систем зажигания.

В главе 2 излагается и изучается рабочий процесс транзисторных систем зажигания, т.е. рабочий процесс при коммутации первичной обмотки катушки зажигания транзистором выходного каскада системы зажигания.

В главе 3 рассматривается методика расчета бесконтактных систем зажигания. Особое внимание уделяется выбору принципиальной схемы системы зажигания, выбору коммутационного транзистора выходного каскада и расчету элементов цепей управления и защиты выходных каскадов коммутаторов систем зажигания; расчету параметров катушки зажигания, расчету магнитной цепи и обмоточных данных катушки зажигания.

В главе 4 изложено задание на курсовую работу и ее содержание, дан пример расчета транзисторной системы зажигания.

В приложении приведены схемы коммутаторов КТСЗ; БСЗ.

Изучению конструкции и расчету современных систем зажигания, приводящее к снижению токсичных выбросов, улучшению эксплуатационных свойств автомобиля, уделяется в пособии значительное внимание.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Воспламенение рабочей смеси в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания как в период пуска, так и во время его работы осуществляется посредством электрического разряда между электродами свечи, ввернутой в головку цилиндра двигателя.

Бесперебойное искрообразование между электродами свечи происходит при высоком напряжении. Воспламенение рабочей смеси является началом бурной реакции окисления топлива, сопровождающейся выделением тепла.

Источником высокого напряжения могут быть катушки зажигания, питающиеся от аккумуляторной батареи, или магнето, объединяющее в себе источник тока и трансформатор. Воспламенение смеси посредством электрического разряда обладает следующими достоинствами: точность момента зажигания; надежность воспламенения смеси при кратковременном разрядном процессе; простота регулировки момента воспламенения; небольшие габариты и масса аппаратов зажигания.

Перечисленные достоинства и простота реализации предопределили широкое использование систем зажигания с накоплением энергии в индуктивности на автомобильных двигателях. Системы зажигания с накоплением энергии в емкости нашли широкое применение на газовых и высокооборотных мотоциклетных двигателях, которые не критичны к длительности искрового разряда.

Существующие системы зажигания, снабженные катушкой зажигания, могут быть разделены на несколько групп в зависимости от способа управления работой катушки зажигания: система батарейного зажигания с механическим (контактным) прерывателем; контактно-транзисторная система зажигания (КТСЗ); бесконтактная система зажигания (БСЗ); микропроцессорная система зажигания.

К современным системам зажигания предъявляют следующие основные требования:

- -система зажигания должна развивать напряжение, достаточное для пробоя искрового промежутка свечи, обеспечивая при этом бесперебойное искрообразование на всех режимах работы двигателя;
- -искра, образующаяся между электродами свечи, должна обладать достаточной энергией и продолжительностью для воспламенения рабочей смеси при всех возможных режимах работы двигателя;
- -момент зажигания должен быть строго определенным и соответствовать условиям работы двигателя.

В настоящее время к современным системам зажигания предъявляются более высокие требования, а именно: увеличение вторичного напряжения при одновременном повышении надежности; устойчивое искрообразование в различных эксплуатационных условиях; устойчивая работа при значительных механических нагрузках и т.д.

Такие требования не могут быть удовлетворены при использовании классической (батарейной) системы зажигания, так как в этом случае единственным способом увеличения вторичного напряжения является увеличение силы тока разрыва. Однако увеличение силы тока разрыва свыше определенного значения (3,5-4,0 A) приводит к ненадежной работе контактов прерывателя и резкому сокращению их срока службы.

Одним из путей повышения развиваемого системой зажигания вторичного напряжения является применение полупроводниковых приборов — транзисторов, работающих в качестве управляемых ключей и служащих для прерывания тока в первичной обмотке катушки зажигания. Разработанные контактно-транзисторные, бесконтактные, микропроцессорные системы зажигания содержат в выходных каскадах схем коммутаторов мощные транзисторы, которые способны коммутировать токи амплитудой до 10 А в индуктивной нагрузке (первичной обмотке катушки зажигания).

### 1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Первыми электронными системами батарейного зажигания явились контактно-транзисторные системы, которые выпускаются промышленностью до настоящего времени. Схема контактно-транзисторной системы зажигания показана на рис. 1.1. На всех электрических схемах, приведенных в данном пособии, элементы систем зажигания обозначены так же, как на рис. 1.1. Система в основном состоит из тех же элементов, которые характерны для классической системы батарейного зажигания, и отличается от нее наличием транзистора VT и отсутствием конденсатора C1, ранее шунтировавшего контакты прерывателя. Особенностью схем является то, что в ней контакты прерывателя коммутируют только крайне незначительный ток базы  $\mathbf{i}_6$  — ток управления транзистором, который в  $\boldsymbol{\beta}$  раз меньше тока, текущего через катушку зажигания ( $\boldsymbol{\beta}$  — коэффициент усиления транзистора в схеме с общим эмиттером), коммутируемого через катушку зажигания и коммутируемого транзистора VT.

Следует отметить, что указанная особенность контактнотранзисторных систем зажигания позволяет принципиально устранить основные недостатки классической системы зажигания.

Вторичное напряжение  $U_{2\text{м}}$ , развиваемое катушкой зажигания, и энергия разряда в этой системе могут быть значительно повышены, так как увеличение тока разрыва  $I_{\text{p}}$  ограничивается только параметрами транзистора, а не стойкостью контактов прерывателя.

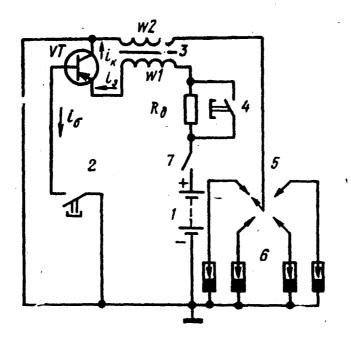


Рис. 1.1. Схема контактно-транзисторной системы батарейного зажигания:

- 1 аккумуляторная батарея (АБ); 2 прерыватель; 3 катушка зажигания;
- 4 контакты реле, шунтирующие  $R_{\pi}$  при пуске двигателя; 5 распределитель; 6 свечи зажигания; 7 выключатель зажигания

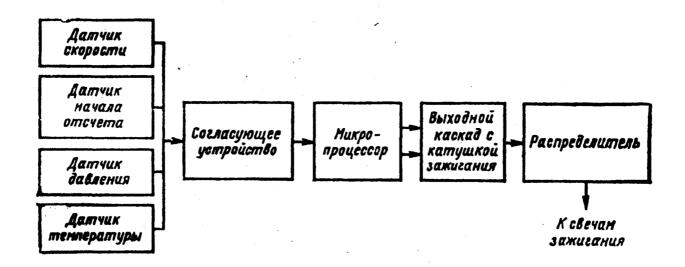
Система зажигания с бесконтактным управлением моментом зажигания имеет механические автоматы опережения зажигания (рис. 1.2). Датчик вырабатывает импульсы в строго заданные моменты времени, которые через формирующий и выходной каскады управляют током разрыва в первичной обмотке катушки зажигания. Создаваемые при этом импульсы высокого напряжения подаются в необходимой последовательности обычным распределителем к соответствующей свече зажигания.



*Рис. 1.2.* Схема электронной бесконтактной системы зажигания с механическими автоматами опережения зажигания

Опережение момента зажигания по частоте вращения коленчатого вала и по нагрузке двигателя осуществляется, так же как в классической системе зажигания, с помощью механических центробежных и вакуумных автоматов.

Дальнейшим развитием электронных систем зажигания автомобилей являются бесконтактные системы зажигания с электронными автоматами опережения, регулирующие зажигание в зависимости от целого комплекса параметров двигателя: частоты вращения, нагрузки, температуры охлаждающей жидкости, давления атмосферного воздуха и т.п. (рис. 1.3).

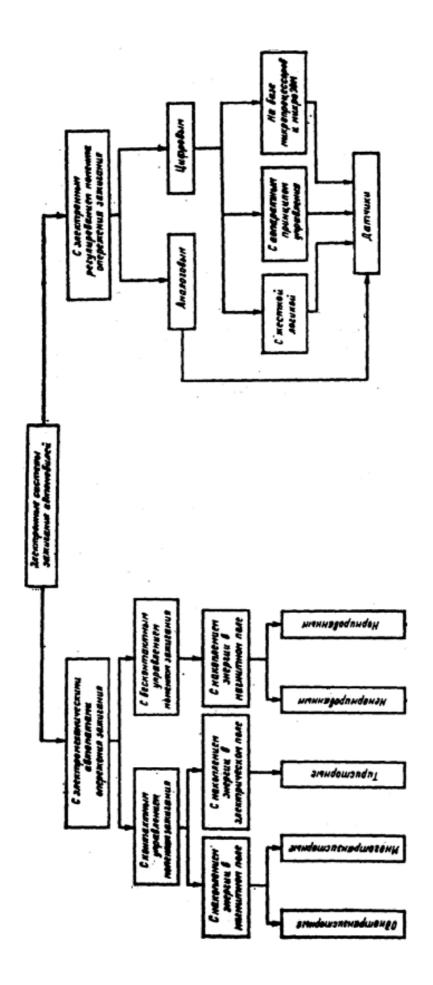


*Рис. 1.3.* Схема цифровой микропроцессорной системы зажигания с электронными автоматами опережения зажигания

Датчик скорости вырабатывает импульсы, пропорциональные частоте вращения коленчатого вала двигателя, датчик начала отсчета запускает в строго заданные моменты времени счетное устройство микропроцессора. Согласующее устройство предназначено для преобразования аналогового сигнала в цифровой код, используемый в микропроцессоре. В память микропроцессора заложены оптималь-

ные характеристики опережения зажигания для каждого режима работы двигателя. При поступлении в микропроцессор соответствующих данному режиму двигателя сигналов от датчиков, он выдает команду в выходной каскад на выработку высокого напряжения катушкой зажигания, которое через обычный высоковольтный распределисоответствующей свече тель подается зажигания. с механическими автоматами опережения зажигания представляют собой аналоговые механические вычислительные машины, которые в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки двигателя вычисляют момент зажигания и дают команду на создание высоковольтного импульса с необходимыми параметрами. Однако возможности воспроизведения такими системами сложных характеристик опережения зажигания сильно ограничены. В рамках микропроцессорной системы зажигания возможно как применение традиционного механического распределителя, функцией которого остается лишь высоковольтное распределение энергии по цилиндрам двигателя, так и электронного распределения. В этом случае для четырехцилиндрового двигателя применяется двухканальный коммутатор, два выходных транзистора которого попеременно коммутируют ток в первичных обмотках двухвыводных или одной четырехвыводной катушки зажигания.

Разделяют электронные системы зажигания на два подкласса: системы с контактным управлением и бесконтактные системы. Основные электронные системы зажигания представлены на классификационной схеме (рис. 1.4).



Puc. 1.4. Классификация электронных систем зажигания автомобилей

#### 1.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОММУТАТОРОВ КОНТАКТНО-ТРАНЗИСТОРНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Режим работы контактов прерывателя таких систем, как правило, резко облегчен, и поэтому их срок службы значительно больше. Однако этим системам присущи некоторые недостатки классической системы зажигания (механическое изнашивание прерывателя, что приводит к изменению в процессе эксплуатации установочного угла, ограничение скоростных режимов по вибрации контактов прерывателя, увеличивающейся во время эксплуатации, асинхронизм искрообразования, ограниченные возможности в воспроизведении сложных характеристик опережения зажигания и т.п.).

Системы с контактным управлением разделяют на две основные группы, отличающиеся способами накопления энергии — в электростатическом поле специального конденсатора или в магнитном поле.

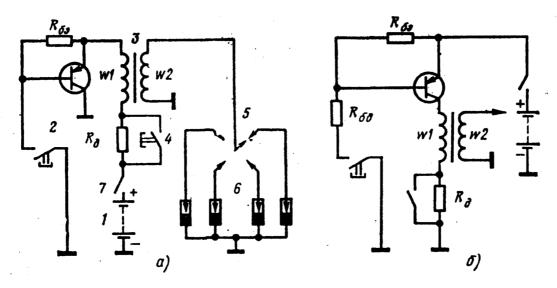


Рис. 1.5. Электрические схемы контактно-транзисторных систем зажигания

В системе с накоплением энергии в магнитном поле энергия необходимая для создания высокого напряжения, аккумулируется в магнитном поле катушки зажигания. Ток в ней обычно коммутирует мощный транзистор. Поэтому иногда такие системы называют контактно-транзисторными. В контактно-транзисторной системе первичная обмотка катушки зажигания включена в цепь эмиттер — кол-

лектор транзистора, контакты прерывателя — в цепь базы транзистора (см. рис. 1.1). При разомкнутых контактах прерывателя цепь базы транзистора оборвана и через первичную обмотку w1 катушки протекает начальный ток коллектора малой силы. После замыкания контактов прерывателя к переходу база — эмиттер транзистора прикладывается напряжение в прямом направлении (плюсовой контакт батареи — к эмиттеру, а минусовой — к базе) и через переход начинает протекать ток управления транзистора (ток базы). При этом транзистор открывается и по первичной обмотке начинает протекать ток эмиттера и ток нарастает по экспоненциальному закону. При изменении тока образуется магнитное поле, в котором аккумулируется определенное количество энергии.

Через некоторое время контакты прерывателя вновь размыкаются, ток базы прекращается, транзистор запирается, и ток в первичной обмотке катушки резко уменьшается. При этом во вторичной обмотке катушки зажигания возникает высокое напряжение, которое обычным распределителем подается к соответствующей свече, вызывая пробой искрового промежутка и воспламенение рабочей смеси, затем процесс повторяется.

Контактно-транзисторные системы могут быть как однотранзисторными, так и многотранзисторными. В однотранзисторных системах первичная обмотка w1 катушки зажигания включается в коллекторную (рис. 1.5,  $\delta$ ) или эмиттерную (рис. 1.5, a) цепь транзистора. Параллельно эмиттерному переходу транзистора подключен резистор Rбэ, исключающий обрыв цепи базы при размыкании контактов прерывателя. Дополнительный резистор Rбд в схеме (см. рис. 1.5,  $\delta$ ) служит для ограничения силы тока базы транзистора, а следовательно, и силы тока коллектора.

Сравнение силы тока, протекающего через обмотку w1 катушки зажигания в рассматриваемых схемах, показывает, что первая схема более экономична, так как в ней весь потребляемый от батареи ток протекает по обмотке w1 катушки зажигания, в то время как во второй схеме – только часть тока. Другим преимуществом первой схемы

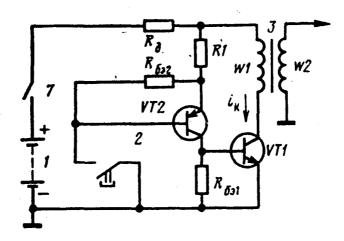
является возможность непосредственного, контакта корпуса транзистора с корпусом транзисторного коммутатора и корпусом (массой) автомобиля без изоляции, чем обеспечивается хороший отвод теплоты от транзистора (конструктивно коллектор у всех мощных транзисторов для улучшения отвода теплоты от коллекторного перехода соединен с корпусом транзистора, это особенно важно для германиевых транзисторов).

Вторая схема отличается низким напряжением на контактах прерывателя. При запирании транзистора к контактам прерывателя в первой схеме приложена сумма напряжений первичного импульса катушки и напряжения питания, во второй схеме – только напряжение питания.

Первую схему (см. рис. 1.5, a) рекомендуется применять в тех случаях, когда требуется обеспечить хорошее охлаждение транзистора при малых поверхностях теплоотвода и уменьшить силу тока, потребляемого системой от батареи. Вторую схему (см. рис. 1.5,  $\delta$ ) целесообразно использовать в тех случаях, когда требование улучшения охлаждения транзистора не является первостепенным, а важно снижение напряжения на контактах или на входе транзисторного коммутатора [3, 5].

Разработано большое количество контактно-транзисторных систем, в которых применены несколько транзисторов. Увеличение числа транзисторов в контактно-транзисторных системах вызвано тем, что один транзистор использовать в системах зажигания современных автомобилей практически нельзя. Отрицательный полюс аккумуляторной батареи подключен к корпусу автомобиля, и конструктивно с ним соединен неподвижный контакт прерывателя системы зажигания, поэтому не удается обеспечивать отпирание транзистора при замыкании контактов прерывателя и его запирание при размыкании контактов. Обратная работа прерывателя, т.е. отпирание транзистора при размыкании контактов прерывателя и его запирание при замыкании контактов, неприемлема, так как существенно смещается момент зажигания и увеличивается асинхронизм искрообразования. Для устранения указанного недостатка применяют еще один ма-

ломощный транзистор с проводимостью PNP являющийся предварительным усилителем тока для выходного мощного транзистора типа NPN, в цепь коллектора или эмиттера которого включают первичную обмотку катушки зажигания (рис. 1.6). При этом осуществляется также дополнительная разгрузка по току контактов прерывателя [3, 6].



*Рис. 1.6.* Электрическая схема коммутатора системы зажигания на транзисторах разной проводимости

Принцип работы схемы заключается в следующем: при включении выключателя 7 зажигания и замыкании контактов прерывателя 2 через эмиттерный переход и резисторы R1 и  $R_{\rm д}$  начинает протекать ток базы транзистора VT2 и его переход эмиттер – коллектор открывается. Вследствие этого начинает протекать ток через базу транзистора VT1, а его переход эмиттер – коллектор также открывается и через первичную обмотку катушки зажигания проходит ток коллектора  $i_{\kappa}$ .

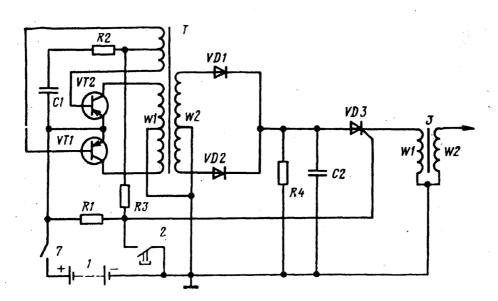
В катушке зажигания накапливается электромагнитная энергия. При размыкании контактов прерывателя 2 ток базы транзистора VT2 прекращается, и он запирается (резистор  $R_{69}$  ускоряет этот процесс), в результате транзистор VT1 также запирается (резистор  $R_{691}$  ускоряет его запирание). Сила тока  $i_k$  резко уменьшается, и во вторичной обмотке w2 катушки зажигания за счет запасенной электромагнитной энергии возникает высокое напряжение.

В рассмотренных системах данной группы устранены основные принципиальные недостатки классической системы зажигания. Однако не устранены такие недостатки контактно-транзисторных систем

зажигания, как сильная зависимость вторичного напряжения от шунтирующих нагрузок (сопротивление нагара на свечах и емкость вторичной цепи).

В системе с накоплением энергии в электростатическом поле энергия, необходимая для создания высокого напряжения, аккумулируется в специальном конденсаторе и передается затем с помощью тиристора катушке зажигания. Поэтому такие системы зажигания иногда также называют контактно-тиристорными.

Системы с накоплением энергии в электростатическом поле конденсатора разделяют на системы с импульсным и с непрерывным накоплением энергии. При импульсном накоплении энергии процессы заряда и разряда конденсатора разделены большими паузами.



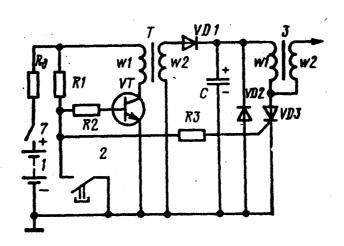
*Рис.* 1.7. Электрическая схема системы с непрерывным накоплением энергии в электростатическом поле конденсатора и контактным управлением

Схема системы с непрерывным накоплением энергии приведена на рис. 1.7. В схеме имеется двухтактный преобразователь, состоящий из двух транзисторов VT1 и VT2, трансформатора Т, резисторов R2 и R3 и конденсатора C1. Выходное напряжение статического преобразователя выпрямляется двухполупериодным выпрямителем с нулевой точкой (диоды VD1 и VD2). Нагрузкой выпрямителя является емкостной накопитель (конденсатор C2, шунтированный резистором R4). Функции прерывателя тока в первичной обмотке катушки зажигания 3

выполняет тиристор VD3. Управление тиристором осуществляется через контакты прерывателя 2.

Схема работает следующим образом. При включении выключателя 7 зажигания срабатывает двухтактный преобразователь, который коммутирует ток в первичной обмотке w1 трансформатора Т. Во вторичной обмотке w2 трансформатора индуцируется переменное напряжение прямоугольной формы с амплитудой 200-500 В, которое преобразуется выпрямителем (VD1 и VD2) в постоянное напряжение. Выпрямленным напряжением заряжается конденсатор C2 (при этом контакты прерывателя 2 замкнуты) Цепь управления тиристором шунтирована контактами прерывателя, и тиристор закрыт.

При замыкании контактов прерывателя к управляющему электроду тиристора VD3 подается напряжение от аккумуляторной батареи 1 через резистор R1 и тиристор открывается. При открывании тиристора конденсатор C2 разряжается на первичную обмотку w1 катушки зажигания 3, вследствие чего во вторичной обмотке w2 возникает высокое напряжение. Цепь C1-R2 предназначена для улучшения пуска транзисторного преобразователя.



*Рис. 1.8.* Электрическая схема системы с импульсным накоплением энергии в электростатическом поле конденсатора и контактным управлением

В этой системе зажигания по сравнению с ранее рассмотренными при соответствующем выборе параметров можно получить прак-

тически постоянное вторичное напряжение, не зависящее от частоты вращения коленчатого вала двигателя. Схема системы с импульсным накоплением энергии представлена на рис. 1.8. Система состоит из транзистора VT, работающего в режим ключа; повышающего трансформатора T с замкнутым магнитопроводом; накопительной емкости C; диодов VD1 и VD2 управляемого тиристора VD3 и катушки зажигания 3.

Схема работает следующим образом. При включении выключателя 7 зажигания и размыкании контактов прерывателя, транзистор VT переходит в состояние насыщения. Ток базы протекает от батареи 1 через резисторы  $R_{\pi}$ , R1 и R2, и по первичной обмотке w1 трансформатора Т начинает протекать ток, создающий электромагнитное поле в трансформаторе. При замыкании контактов прерывателя 2 шунтируется цепь базы транзистора и он запирается, что приводит к возникновению ЭДС в обмотках трансформатора, и конденсатор С через диод VD1 заряжается (тиристор VD3 в это время заперт, так как его цепь управления шунтирована контактами прерывателя 2) до напряжения 200-400 В. При размыкании контактов прерывателя 2 появляется ток управления тиристором (от батареи 1 через резисторы  $R_{\pi}$ , R и R3), последний открывается, конденсатор С разряжается на первичную обмотку w1 катушки зажигания 3 и между ними начинается обмен энергией, а во вторичной обмотке w2 катушки зажигания 3 индуцируется импульс высокого напряжения.

Системы этой группы в отличие от систем с накоплением энергии в магнитном поле позволяют получить более высокую скорость нарастания вторичного напряжения  $U_{2m}$ , что уменьшает чувствительность этих систем к шунтирующим нагрузкам. Кроме того, в рассматриваемых системах вторичное напряжение  $U_{2m}$  может быть практически неизменным при изменении пе от частоты, соответствующей пуску двигателя, до максимальной частоты, так как конденсатор успевает полностью зарядиться на всех режимах работы двигателя.

Однако в этих системах вследствие высокой скорости нарастания  $U_{2\text{м}}$  пробивное напряжение  $U_{\pi}$  на свечах (при прочих равных условиях) возрастает до 30 % по сравнению с напряжением в системах с накоплением энергии в магнитном поле.

Длительность индуктивной фазы искрового разряда в этих системах сокращается от единиц миллисекунд до десятков, сотен микросекунд, что ухудшает воспламенение и сгорание рабочей смеси в цилиндрах двигателя на режимах частичных нагрузок, вследствие чего повышаются расход топлива и токсичность отработавших газов.

Размеры и масса электронных коммутаторов рассматриваемых систем значительно выше, чем у систем с накоплением энергии в магнитном поле.

Всем электронным системам зажигания с контактным управлением присущи недостатки классических контактных систем. Одним из них является смещение установочного угла зажигания в пределах 2-4° в сторону запаздывания во время длительной эксплуатации вследствие износа подушечки прерывателя и увеличения в процессе эксплуатации асинхронизма искрообразования, особенно при большой частоте вращения коленчатого вала двигателя. Это приводит к повышению расхода топлива (иногда до 10%) и токсичности отработавших газов.

#### 1.2. БЕСКОНТАКТНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

Недостатки контактных систем отсутствуют в системах с бесконтактным управлением моментом зажигания и механическими автоматами опережения зажигания. Приведенные выше преимуществ систем с накоплением энергии в магнитном поле определяют существующую тенденцию использования в системах с бесконтактным управлением только такого способа накопления энергии. Поэтому по виду коммутирующего прибора такие системы называют бесконтактно-транзисторными, или бесконтактными, системами зажигания [1, 3].

По признакам нормирования времени накопления энергии (см. рис. 1.4) бесконтактные системы зажигания (БСЗ) разделяют на системы с ненормированным и нормированным временем накопления энергии в катушке зажигания [1, 3].

В системах с ненормированным временем накопления энергии, время накопления энергии определяется параметрами сигнала датчика и в большой степени зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя (угол замкнутого состояния контактов или угол включенного состояния выходного транзистора постоянен и не зависит от частоты вращения).

В системах с нормированным временем накопления энергии, время накопления энергии неизменно или мало зависит от частоты вращения (угол замкнутого состояния контактов переменный и зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя). В системах время нормируется в специальных электронных устройствах, например в интеграторах. Нормирование времени позволяет значительно увеличить ток разрыва в катушках зажигания, не изменяя температурного режима катушки и коммутатора, что, в свою очередь, дает возможность существенно повысить вторичное напряжение  $U_{2m}$ , и энергию разряда в этих системах по сравнению с системами с ненормируемым временем накопления энергии. Системы с нормированным временем накопления энергии могут жестко воспроизводить закон нормирования этого параметра или самонастраиваться (адаптироваться).

Частотная характеристика времени накопления энергии систем первой группы не зависит от параметров катушки зажигания. Специальные схемные решения позволяют обеспечить зависимость закона нормирования от питающего напряжения. Однако технологический разброс параметров катушек зажигания коммутатора, а также дрейф параметров коммутатора во время эксплуатации, определяют необходимость выполнения настройки времени накопления энергии с неко-

торым запасом. Это приводит к повышенному выделению теплоты на выходном транзисторе и, как следствие, к увеличению размеров радиатора коммутатора.

Системы второй группы (адаптивные) имеют оптимальную зависимость времени накопления энергии от частоты вращения, что обеспечивает накопление энергии в магнитном поле катушки зажигания при минимальных тепловых потерях в коммутаторе в всем рабочем диапазоне питающего напряжения и температуры окружающего воздуха, при любых технологических отклонения параметров входных сигналов и катушек зажигания [3, 6].

В бесконтактных системах зажигания, как правило, между выходным коммутируемым каскадом и датчиком имеется формирующий каскад, предназначенный для усиления и преобразования управляющих сигналов. Формирующие каскады выполняются по различным электрическим схемам. Поэтому системы с бесконтактным управлением можно также классифицировать и по типу формирующего каскада. Функции формирующих каскадов могут выполнять:

- одно или многокаскадные транзисторные усилители, в которых транзисторы работают в режиме переключателей;
- одновибраторы, преобразующие импульсы тока любой формы и длительности в прямоугольные, усиливающие их. Длительности импульсов определяется параметрами схемы;
- триггеры спусковые схемы на двух транзисторах с положительной обратной связью, обеспечивающие переключение транзисторов при изменении полярности или уровня управляющего сигнала;
  - транзисторные генераторы с выпрямителем.

В некоторых системах формирующий каскад представляет собой сочетание схем одновибратора и усилителя, одновибратора и триггера и т.д.

Сигналы, управляющие моментом зажигания в бесконтактных системах зажигания, вырабатываются специальными бесконтактными

датчиками, устанавливаемыми, как правило, в стандартном распределителе вместе подвижной пластины, прерывателя и кулачка.

В настоящее время применяются в основном различные генераторные датчики, указанные ниже:

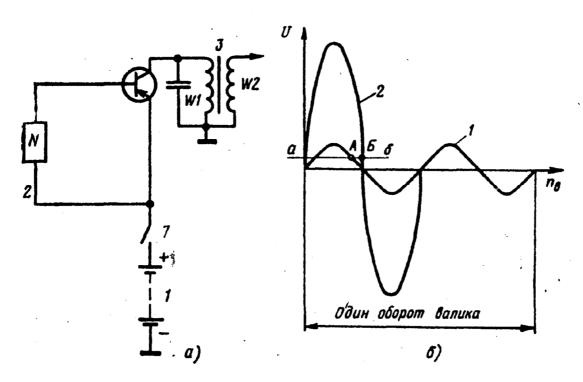
- 1. Магнитоэлектрические датчики, действие которых основано на явлении электромагнитной индукции. Они состоят из неподвижной катушки с заданным числом витков и вращающегося постоянного магнита, жестко связанного с коленчатым валом двигателя, причем число полюсов или пар полюсов в магните равно числу цилиндров двигателя. Применяют и так называемые коммутаторные магнитоэлектрические датчики, в которых и обмотки и магнит неподвижны, а вращается специальный коммутатор, изготовленный из магнитомягкой стали.
- 2. Датчики Холла усиливают ЭДС Холла и преобразуют ее в прямоугольные сигналы. Магнитная система обычно встроена в датчик, а коммутация магнитного потока осуществляется специальной шторкой из магнитомягкой стали, на которой имеются прорези, соответствующие числу цилиндров двигателя. Шторка укреплена на валике распределителя.
- 3. Датчики на магниторезисторе усиливают ЭДС, которая снимается со специальной обмотки, намотанной на механически обработанном отрезке магнитной проволоки. При перемагничивании этой проволоки от вращающихся магнитов (или за счет коммутации магнитного потока при неподвижных магнитах) в обмотке возникают кратковременные импульсы напряжения.

Датчики других типов широкого распространения пока не получили в силу ряда присущих им недостатков.

Система с магнитоэлектрическим датчиком, представленная на рис. 1.9, а имеет вращающиеся магниты и ненормируемое время накопления энергии.

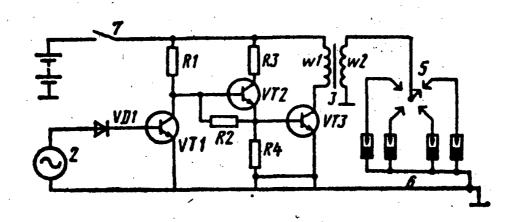
Система работает следующим образом. Когда ротор с магнитами неподвижен, транзистор закрыт и ток в первичной обмотке w1 катушки зажигания 3 не протекает. При вращении ротора в обмотке датчика 2 индуцируется переменная ЭДС. В положительные полупериоды напряжения датчика транзистор почти все время находится в состоянии насыщения и по первичной обмотке w1 катушки зажигания протекает ток, а в отрицательные полупериоды транзистор заперт и находится в состоянии отсечки. Напряжение магнитоэлектрического датчика зависит от частоты его вращения. С повышением частоты оно увеличивается. На осциллограмме (рис. 1.9,  $\delta$ ) приведены кривые изменения напряжения датчика за один оборот валика распределителя при различной частоте вращения. Там же показан уровень напряжения (линия a- $\delta$ ), при котором транзистор переходит в состояние насыщения и отсечки.

При малой частоте вращения (кривая 1) искрообразование происходит в точке A, а при большой (кривая 2) в точке Б, т.е. позже. Таким образом, с увеличением частоты вращения коленчатого вала двигателя будет происходить автоматическое электрическое запаздывание момента зажигания, которое необходимо компенсировать механическими автоматами опережения зажигания, что не всегда возможно. Кроме того, если частота вращения ротора датчика мала, то вырабатываемое им напряжение оказывается недостаточным для приведения транзистора в состояние насыщения, поэтому без формирующего каскада такая система начинает работать при относительно высокой частоте вращения коленчатого вала двигателя, соответствующей искрообразованию (500-1000 мин<sup>-1</sup>), что затрудняет пуск двигателя.



Puc. 1.9. Электрическая схема бесконтактной системы зажигания с магнитоэлектрическим датчиком и кривые выходного напряжения датчика при различной частоте вращения

На рис. 1.10 приведена схема БСЗ с магнитоэлектрическим датчиком, имеющим вращающийся магнит. Для устранения указанного недостатка применен формирующий каскад, снижающий минимальную частоту бесперебойного искрообразования системы 20 мин<sup>-1</sup>, что вполне достаточно для надежного пуска двигателя.



*Рис. 1.10*. Электрическая схема бесконтактной системы зажигания с магнитоэлектрическим датчиком и формирующим каскадом:

1 – аккумуляторная батарея; 2 – магнитоэлектрический датчик;

3 – катушка зажигания; 7 – выключатель зажигания

Система состоит из магнитоэлектрического датчика 2; формирующего каскада, выполненного по схеме ключевого усилителя на транзисторах VT1 и VT2; выходного (коммутирующего) каскада на транзисторе VT3; диода VD1, защищающего входную цепь транзистора VT1 от напряжения датчика обратной полярности, которое при большой частоте вращения датчика может достигать 150-160 В; катушки зажигания 3; обычного высоковольтного распределителя 5 и свечей зажигания 6.

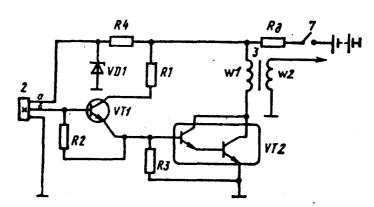
Система работает следующим образом. При включенном выключателе зажигания 7 и неподвижном роторе датчика 2 транзистор VT1 закрыт (отсутствует ток в управляющей цепи база — эмиттер). Через резистор R1 проходит ток управления транзистором VT2, который открывается и через него и резистор R3 начинает проходить ток управления выходным транзистором VT3. Последний открывается и через первичную обмотку w1 катушки зажигания 3 протекает ток. В магнитном поле катушки зажигания запасается электромагнитная энергия.

При частоте вращения ротора датчика 220 мин<sup>-1</sup> транзистор VT1 открывается и входит в режим насыщения, характеризующийся малым сопротивлением на участке эмиттер — коллектор. Вследствие этого база транзистора VT2 оказывается соединенной с массой автомобиля и транзисторы VT2 и VT3 лавинообразно закрываются. Ток в первичной обмотке w1 катушки зажигания 3 резко прекращается, и во вторичной обмотке датчика 2 индуцируется импульс высокого напряжения, который распределителем 5 передается к соответствующей свече.

Приведенной схеме БСЗ присуще некоторое электрическое смещение угла опережения зажигания в зависимости от частоты вращения (в пределах 5-10°) в случае применения датчика с вращающимися магнитами. Исключить электрическое смещение можно включением на входе коммутатора специальных коммутаторных магнито-электрических датчиков, последовательным подключением RC цепочки. Это позволяет снизить электрическое смещение от магнито-

электрических датчиков до 1° во всем диапазоне частоты вращения валика датчиков-распределителей [3, 5].

Схема с датчиком Холла начинает работать при малой частоте вращения аналогично контактным системам, так как выходной сигнал, получаемый от датчика Холла, не зависит от частоты вращения валика датчика-распределителя. Они не имеют электрических смещений момента зажигания. На рис. 1.11 приведена электрическая схема бесконтактной системы зажигания с датчиком Холла и ненормируемым временем накопления энергии. При включении выключателя зажигания 7 напряжение аккумуляторной батареи через стабилитрон VD1-R4 подается на вход а датчика 2. С выхода б датчика 2 сигнал в виде прямоугольных импульсов тока подается на базу транзистора VT1, усиливается им и открывает составной транзистор VT2 — по первичной обмотке w1 катушки зажигания 3 протекает ток.

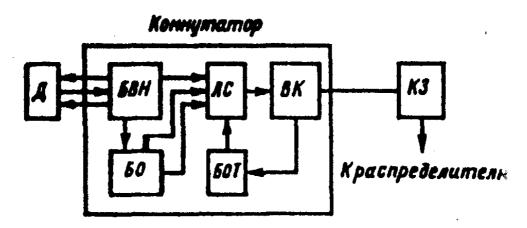


Puc. 1.11. Электрическая схема бесконтактной системы зажигания с датчиком Холла и ненормированным временем накопления энергии в катушке зажигания

При вращении шторки датчика магнитный поток замыкается, ЭДС Холла исчезает и на выходе датчика импульс отсутствует. Транзистор VT1 запирается, а за ним запирается и составной транзистор VT2, что приводит к прерыванию тока в катушке зажигания и возникновению импульса высокого напряжения во вторичной обмотке 2 катушки зажигания 3.

На рис. 1.12 представлена схема бесконтактной системы зажигания с датчиком Холла, с нормируемым временем накопления энер-

гии в катушке зажигания и отключением тока в катушке при неработающем двигателе. Такие системы зажигания позволяют получить значительно более высокие характеристики систем зажигания (вторичное напряжение при нагрузках, энергию и длительность искрового разряда), чем в системах, рассмотренные выше, при неизменных или меньших размерах транзистора коммутатора и катушки зажигания и меньшем потреблении тока. Принцип работы системы зажигания состоит в следующем: прямоугольные импульсы датчика Холла (Д) подаются на блок времени накопления (БВН), где происходит формирование импульсов тока необходимой длительности, поступающих в первичную цепь катушки зажигания (КЗ).



*Рис. 1.12.* Схема бесконтактной системы зажигания с датчиком Холла и нормируемым временем накопления энергии в КЗ

С БВН сигнал подается на логическую схему (ЛС) и далее на выходной каскад (ВК). Из ВК сигнал подается одновременно на блок ограничения тока (БОТ) и в КЗ. БОТ обеспечивает ограничение амплитуды импульсов тока в катушке зажигания при изменениях напряжения батареи от 6 до 18 В. Блок отсечки (БО) обеспечивает плавное снижение тока в катушке зажигания при включении и выключении выключателя зажигания и неработающем двигателе. Кроме положительных свойств бесконтактные системы зажигания с механическими автоматами опережения зажигания имеют ряд недостатков, которые ограничивают возможности их применения. Механические автоматы опережения зажигания не всегда могут воспроиз-

вести более сложные характеристики опережения зажигания по скорости, нагрузке, а также температуре двигателя. Кроме того, угловые погрешности привода датчиков-распределителей приводят к повышенному асинхронизму искрообразования и «размытости» угла зажигания. Этих недостатков лишены бесконтактные системы зажигания с электронными автоматами опережения зажигания по скорости нагрузке и другим параметрам двигателя — аналоговые, цифровые или микропроцессорные системы зажигания.

Бесконтактные системы зажигания с электронным регулированием момента опережения зажигания разделяют на системы с аналоговым и цифровым регулированием [1, 3].

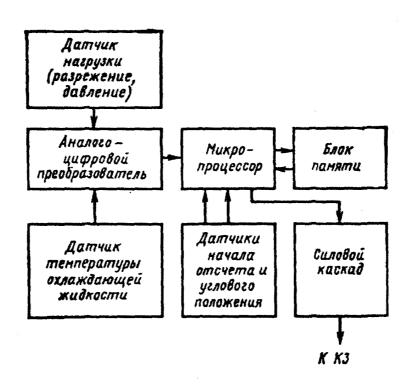
В системах с аналоговым регулированием закон регулирования характеристиками полупроводниковых определяется элементов, например, стабилитронов, диодов и т.п. Системы с цифровым регулированием разделяются на системы с жесткой логикой (аппаратурным принципом управления без блока памяти и с блоком памяти) и на системы с программной организацией обработки информации на базе микропроцессоров и микроЭВМ. Последние позволяют более гибко воспроизводить как любые заданные, так и адаптируемые по наличию детонации в двигателе характеристики [1, 3, 6]. Созданию электронных систем зажигания, основанных на аналоговом принципе регулирования и функциональной обработке информации, способствовали, прежде всего, их невысокая стоимость и простота построения. Все это в сочетании с преимуществами микроэлектронной элементной базы позволило такие системы отнести к основным электронным средствам обработки информации.

Главной особенностью таких ЭСЗ является возможность более точного регулирования момента зажигания и обеспечение зажигания очень бедных смесей. Благодаря этому сглаживаются противоречия между требованиями максимальной мощности, высокой топливной экономичности и малой токсичности. Более точное регулирование момента зажигания с учетом большего, чем в обычных системах зажигания, числа параметров позволяет отказаться от применения спе-

циальных устройств снижения токсичности: системы рециркуляции отработавших газов, каталитического дожигателя и вакуумного устройства запаздывания зажигания [2, 3, 6].

Электронная система включает в себя карбюратор, отрегулированный на приготовление бедных горючих смесей, и аналоговая ЭВМ с датчиками управления моментом зажигания. Однако для установки системы в подкапотном пространстве необходимо решить ряд задач, одна из которых — разработка цепей температурной компенсации, без которых аналоговая ЭВМ не может работать с заданной точностью в напряженных температурных условиях. Дополнительно с целью повышения стойкости к радиопомехам в системе применялись резистивно-емкостные фильтры, при установке которых могут быть получены более надежные результаты, чем при экранировании.

Кроме отмеченных к недостаткам аналоговых устройств необходимо отнести: инерционность – ограниченную возможность изменения характеристик.



*Рис. 1.13*. Схема микропроцессорной системы зажигания с электронным регулированием момента зажигания

Значительно большими возможностями обладают цифровые системы зажигания с элементами памяти. В таких системах, как правило, программа работы определяется логическими связями между функциональными устройствами, а данные по индивидуальным особенностям характеристик, воспроизводимых системой, хранятся в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) в виде комбинаций кодов чисел. ПЗУ позволяет хранить в течение почти неограниченного времени любую информацию, в том числе закодированные характеристики углов опережения зажигания в зависимости от влияющих условий. В процессе разработки модификации системы для различных двигателей при сохранении номенклатуры датчиков требуется только изменить содержимое ПЗУ [1, 3, 6].

Системы с ПЗУ более «гибкие» по сравнению с системами на «жестких» связях, они получили в настоящее время большее распространение, особенно микропроцессорные системы.

Общая схема микропроцессорной системы зажигания с электронным цифровым регулированием момента зажигания показана на рис. 1.13 [3, 6].

Принцип работы системы следующий. Аналоговые сигналы с датчиков температуры охлаждающей жидкости и нагрузки двигателя (абсолютного давления или разрежения) во впускном трубопроводе с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуются в цифровую форму и затем вместе с сигналами датчика углового положения коленчатого вала поступают на вход микропроцессора.

На основании сигналов, поступающих с датчиков, и заданных табличных данных, хранящихся в памяти устройства, характеризующих соотношения между частотой вращения коленчатого вала, нагрузкой двигателя и температурой охлаждающей жидкости, микропроцессор вычисляет оптимальный угол опережения зажигания для конкретного рабочего режима двигателя и времени накопления энергии в катушке зажигания. Угол опережения зажигания оптимизирован с точки зрения снижения токсичности отработавших газов, повышения топливной экономичности и улучшения динамических

качеств конкретного автомобиля. Функциональное сочетание программных и аппаратных средств позволяет вычислять оптимальный момент зажигания в течение 8-12 мкс с выполнением ряда арифметических и логических операций.

Преимущества микропроцессорных систем управления обусловлены возможностью наращивания функций данной системы для работы от необходимого числа датчиков, выполнения функций самодиагностирования и использования их без значительных дополнительных перестроек как системы с обратными связями по выбранным критериям управления.

В электронных, микропроцессорных СЗ применяется модуль зажигания, состоящий из двухканального электронного коммутатора и двух двухвыводных или одной четырехвыводной катушки зажигания. Система зажигания не имеет подвижных деталей и поэтому не требует обслуживания. Управление зажиганием осуществляется контроллером (микропроцессором), использующим информацию о режиме работы двигателя, получаемую от датчиков системы управления двигателем.

В системе зажигания применяется метод распределения высокого напряжения, называемый методом «холостой искры».

Распределение зажигания по цилиндрам здесь достигается с помощи двух двухвыводных катушек, высоковольтные выводы катушек соединены со свечами разных цилиндров. Цилиндры двигателя объединены в пары 1-4 и 2-3, и искрообразование происходит одновременно в двух цилиндрах: в цилиндре, в котором происходит такт сжатия (рабочая искра), и в цилиндре, в котором происходит такт выпуска (холостая искра). В цилиндре где происходит такт сжатия свеча подожжет рабочую смесь, а в цилиндре, где происходит такт выпуска искра пропадет впустую (холостая искра).

В связи с постоянным направлением тока в первичной и вторичной обмотках, ток искрообразования одной свечи всегда протекает с центрального электрода на боковой, а второй – с бокового на центральный.

Прямое зажигание. В микропроцессорных системах зажигания наряду с модулями зажигания применяют прямое зажигание. Эта система использует индивидуальную катушку зажигания для каждого цилиндра. Катушки установлены на свечах зажигания. Использование индивидуальной катушки для каждой свечи гарантирует, что время нарастания тока при низкой индуктивности первичной обмотки будет очень малым. А это обеспечит высокое вторичное напряжение и будет создан искровой разряд со значительной энергией. Катушки, работающие в составе современных электронных и микропроцессорных систем зажигания с накоплением энергии в индуктивности, обеспечивают высокие выходные характеристики:

- максимальное вторичное напряжение до 35 кВ;
- скорость его нарастания >700 В/мкс;
- суммарная длительность фаз искрового разряда 2,0...2,5 мс;
- энергия искрового разряда 80...100 мДж.

Высокий уровень вторичного напряжения и параметров искрового разряда способствует выполнению жестких требований, предъявляемых к современному автомобильному двигателю по экономичности и токсичности. Повышение скорости нарастания вторичного напряжения делает систему зажигания менее чувствительной к нагарообразованию на тепловом конусе искровой свечи. Однако при этом на 20...30% возрастает пробивное напряжение на свечах, что объясняется соизмеримостью времени формирования искрового разряда в свече со временем нарастания на ней вторичного напряжения. При большом запасе по вторичному напряжению это не принципиально [10, 11].

#### 1.3. ДАТЧИКИ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Датичик Холла состоит из элемента Холла, электронной усилительной микросистемы и магнитной системы. Работа элемента Холла основана на использовании эффекта Холла, заключающегося в следующем явлении. Через пластину металла или полупроводника про-

текает электрический ток. Если при этом под прямым углом на пластину воздействует магнитное поле, то по третьей геометрической оси возникает электрическое напряжение, которое пропорционально воздействию магнитного поля. Однако напряжение Холла также зависит от удельной постоянной материала — постоянной Холла. Кроме того, возможности применения материалов определяются так называемой подвижностью электронов. Наиболее подходящим технологически и конструктивно материалом является кремний с постоянной Холла, равной 108 мс<sup>3</sup>/(A·c), подвижностью электронов, равной 1350 см<sup>2</sup>/(B·c).

Датчик Холла должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1. В элементе Холла должно быть создано напряжение Холла, достаточно высокое для надежной обработки сигнала.
- 2. Это напряжение должно быть усилено и сформировано так, чтобы в дальнейшем управление осуществлялось непосредственно с выхода элемента Холла.
- 3. Встроенный стабилизатор напряжения должен создавать независимый от возможных колебаний напряжения питания сигнал датчика.
- 4. Термическая устойчивость датчика должна обеспечивать нормальную работу при температуре окружающей среды от -40 до +125 °C.
- 5. Стабильность срабатывания и отпускания должна быть высокой. При этом смещение момента зажигания должно быть не более  $1,5^{\circ}$ , а в некоторых случаях даже не более  $0,5^{\circ}$  во всем температурном диапазоне.

Датчик Холла в отличие от магнитоэлектрического датчика обладает следующими преимуществами: форма и амплитуда сигнала не зависят от частоты вращения коленчатого вала двигателя; время нарастания и спада выходного сигнала составляют доли микросекунды. Датчик работает в широком диапазоне напряжения питания (4,5-18 В) при силе тока нагрузки до 20 мА; получил обозначение 40.3706.800.

В его состав входят микросхема типа К116КП3 и магнитная система на ферритобариевом литом магните. Электрическая схема микросхемы К116КП3 датчика приведена на рис. 1.14. Сигнал с элемента Холла усиливается однокаскадным дифференциальным усилителем (VT13, VT14, VT16, VT17).

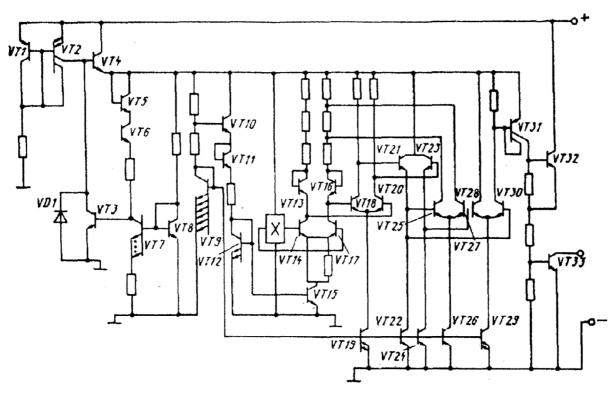


Рис. 1.14. Электрическая схема микросхемы К116КПЗ датчика 40.3706.800

Усиленный сигнал поступает на триггер Шмитта (VT18, VT20), который управляет выходным усилителем (VT21, VT23, VT25, VT27, VT28, VT30). Сигнал с выходного усилителя поступает на выходной каскад (VT31, VT32, VT33) и далее – на выход. Для обеспечения работоспособности датчика в диапазоне 4,5-18 В применен транзисторный стабилизатор напряжения (VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6, VT7, VT8), в котором в качестве опорного напряжения используется напряжение, соответствующее ширине запрещенной зоны кремния. Для получения стабильного по температуре порога срабатывания микросхемы датчика предусмотрены термокомпенсационный каскад (VT9, VT10, VT11, VT12) и стабилизатор тока (VT19, VT22, VT24, VT26 и VT29).

Датчик на магниторезисторе основан на использовании магниточувствительного элемента, содержащего отрезок тонкой (около 0,3 мм) ферромагнитной проволоки с сигнальной многовитковой обмоткой. Проволока специальным образом обработана и поэтому имеет два устойчивых магнитных состояния. При помещении ее в знакопеременное магнитное поле (направленное вдоль проволоки) она будет скачком менять свое магнитное состояние, импульс ЭДС который может достигать 10 В. В настоящее время разработаны отечественные чувствительные элементы со смещенной частной петлей гистерезиса (СЧПГ). Элементы СЧПГ обладают преимуществами. Так, при меньших в 2-3 раза длине проволоки и магнитном поле напряжение от СЧПГ достигает 7-8 В. По сравнению с датчиком Холла датчик на магниторезисторе с СЧПГ не требует подачи питания и формирует выходной сигнал большой амплитуды. Кроме того, магниторезистор сохраняет работоспособность при более низких рабочих температурах (до -60°C).

Проведенные исследования показали, что для нормальной работы чувствительных элементов с СЧПГ на них необходимо воздействовать полем различного направления. Причем вектор магнитной индукции должен быть направлен вдоль оси элемента. Напряженность воздействующего поля имеет верхнюю и нижнюю границы, которые определяют нормальную работу элемента. Элемент устойчиво работает при знакопеременных полях, имеющих напряженность в диапазоне 560-2000 А/м. При этом на выходе генерируются импульсы различной полярности с амплитудой напряжения 7-8 В. Сопротивление нагрузки, при котором выделяется максимальная мощность, равно 3,2 кОм. Длительность импульсов не превышает 25 мкс, а передний фронт 5 мкс. Уровень создаваемых помех не более 0,5 В. Параметры импульса не изменяются при работе элементов в переменных полях при частоте до 3000 Гц. Для сопряжения датчика на магниторезисторе с серийным коммутатором должен быть применен специальный формирователь на триггере Шмитта.

Таким образом, датчик на магниторезисторе с СЧПГ может с успехом применяться как датчик момента зажигания наряду с магнитоэлектрическими датчиками Холла или взамен их. Выбор типа датчика зависит от стоимости, технологичности и функциональных возможностей.

Датики угловых импульсов и начала отсчета являются важнейшим элементом систем управления с цифровой обработкой информации. Применяемые датчики начала отсчета (ДНО) и угловых импульсов (ДУИ) служат для уменьшения погрешностей системы от маховика двигателя, специального диска, жестко связанного с коленчатым валом, имеют чувствительные элементы с различными принципами действия: на основе элементов Холла и Виганда, фото-электрический и фоторезистивный с прерыванием светового луча, токовихревой или индукционный.

При использовании эффекта Виганда, индуктивного и трансформаторного принципа действия требуется предусмотреть специальный диск, изготовленный из ферромагнитных материалов (ферритов бария или никель-цинковых ферритов), а установка чувствительного элемента токовихревого типа предполагает наличие практически постоянного воздушного зазора, что существенно ограничивает возможности применения датчиков.

Исследования датчиков ДНО и ДУИ показали, что наиболее приемлем для эксплуатации на автомобиле датчик генераторного типа, у которого в режиме ДУИ чувствительный элемент вырабатывает периодические сигналы, близкие к синусоиде, а в режиме ДНО – одиночный импульс.

Работает датчик следующим образом. Постоянный магнит датчика образует поток рассеяния и рабочий поток. Рабочий поток проходит через сердечник датчика, воздушный зазор  $\delta$  (между сердечником и венцом маховика), венец и воздушное пространство от венца до второго полюса магнита. Поток в наконечнике зависит от прово-

димости зазора  $\delta$ , которая меняется по мере поворота маховика. Магнитная проводимость  $G_3$  зазора

$$G_{3} = G_{0} + G_{0} \alpha f(\alpha), \tag{1.1}$$

где  $G_0$  — постоянная составляющая;

a — амплитуда;

 $f(\alpha) = \sin(2\pi nzt)$  — функция, выражающая закономерность изменения переменной составляющей;

n — частота вращения;

**z** – число зубьев венца маховика. Изменяющийся магнитный поток наводит в сигнальной катушке ЭДС.

$$e = -w \frac{d\Phi_a}{dt} = KF w \alpha G_0 \sin \omega t, \qquad (1.2)$$

где w – число витков сигнальной катушки;

K — коэффициент, зависящий от магнитных проводимостей датчика (проводимость между зубчатым диском и полюсом магнита и т. д.);

F – намагничивающая сила магнита;

*w* – частота изменения рабочего потока.

Распределение изменения рабочего потока по оси катушки неодинаково. У полюса магнита датчика поток практически не изменяется, а следовательно, не наводится ЭДС в витках катушки. Анализ показал, что число витков катушки ДНО и ДУИ можно сократить на 15-25 % при сохранении основных и выходных параметров датчика. При этом уменьшается выходная мощность датчика за счет уменьшения внутренних реактивного и активного сопротивлений. При увеличении зазора между датчиком и маховиком повышается магнитное сопротивление и уменьшается проводимость  $G_0$ , а следовательно,  $G_2$ , что приводит к уменьшению ЭДС.

Выбор материала корпуса датчика тоже имеет большое значение, так как ферромагнитный корпус увеличивает поток рассеяния и уменьшает в конечном счете сигнал на выходе датчика. Использо-

вание электропроводного (неферромагнитного) корпуса позволяет создать эффект короткозамкнутого витка и резко увеличивает угол запаздывания при работе датчика в режиме начала отсчета. Следовательно, корпус датчика должен выполняться из неферромагнитного и неэлектропроводного материала.

Датичи давления, используемые в электронных системах зажигания автомобиля, предназначены для обеспечения работы электронных систем управления двигателем. К таким датчикам относятся преобразователи давления в задроссельном пространстве карбюратора и преобразователи атмосферного давления. В настоящее время распространены четыре типа полупроводниковых датчиков давления. Они применяются на автомобилях для работы в цифровых и микропроцессорных системах управления рабочим режимом двигателя и отличаются малыми размерами, высокими надежностью и точностью:

- 1) дифференциального давления (разрежения), позволяющие измерять превышение давления в задроссельном пространстве над атмосферным;
- 2) абсолютного давления, измеряющие давление в системе по отношению к внутреннему, опорному «нулевому» уровню;
- 3) барометрического давления, измеряющие атмосферное давление по отношению к опорному «нулевому» уровню;
- 4) измеряющий положительное давлениё (до 0,1 кПа) в воздухозаборном канале двигателя с турбонаддувом.

Все типы перечисленных датчиков имеют различные рабочие диапазоны давления и предельно допустимые значения погрешностей, обусловливаемых совместным воздействием таких факторов, как нестабильность, воспроизводимость, гистерезисные потери и взаимозаменяемость.

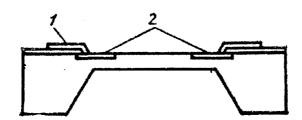
Принцип измерения давления в датчиках перечисленных типов основан на использовании пьезорезистивного преобразования механических напряжений в кремнии в электрические, что позволяет конструировать малогабаритные чувствительные элементы датчика

с применением интегральных биполярных элементов массовой технологии.

На рис. 1.15 показан чувствительный элемент полупроводникового датчика давления (разрез однокристального кремниевого элемента, имеющего сформированную методом анизотропного травления выемку, предназначенную для образования на верхней поверхности кристалла диафрагмы).

На верхней поверхности элемента из кремниевой монокристальной подложки проводимостью N-типа сформированы пьезорезисторы P-типа, расположенные с перекрытием положения диафрагмы и соединенные по схеме моста Уитстона.

Такое расположение позволяет размещать подводящие контактные площадки за пределами диафрагмы чувствительного элемента, в то же время части пьезорезисторов, обладающие высоким сопротивлением, находятся внутри диафрагмы, где механическое напряжение, возникающее при деформации диафрагмы, максимально.



*Рис. 1.15*. Чувствительный элемент полупроводникового датчика давления: 1 – выводы; 2 – пьезорезисторы

При надлежащем ориентировании пьезорезисторов сопротивление соседних резисторов будет изменяться в противоположных направлениях, тогда как сопротивление противоположных резисторов будет оставаться одинаковым. Поэтому при приложении к мосту разности потенциалов на противоположных концах его образуется электрическое напряжение, которое будет изменяться (при правильном выборе размеров диафрагмы) пропорционально изменению давления.

В связи с тем, что уровень сигнала, получаемого на выходе чувствительного элемента, невелик (0-50 мВ) и нестабилен при изменении температуры, датчики, применяемые в системах зажигания, включают, как правило, схему температурной компенсации, а некоторые и операционный усилитель. Последний нормирует выходной сигнал и представляет собой специальную монолитную интегральную схему, устанавливаемую в гибридный элемент в корпусе датчика давления.

Вырабатываемые датчиком давления аналоговые сигналы в дальнейшем преобразуются аналого-цифровым преобразователем в цифровые сигналы, удобные для обработки и устойчивые по отношению к колебаниям напряжения источника питания.

# 1.4. СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Ввиду непостоянства напряжения питания в сети электроснабжения автомобиля, а также возможности работы без аккумуляторной батареи и при аномальных режимах в цепи питания необходимо принимать специальные меры по защите электронных элементов от перенапряжения.

Системы зажигания должны работать в широком диапазоне напряжения питания (0,9-1,25 номинального значения, причем в режиме пуска 0,5-1,0 номинального).

Системы зажигания должны работать при воздействии импульсных напряжений сети при нормальных режимах эксплуатации. Уровень этих напряжений и их длительность оговорены в РТМ 37.003.031-83 «Изделия автомобильные, электронные. Общие технические требования». При номинальном напряжении 12 В импульсное напряжение может достигать 42 В при длительности воздействия до 10 мкс, 28 В при длительности до 0,3 мс; 23 В при длительности воздействия до 10 мс.

Кроме того, системы зажигания должны сохранять работоспособность после воздействия импульсных перенапряжений в сети автомобиля в аномальных режимах эксплуатации (при срабатывании предохранителей, при пуске двигателя от посторонних источников тока, при отключении аккумуляторной батареи по технологическим или эксплуатационным причинам). Регламентируемые РТМ уровень напряжения импульсов и их длительность приведены ниже в табл. 1.1 [3].

Таблица 1.1

Длительность	3*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	0.3	10	300
импульса, мс	3 10	10	0,5	10	300
Уровень					
напряжения	150	112	62	42	21
импульса, В					

Импульсы перенапряжений малой длительности (до 10 мкс) обусловлены использованием источников малой мощности с полным внутренним сопротивлением в пределах 4-40 Ом. Основной возможный результат их воздействия — электрический пробой электронных изделий и сбои в работе цифровых систем. Импульсы большой длительности обусловлены переходными процессами в системе электроснабжения и характеризуются внутренним сопротивлением около 1 Ом.

Обычно для обеспечения работоспособности электронных систем зажигания выбирают элементную базу, работоспособную по ТУ при напряжениях до 150 В. В тех случаях, когда это по тем или иным причинам выполнить невозможно, применяют стабилизированные с помощью, например, низковольтных стабилитронов системы питания.

Выходные каскады транзисторных систем зажигания (системы с накоплением энергии в магнитном поле катушки зажигания) необходимо защищать от еще более значительных дополнительных перенапряжений, возникающих в первичной цепи катушки зажигания. Необходимость защиты участка коллектор — эмиттер мощного транзистора выходного каскада от перенапряжений обусловлена значи-

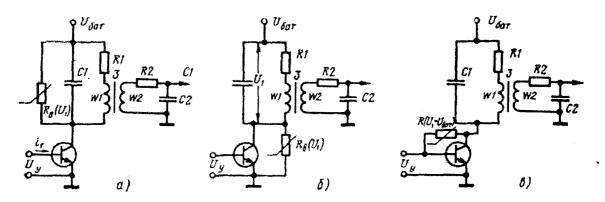
тельным напряжением на участке эмиттер-коллектор. Несмотря на специально принимаемые меры (увеличенный коэффициент трансформации катушки зажигания, малая индуктивность ее первичной обмотки, подключение параллельно первичной обмотке специального конденсатора и т.п.), в эксплуатации возникают случаи, когда на участке эмиттер-коллектор выходного транзистора напряжение может превышать допустимое.

Напряжение в сети автомобиля кратковременно в нормальных режимах может превышать в 4 раза номинальное значение. В этом случае, вследствие неполной магнитной связи между первичной и вторичной обмотками катушки зажигания, существенно увеличиваются импульсы напряжения при переходном процессе в первичной цепи системы зажигания. Это напряжение значительно превышает допустимое напряжение для высоковольтного транзистора, и он выходит из строя. Для исключения пробоя выходного транзистора применяют различные элементы защиты (стабилитроны, варисторы и т.п.) с нелинейной зависимостью внутреннего сопротивления от напряжения.

Схемы включения этих элементов самые разнообразные, основные схемы приведены на рис. 1.16, а их нелинейные характеристики — на рис. 1.17. Варистор (рис. 1.17, a) имеет симметричную нелинейную характеристику при изменении полярности напряжения. В схемах (рис. 1.16,  $\delta$  и a) при применении стабилитрона под сопротивлением  $R_{\rm B}$  подразумевают внутреннее сопротивление стабилитрона при прямом и обратном направлениях тока в цепи, состоящей из последовательно и встречно соединенных стабилитрона и диода (рис. 1.17, a). Последний препятствует протеканию тока через стабилитрон при открытом транзисторе.

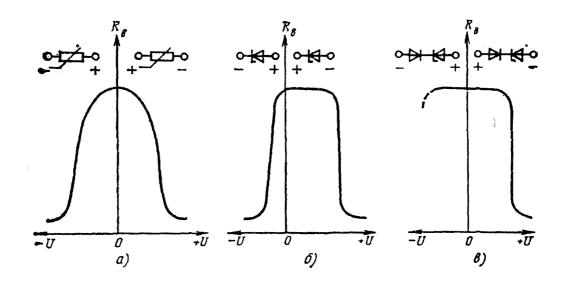
Следует отметить, что первичный конденсатор C1 может быть включен, как показано на рис. 1.16, или параллельно участку эмиттер – коллектор транзистора, а первичная обмотка катушки зажигания –

в цепь коллектора или в цепь эмиттера транзистора. Часто напряжение на стабилитроне, при котором начинается режим пробоя — нормальный режим работы стабилитрона, заменяют напряжением стабилизации  $U_{cr}$ . Стабилитрон соответствующей мощности выбирают так, чтобы  $U_{cr} < U_{эк}$  доп  $(U_{эк}$  доп — максимально допустимое напряжение на участке эмиттер — коллектор запертого транзистора).



*Рис. 1.16.* Схемы включения стабилитрона и варистора в выходном каскаде транзисторных систем

Работа цепи защиты, выполненной по схеме (см. рис. 1.16,  $\delta$ ), может быть объяснена следующим образом. Увеличение напряжения первичной обмотки катушки зажигания до  $U_1 < U_{cr} - U_{\delta}$  не приводит к пробою стабилитрона, и напряжение  $U_1$  ограничивается. При дальнейшем увеличении напряжения первичной обмотки катушки до  $U_1 \ge U_{cr} - U_{\delta}$  стабилитрон пробивается и через него начинает протекать ток.



*Рис.* 1.17. Зависимости сопротивления  $R_{\rm E}$  различных элементов защиты от приложенного напряжения

В результате этого напряжение на первичной обмотке катушки зажигания и, следовательно, на участке эмиттер — коллектор транзистора ограничивается (примерно на уровне  $U_{\rm ct}$ ).

Цепь защиты по схеме (см. рис. 1.16, a) работает аналогично, только стабилитрон выбирают из условия  $U_{cr}+U_{6}+U_{д} \leq U_{эк}$  доп ( $U_{д}$  – падение напряжения на встречном диоде при прямом токе, равном  $I_{cr}$ ) и напряжение на транзисторе ограничивается примерно на уровне  $U_{cr}+U_{6}+U_{\pi}$ .

Иногда для уменьшения рассеиваемой в стабилитроне мощности последовательно с ним включают резистор небольшого сопротивления.

В схеме (см. рис. 1.16,  $\theta$ ) элемент защиты включен параллельно коллекторному переходу транзистора. После запирания транзистора и достижения  $U_1$  значения  $U_{cr}^+ U_6^+ U_{69}$  ( $U_{69}^-$  напряжение на эмиттерном переходе запертого транзистора) стабилитрон пробивается и через эмиттерный переход транзистора начинает протекать ток базы. Транзистор открывается и ограничивает напряжение на участке эмиттер – коллектор примерно до значения  $U_{cr}^+ U_{69}^-$ .

Эта схема имеет ряд преимуществ по сравнению с предыдущими: лучшая эффективность ограничения напряжения, значительно меньшая мощность, рассеиваемая элементом защиты.

Освоение промышленностью специального мощного высоковольтного транзистора, предназначенного для работы в системе зажигания, позволяет широко применять эту схему защиты. Иногда в схеме защиты вместо одного высоковольтного стабилитрона используют один низковольтный стабилитрон, включенный через резистивный или емкостной делитель, либо цепочку из нескольких последовательно включенных низковольтных стабилитронов.

Варистор в качестве элемента защиты в схемах (см. рис. 1.16) работает аналогично. При рассмотрении работы варистора его заменяют гипотетическим стабилитроном с напряжением стабилизации  $U_{cr}=R_{\rm B}(U_{cr})I_{cr}$  (где  $R_{\rm B}$  — сопротивление варистора). Меньшая, чем у стабилитрона, нелинейность сопротивления  $R_{\rm B}$  варистора приводит к тому, что на участке коллектор эмиттер транзистора могут быть приложены несколько большие импульсы напряжения.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Каким основным существенным требованиям должны удовлетворять системы зажигания?
- 2. Какие преимущества имеют контактно-транзисторные системы зажигания перед контактными СЗ?
- 3. На какие два класса подразделяются бесконтактные системы зажигания?
- 4. Какие типы датчиков используются в современных бесконтактных системах зажигания?
- 5. Из каких каскадов усиления сигнала с датчика состоит схема коммутатора?
- 6. Для чего служит формирующий каскад коммутатора БСЗ?
- 7. Для чего служит выходной каскад БСЗ?
- 8. Как работает схема блока времени накопления в коммутаторах БСЗ с нормируемым временем накопления энергии?
- 9. За счет какого узла в коммутаторе БСЗ осуществляется нормирование времени накопления?
- 10. С какой целью необходима защита выходного каскада БСЗ от перенапряжения?
- 11. Перечислите способы защиты от перенапряжения выходных каскадов транзисторных БСЗ.

# 2. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТРАНЗИСТОРНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Замена механического прерывателя классической системы батарейного зажигания транзисторным ключом (коммутатором) обусловила значительные особенности протекания рабочего процесса системы зажигания, вследствие чего предъявляются дополнительные требования к параметрам катушки зажигания и ее первичной цепи.

Для анализа рабочего процесса транзисторных систем зажигания несущественно, как управляется транзистор выходного каскада — механическим прерывателем или бесконтактной схемой. Рабочие процессы контактно-транзисторной системы зажигания и выходного каскада бесконтактной системы имеют много общего, поэтому анализ рабочего процесса контактно-транзисторной системы зажигания полностью применим и к выходному каскаду бесконтактной транзисторной системы, а также цифровой и микропроцессорной систем. Его можно использовать и при изучении системы зажигания с бесконтактным автогенератором.

Рабочий процесс транзисторной системы зажигания для анализа целесообразно рассматривать как сумму более простых процессов:

- протекающих в первичной цепи катушки зажигания при нарастании первичного тока;
  - запирания транзистора;
- протекающих в первичной и вторичной цепях катушки зажигания после запирания транзистора до начала пробоя искрового промежутка;
  - пробой искрового промежутка свечи (разрядные).

Целесообразно предварительно рассмотреть процессы коммутации транзисторным ключом тока в индуктивной и индуктивно-

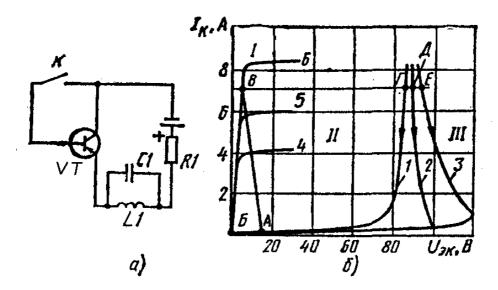
емкостной нагрузке и эквивалентные схемы основных электронных компонентов системы зажигания.

# 2.1. ОСОБЕННОСТИ КОММУТАЦИИ ТОКА ТРАНЗИСТОРОМ ПРИ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКЕ

В системе зажигания транзистор используется главным образом в режиме ключа; в таком режиме работает выходной каскад бесконтактной транзисторной системы зажигания ИЛИ контактнотранзисторная система зажигания. На рис. 2.1 представлена схема транзисторного ключа при индуктивно-емкостной нагрузке, которая включена в цепь эмиттер – коллектор транзистора последовательно с источником питания. Транзисторный ключ можно характеризовать следующими параметрами: силой тока коммутации (ток разрыва), падением напряжения на открытом ключе, временем коммутации, допустимым напряжением на закрытом ключе, зоной допустимых вольтамперных характеристик.

Сила тока коммутации транзисторными ключами, в которых применяются современные мощные транзисторы, составляет 5-10 A (предельное значение силы тока 12-15A).

Падение напряжения на открытом транзисторном ключе зависит от силы протекающего тока (материала полупроводника и способа изготовления), такая зависимость практически линейна, поэтому вместо падения напряжения можно пользоваться понятием сопротивления насыщения.



*Рис. 2.1.* Схема транзисторного ключа с LC-нагрузкой и динамические вольтамперные характеристики транзистора

Сопротивление насыщения для германиевых транзисторов равно 0,05-0,2 Ом; для кремниевых оно может достигать 0,5 Ом.

Время коммутации тока транзисторным ключом определяется как физическими свойствами транзистора, так и условиями его работы. При активной нагрузке оно зависит от режима цепи управления (эмиттерный переход транзистора) и силы тока коллектора. При индуктивной нагрузке дополнительное влияние может оказывать первичный пробой транзистора. В случае индуктивно-емкостной нагрузки ключа при первичном пробое возникают дополнительные специфические явления, связанные с реактивными свойствами транзистора.

Время открывания транзисторного ключа сравнительно невелико; для высокочастотных транзисторов оно составляет доли микросекунд, а для низкочастотных транзисторов не превышает нескольких микросекунд. После открывания транзистора ток в нагрузке нарастает с постоянной времени, определяемой параметрами нагрузки; для активной нагрузки нарастание тока можно принять мгновенным, а для индуктивной нагрузки это время можно считать равным трем постоянным времени. Время открывания транзистора практически не влияет на нарастание тока в индуктивной нагрузке, характерной для систем зажигания, и его не учитывают.

Время запирания транзистора (закрывание ключа) при активной нагрузке определяется в основном временем жизни носителей тока в базе. Для высокочастотных транзисторов его значение не превышает долей микросекунды, для среднечастотных 5-10 мкс, а для низкочастотных транзисторов оно составляет 30-50 мкс и более.

Для уменьшения времени запирания транзистора (ускорения рассасывания носителей заряда в области базы) применяют специальные схемные решения: шунтируют эмиттерный переход транзистора резистором; вводят источники активного запирания, в результате чего в базу транзистора поступает дополнительный ток и т.д.

Первичную цепь катушки зажигания включают в цепь коллектора или эмиттера транзистора. Если катушка зажигания включена в цепь эмиттера, то транзистор в открытом состоянии находится на границе насыщения. В случае включения катушки в цепь коллектора в зависимости от силы тока базы транзистор может находиться в активной области, на границе насыщения и в насыщении. В зависимости от этого и меняется падение напряжения на нем.

Для систем зажигания характерным является режим ключа на границе насыщения, когда избыточные носители тока в базе отсутствуют и непосредственно после прерывания тока базы, которое здесь и далее принято мгновенным, начинается процесс рассасывания носителей тока в базе и спад тока эмиттера и коллектора транзистора. Ток коллектора при запирании транзистора [1, 3]:

$$i_{R} = I_{p} \exp(-t/\tau_{cn}), \qquad (2.1)$$

где  $\tau_{cn}$  – постоянная времени;

 $I_{p}$  – ток разрыва.

При обрыве цепи базы транзисторного ключа и отсутствии резистора, шунтирующего эмиттерный переход,  $\tau_{cn}$  примерно равна времени жизни носителей тока в базе. При активном запирании закон спада тока коллектора близок к линейному:

$$i_{\rm H} = I_{\rm p} (1 - t/\tau_{\rm cm}).$$
 (2.2)

При активном запирании  $\tau_{cn}$  существенно уменьшается. Величина  $\tau_{cn}$  определяется в основном свойствами транзистора.

Допустимое напряжение определяется следующим образом. На рис. 2.1, б представлено семейство вольтамперных статических характеристик германиевого низкочастотного транзистора ГТ701А. Состояние транзистора в каждый конкретный момент времени можно характеризовать одной точкой на плоскости семейства вольтамперных характеристик – рабочей точкой.

Переход рабочей точки из открытого состояния в закрытое и обратно происходит через активную область. При активной нагрузке при переходе ключа из одного положения в другое рабочая точка транзистора перемещается по прямой АВ; при индуктивной или комплексной нагрузке рабочая точка описывает сложную траекторию.

При индуктивной нагрузке в процессе спада силы тока эмиттера возникает ЭДС, которая с учетом формулы (2.2) определяется выражением

$$e_1 = -L(di/dt) = L_1 I_p / \tau_{en}.$$
 (2.3)

Характерно, что эта ЭДС возникает в момент прерывания тока базы, т.е. практически мгновенно. Значение ЭДС определяется только индуктивностью катушки и силой тока разрыва, а также временем запирания транзистора. Если ЭДС достигает таких значений, при которых возможен первичный пробой транзистора, она ограничивается граничным напряжением транзистора т.е.

$$e_1 = U_{\alpha} - U_{\text{GaT}}, \tag{2.4}$$

где  $U_{\alpha}$  — граничное напряжение транзистора, называемое иначе напряжением первичного пробоя.

Напряжение  $U_{\infty}$  зависит от условий запирания транзистора. У транзистора напряжение пробоя участка эмиттер — коллектор всегда меньше, чем напряжение пробоя диода база — коллектор, что объясняется эффектом лавинного умножения носителей тока в коллекторном переходе. Наименьшее значение граничного напряжения бу-

дет иметь при обрыве цепи базы (кривая 1, рис. 2.1,  $\delta$ ); в этом случае оно обозначается  $U_{\alpha 0}$ . При активном запирании транзистора напряжение возрастает (кривая 2 и 3).

Если параметры транзистора и нагрузки таковы, что возникающая в катушке при запирании транзистора ЭДС достаточна для достижения граничного напряжения транзистора, т.е.:

$$L_1 I_p / \tau_{cm} > U_{\alpha} - U_{6ar}, \qquad (2.5)$$

то движение рабочей точки транзистора, представляющее собой его динамическую вольтамперную характеристику, при периодической коммутации тока базы (при индуктивной нагрузке) будет следующим: после замыкания контактов прерывателя рабочая точка перемещается из точки А (состояние отсечки) в точку Б и затем, по мере нарастания силы тока, в точку В, в которой происходит прерывание тока базы.

В начальный момент времени после прекращения тока базы рабочая точка транзистора перемещается из точки В в точку Г и затем по мере запирания транзистора следует по участку характеристики соответствующему лавинному процессу, вновь в точку А.

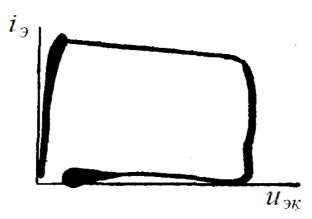
Перемещение рабочей точки из точки А в точку Б и из точки В в точку Г происходит мгновенно в результате образования ЭДС в катушке. Перемещение рабочей точки из точки Б в точку В описывается во времени уравнением (2.1). Для определения времени запирания транзистора с индуктивной нагрузкой достаточно заменить участок эмиттер — коллектор транзистора источником постоянного напряжения  $U_{\alpha}$ , равного граничному напряжению транзистора. При этом процесс спада тока эмиттера транзистора после прерывания тока базы описывается уравнением

$$i = I_{p} \exp(-R_{1}t/L_{1}) - \frac{U_{0} - U_{0sT}}{R_{1}} [1 - \exp(-R_{1}t/L_{1})], \qquad (2.6)$$

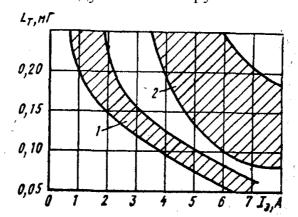
где  $R_1$  — активное сопротивление нагрузки ключа.

После спада тока эмиттера до нуля напряжение эмиттер — коллектор уменьшается до  $U_{\text{бат}}$ .

На рис. 2.2 динамические вольтамперные характеристики ключа с индуктивной нагрузкой.



*Рис. 2.2.* Динамические вольтамперные характеристики ключа с индуктивной нагрузкой

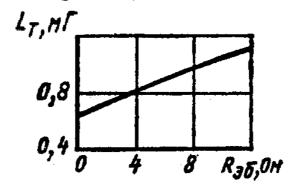


*Рис. 2.3.* Зависимость кажущейся индуктивности транзистора от силы тока эмиттера транзистора для группы транзисторов:

 $1 - \Gamma T701A$ ;  $2 - \Pi 210A$ 

При запирании транзисторного ключа с LC-нагрузкой (например, при наличии первичного конденсатора в системе зажигания) одновременно с рассмотренным процессом запирания ключа с индуктивной нагрузкой будет происходить обмен энергией между реактивными элементами схемы. Если при этом индуктивность нагрузки мала и возникающая в ней ЭДС недостаточна для пробоя транзистора, то LC-нагрузка не влияет на процесс спада тока эмиттера транзистора, который и при такой нагрузке изменяется в соответствии с выражением (2.2). При выполнении условия (2.5) транзистор существенно влияет на характер спада тока в LC-нагрузке. Анализ процесса запи-

рания позволил установить, что транзистор в зоне первичного пробоя обладает реактивными свойствами индуктивного характера, которые можно характеризовать параметром «кажущаяся индуктивность транзистора». Это формальный аналог, не соответствующий понятию индуктивности в магнитных цепях, Однако он позволяет оценить степень реактивности транзистора. На рис. 2.3 приведены зависимости индуктивности L<sub>т</sub> транзистора от силы тока эмиттера, протекающего до момента прерывания тока базы для группы низкочастотных транзисторов ГТ701А. Кажущаяся индуктивность транзистора существенно зависит от силы тока эмиттера (протекающего до момента прерывания тока базы), а также от напряжения база — эмиттер и сопротивления в цепи базы (рис. 2.4).



*Рис. 2.4.* Зависимость индуктивности транзистора от сопротивления резистора, шунтирующего эмиттерный переход

Для закрытого состояния (режим отсечки) транзистора допустимое напряжение  $U_{\rm 9K~доп}$  также зависит от условий запирания. При обрыве цепи базы допустимое напряжение наименьшее; В большинстве случаев минимальное напряжение граничного напряжения  $U_{\alpha}$  транзистора оговаривается в технической документация на него. В этом случае при запирании транзистора, напряжение ключа не должно превышать минимально допустимого напряжения  $U_{\alpha}$ . При шунтировании эмиттерного перехода резистором или при активном запирании допустимое напряжение эмиттер — коллектор на запертом транзисторе возрастает. Для некоторых транзисторов оговариваются не только допустимые значения тока и напряжения, но и зона, за пределы кото-

рой не должна выходить рабочая транзистора при его запирании. Это важнейшие параметры транзисторного ключа, обеспечивающие надежную работу транзистора в системах зажигания и зависящие от многих факторов. Напряжение на закрытом ключе для обеспечения надежности не должно превышать допустимого уровня и действовать дольше оговоренного в ТУ времени. Большинство современных транзисторов не может работать в режиме граничного напряжения, поэтому такой режим должен быть исключен при проектировании системы зажигания. Вместе с тем такие транзисторы могут быть разработаны, и анализ подобного режима работы представляет определенный интерес [3, 6].

#### 2.2. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

При анализе электрических цепей, содержащих электронные компоненты (диоды, транзисторы и т.д.), принято заменять их эквивалентными схемами замещения. В зависимости от специфики схем, характера протекающих токов и анализируемых цепей могут рассматриваться различные, более или менее сложные схемы замещения. Ниже приведены упрощенные эквивалентные схемы замещения, предназначенные специально для анализа процессов в системах зажигания. При их составлении не учитывались частотные свойства электронных приборов, собственные емкости переходов диодов и транзисторов и т.д., так как для режимов, характерных для систем зажигания, эти свойства несущественны.

Для анализа переходных процессов на ЭВМ каждый, из рассматриваемых ниже приборов может быть заменен нелинейным резистором с определенной вольт-амперной характеристикой.

Схемы замещеия диода. Режимы, при которых полупроводниковые диоды используются в системах зажигания, характеризуются выходом рабочей точки на линейные участки вольтамперных характеристик диода. При прямом включении сопротивление диода невелико; при обратном включении оно может достигать больших значений.

В эквивалентной схеме системы зажигания диод заменяется постоянным резистором, сопротивление которого определяется по формуле:

$$R_{
m mp}=U_{
m np}/I$$
 или  $R_{
m ofp}=U_{
m ofp}/I_{
m ofp}.$ 

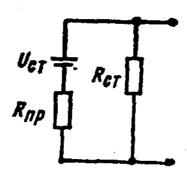


Рис. 2.5. Эквивалентная схема стабилитрона и варистора

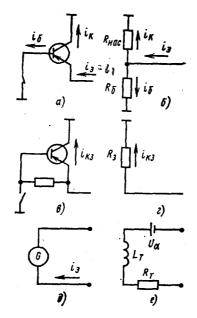


Рис. 2.6. Схемы включения транзистора и их эквивалентные схемы

Значения напряжения и силы тока для такого расчета можно взять из паспортных или справочных данных диода.

Схема замещения стабилитрона. В закрытом состоянии (при отрицательной полярности напряжения) стабилитрон так же, как и диод, может быть представлен резистором, сопротивление которого определяет наклон вольтамперной характеристики. После пробоя стабилитрона ток, проходящий через стабилитрон в прямом направлении, может значительно возрасти при мало изменяющемся напряжении. В этом состоянии стабилитрон можно представить экви-

валентной схемой замещения (рис. 2.5), в которой постоянное напряжение источника равно напряжению стабилизации  $U_{\rm cr}$ , заданному в технической документации на стабилитрон. Резистор  $R_{\rm np}$  учитывает динамическое активное сопротивление стабилитрона в состоянии лавинного пробоя. Сопротивление этого резистора существенно зависит от силы тока, протекающего через стабилитрон, т.е. характеристика его нелинейна. При силе тока, равной нескольким десяткам миллиампер, сопротивление резистора  $R_{\rm np} = 100 \div 400$  Ом, при токе большей силы оно уменьшается, а при импульсном токе силой 5-10 A равно 1-5 Ом. Для анализа систем зажигания следует ориентироваться на последнее значение как наиболее характерное и считать резистор линейным.

Схемы замещения транзистора. В зависимости от того, в какой зоне находится рабочая точка, возникает или отсутствует первичный пробой транзистора, используются различные схемы замещения (рис. 2.6). На рис. 2.6, а и б представлены схема включения мощного транзистора и ее эквивалентная схема (транзистор заменен двумя резисторами, соответственно для участков эмиттер — коллектор и база — эмиттер), а на рис. 2.6, в и  $\varepsilon$  — схема включения закрытого транзистора и ее эквивалентная схема (резистор имитирует сопротивление участка эмиттер — коллектор в закрытом состоянии). На рис. 2.6,  $\delta$  приведена эквивалентная схема транзистора в процессе запирания без пробоя при нахождении рабочей точки в активной зоне. Транзистор заменен генератором тока; сила тока снижается линейно за время  $\tau_{cn}$ , определяемое частотными свойствами транзистора и условиями его запирания.

На рис. 2.6, *е* дана схема замещения транзистора для процесса запирания при возникновении первичного пробоя. Транзистор заменен двухполюсником, в состав которого входит источник напряжения первичного пробоя. Двухполюсник характеризуется динамическим сопротивлением и кажущейся индуктивностью. Для конкретных расчетов систем зажигания необходимо знать числовые значения пара-

метров схемы замещения. Они могут быть получены из паспортных данных транзисторов следующим образом.

Для схемы (см. рис. 2.6,  $\delta$ ) необходимо знать сопротивления  $R_{\text{нас}}$  и  $R_{\delta}$ . В документации на транзистор приведено сопротивление насыщения или падение напряжения на участке эмиттер – коллектор в режиме насыщения при определенной силе тока. В последнем случае сопротивление насыщения можно определить по известным падению напряжения и номинальной силе тока.

Сопротивление эмиттерного перехода находят умножением сопротивления насыщения на коэффициент усиления транзистора.

Для схемы замещения (см. рис. 2.6, *г*) сопротивление резистора может быть определено на основании опыта или из паспорта, где в некоторых случаях указывается сила тока утечки запертого транзистора при повышенной температуре и соответствующем напряжении. Частное от деления напряжения на силу тока утечки дает значение сопротивления эквивалентного резистора.

Для мощных германиевых транзисторов сопротивление резистора в схеме (см. рис. 2.6,  $\delta$ ) составляет 1-3 кОм при температуре окружающей среды 60-70 °C, при понижении температуры сопротивление указанного резистора более значительно.

Для схемы замещения (рис. 2.6,  $\partial$ ) генератор G с изменяющимся по закону  $i_1 = I_p(1-t/\tau_{cn})$  током необходимо знать время спада тока

коллектора транзистора. В некоторых случаях этот параметр может быть определен из паспортных данных, но чаще его определяют экспериментально.

Для транзисторов ГТ701A время спада тока коллектора в коммутаторе ТК102 составляет 30-50 мкс. Большинство транзисторов является средне- и высокочастотными для них время спада тока составляет 0,5-5 мкс. При активном запирании транзистора время спада можно определить аналитически из выражения

$$\tau_{\rm cu} = \frac{B}{2\pi l_{\rm T}} \ln \frac{l_{\rm 6.\; HaC} - l_{\rm 6.\; pac}}{l_{\rm 6.\; pac}}$$

где  $f_{\rm T}$  — граничная частота коэффициента передачи тока транзистора в схеме с общей базой, приводимая в ТУ на транзистор;

 $I_{6,pac}$  — сила тока базы в режиме насыщения;

 $I_{\text{б.нас}}$  — сила тока базы в режиме «рассасывания» при запирании транзистора.

Для схемы (рис. 2.6, e) необходимо знать напряжение первичного пробоя, динамическое сопротивление и кажущуюся индуктивность. Напряжение первичного пробоя в области токов большой силы при активном запирании близко к граничному напряжению (при обрыве цепи базы), поэтому рекомендуется за напряжение первичного пробоя принимать граничное напряжение. Значение напряжения  $U_{\alpha}$ так же, как и указание на возможность работы транзистора в режиме первичного пробоя, должно содержаться в документации на транзистор, без чего его использование в этом режиме недопустимо. Динамическое сопротивление и индуктивность транзистора определяют экспериментально. При определенных условиях, когда транзистор запирается довольно быстро, его рабочая точка в процессе запирания и отсечки не попадает в область пробоя и энергия, выделяемая в транзисторе, при этих процессах, не превышает нескольких процентов энергии, запасаемой в магнитном поле катушки зажигания, транзистор без существенной погрешности можно замещать переключателем «без потерь» (сопротивление бесконечно большой величины).

Таким образом, при выборе схемы замещения транзистора необходимо учитывать условия его работы в конкретной системе зажигания.

Схема замещения тиристора. При работе в системах зажигания тиристор периодически находится в двух состояниях: закрытом и открытом. В закрытом состоянии к его аноду и катоду приложено постоянное напряжение конденсатора. В открытом состоянии тиристора напряжение на его электродах невелико и через тиристор протекает импульс тока разряда конденсатора. Если тиристор закрыт, ток утеч-

ки, протекающий через него, крайне мал, и это состояние тиристора можно рассматривать как обрыв цепи, т.е. сопротивление его бесконечно велико (разомкнутый ключ). В открытом состоянии тиристора необходимо учитывать активное сопротивление силового участка тиристора, и он может быть заменен резистором. В технической документации на тиристоры приводится не сопротивление открытого прибора, а остаточное напряжение при токе определенной силы. Поскольку для анализа систем зажигания удобнее заменить тиристор резистором, целесообразно определить сопротивление эквивалентного резистора по остаточному напряжению и номинальной силе тока.

Схема замещения варистора. Вольтамперную характеристику варистора при помощи кусочно-линейной аппроксимации удобно представить как характеристику стабилитрона с потерями (рис. 2.7). При этом рассматривается одна, правая, ветвь вольтамперной характеристики варистора при прямом напряжении на нем. Вольтамперная характеристика для обратного направления напряжения на варисторе аналогична, хотя количественные параметры схемы замещения могут быть иными.

Учитывая, что вольтамперная характеристика варистора в области токов большой силы имеет крутизну, которую в первом приближении можно принять постоянной, проведем касательную к характеристике в точке А, лежащей в области токов большой силы (4-6 A); в точке Б пересечения касательной с осью абсцисс проводим вертикаль до пересечения с вольтамперной характеристикой в точке В, через которую проводим из начала координат прямую до пересечения с касательной АБ в точке Г. Ломаная линия ОГА – вольтамперная характеристика гипотетического стабилитрона «с потерями», заменяющего в первом приближении варистор.

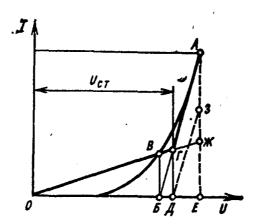


Рис. 2.7. Вольтамперная характеристика варистора

Напряжение стабилизации гипотетического стабилитрона  $U_{cr}$  при принятом способе построения определяется размером отрезка ОД, динамическое сопротивление  $R_{np}$ =БД/ДГ, а сопротивление потерь  $R_{cr}$ =ОД/ДГ.

Более строго определить динамическое сопротивление можно следующим образом: провести из точки А вертикальную прямую АЕ; из отрезка АЕ вычесть отрезок ЖЕ и соединить полученную точку 3 с точкой Д. Тогда  $R_{np}$ =ДЕ/3Е. Однако и указанный выше способ обеспечивает достаточную точность, так как  $R_{cr} >> R_{np}$ . Приведенной аппроксимации соответствует эквивалентная схема замещения варистора (см. рис. 2.5).

Числовое значение параметров схемы замещения получают по известной из документации вольтамперной характеристике варистора.

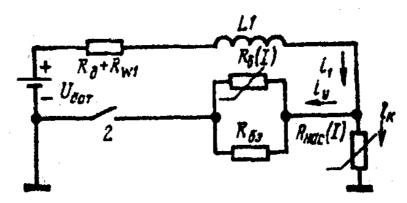
## 2.3. ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКИ КАТУШКИ ЗАЖИГАНИЯ К ИСТОЧНИКУ ПИТАНИЯ

Для рассмотрения процесса нарастания тока в первичной обмотке катушки зажигания можно принять ряд допущений, позволяющих составить схему замещения системы зажигания (рис. 2.8), в частности не учитывать:

- инерционности включения транзистора;
- влияния цепей управления и защиты выходного транзистора;

- влияния вторичной цепи катушки зажигания на процессы в первичной цепи;
  - нелинейности параметров первичной цепи.

Кроме того, при составлении эквивалентной схемы предварительные каскады бесконтактной системы (до выходного каскада) или прерыватель контактно-транзисторной системы зажигания заменены идеальным ключом; транзистор представлен эквивалентной схемой (см. рис. 2.6); катушка зажигания включена в цепь эмиттера транзистора.



*Рис. 2.8.* Эквивалентная схема первичной цели транзисторной системы зажигания на одном транзисторе

После замыкания ключа в первичной цепи начинает нарастать ток, закон изменения которого можно определить решением дифференциального уравнения

$$i_1R_{12} + L_1di_1/dt = U_{6ax}.$$
 (2.7)

Суммарное сопротивление первичной цепи

$$R_{1\Sigma} = R_{w1} + R_{\pi} + \frac{R_{\text{Hac}}R_{6}R_{60}}{R_{\text{Hac}}R_{6} + R_{\text{Hac}}R_{60} + R_{6}R_{60}},$$
(2.8)

где  $R_{69}$  — сопротивление резистора, обычно шунтирующего эмиттерный переход транзистора. На практике сопротивление насыщения  $R_{\text{нас}} \ll R_{6}$  и  $R_{\text{нас}} \ll R_{69}$ , поэтому выражение (2.7) с незначительной погрешностью можно записать так:

$$R_{1\Sigma} = R_{w1} + R_{\pi} + R_{\text{mac}}.$$

Начальные условия для рассматриваемой схемы t = 0,  $i_1 = 0$ . Решение уравнения (2.7) имеет вид

$$i_1 = (U_{6a2}/R_{12})[1 - \exp(-R_{12}t/L_1)].$$
 (2.9)

В транзисторной системе зажигания сила тока в первичной обмотке нарастает по экспоненциальному закону, стремясь к установившемуся значению  $i_1 = U_{\text{бат}}/R_{1\Sigma}$ . Сила установившегося тока определяется в основном сопротивлением  $R_{\text{д}}$  добавочного резистора и сопротивлением  $R_{\text{wl}}$  первичной обмотки катушки зажигания. Сопротивление насыщения  $R_{\text{нас}}$  германиевых транзисторов влияет на силу первичного тока незначительно. Влияние сопротивления  $R_{\text{нас}}$  при использовании кремниевых транзисторов необходимо учитывать, так как оно более существенно.

Сила тока, протекающего через контакты прерывателя или через каскад управления бесконтактной системы зажигания (сила тока управления), может быть определена из выражения

$$i_y = i_1 - i_R = \frac{i_1}{1 + R_6 R_{60}/[R_{\text{Hac}}(R_6 + R_{60})]}$$
 (2.10)

Если принять  $R_{\text{mac}} = R_{\text{бэ}}$ , то

$$i_{y} = \frac{i_{1}}{1 + 0.5B} \,. \tag{2.11}$$

Сила тока управления обычно составляет не более 10-15 % силы первичного тока и не может вызвать дугообразования и заметной эрозии контактов прерывателя. Поэтому в контактно-транзисторной системе зажигания искрогасящий конденсатор, шунтирующий контакты прерывателя, не нужен, так как он уменьшает вторичное напряжение катушки зажигания. Нарастание силы первичного тока сопровождается возникновением ЭДС самоиндукции в первичной обмотке

$$e_1 = U_{\text{5at}} \exp\left(-\frac{R_{1\Sigma}t/L_1}{}\right)$$

и ЭДС взаимоиндукции во вторичной обмотке

$$e_2 = U_{\text{far}} k (w_2/w_1) \exp(-R_{12}t/L_1),$$
(2.12)

где k — коэффициент связи обмоток катушки зажигания,  $k={}^{M}\!\!\!/_{\!\!\sqrt{L_1L_2}}$ 

 $(L_1 \ \text{и} \ L_2 - \text{индуктивности соответственно первичной и вторичной обмоток; } M - взаимоиндуктивность обмоток).$ 

Сила тока в первичной обмотке катушки зажигания будет нарастать до момента начала запирания транзистора после размыкания контактов прерывателя или прекращения тока базы выходного транзистора. Сила тока разрыва  $I_p$  в момент начала запирания транзистора определяется соотношением [1]:

$$I_{p} = \frac{U_{\delta}}{R_{1\Sigma}} \left[ 1 - e^{-\frac{\tau_{3}120}{T_{1}zn}} \right] = \frac{U_{\delta}}{R_{1\Sigma}} \left[ 1 - e^{-\frac{R_{1\Sigma}\tau_{3}120}{L_{1}zn}} \right], \tag{2.13}$$

где  $R_{1\Sigma},\, L_1$  – активное сопротивление, индуктивность первичной цепи;

$$T_{\rm l} = \frac{L_{\rm l}}{R_{\rm l \Sigma}} -$$
 постоянная времени первичного контура;

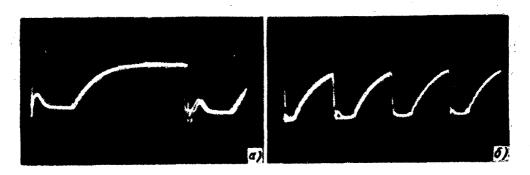
 $au_{_{3}} = \frac{t_{_{p}}}{T}$  – относительное время замкнутого состояния контактов (или относительный угол включенного состояния транзистора);

z – число цилиндров двигателя;

n – частота вращения коленчатого вала двигателя.

Осциллограммы переходного процесса в транзисторной системе зажигания приведены на рис. 2.9.

Сила тока разрыва при малой частоте вращения коленчатого вала двигателя близка к силе тока короткого замыкания; сила тока разрыва уменьшается при возрастании частоты вращения коленчатого вала двигателя. Если при малой частоте вращения сила тока разрыва зависит в основном от суммарного сопротивления первичной цепи, то при больших частотах определяющей является индуктивность первичной обмотки катушки зажигания.

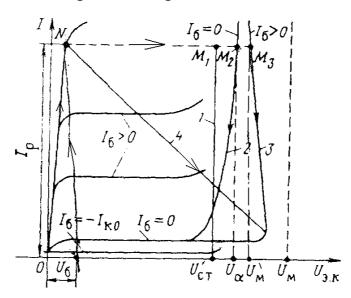


 $Puc.\ 2.9.\$ Осциллограмма нарастания силы тока в первичной цепи катушки зажигания с транзисторным коммутатором при малой и средней частотах вращения  $n_e$ 

#### 2.4. ПРОЦЕСС ЗАПИРАНИЯ КОММУТАЦИОННОГО ТРАНЗИСТОРА

После размыкания контактов прерывателя происходит процесс запирания транзистора. На переходный процесс в рассматриваемой системе с индуктивной нагрузкой при определенных условиях значительное влияние оказывают вольтамперные характеристики транзистора.

После базы механического прерывания тока или подачи на базу запирающего импульса ток в цепи эмиттерколлектор в начальный момент не может измениться скачком, так как тому препятствует э.д.с. самоиндукции, возникающая в индуктивности. Поэтому при запирании транзистора напряжение  $U_{3,\kappa}$  на эмиттерколлекторном переходе почти мгновенно (за 1–3×10<sup>-6</sup>сек) возрастает согласно вольтамперной характеристике до величины обеспечивающей тот же ток, что был в этой цепи до подачи запирающего импульса в управляемой цепи (рис. 2.10). Рабочая точка системы практически из положения N в зависимости от характера запирания и защиты мгновенно переместится в положение М2, М3 и далее будет следовать в соответствии с вольтамперной характеристикой. Кривая 2 соответствует пассивному запиранию ( $I_6 = 0$ ); кривая 3 — напряжению эмиттер-коллекторного перехода при активном запирании и без его защиты; кривая 1 — напряжение эмиттер-коллекторного перехода, защищенного стабилитроном. Если параллельно эмиттер-коллекторному переходу транзистора или первичной обмотке катушки зажигания включается емкость, то напряжение возрастает не мгновенно (кривая 4). При пассивном запирания транзистора (кривая 2) время этого процесса существенно увеличивается, обычно в несколько раз, что ведет не только к неоправданному перегреву транзистора, но и к уменьшению напряжения, развиваемого системой.



*Рис. 2.10.* Вольтамперные характеристики транзисторов при включении по схеме с общим эмиттером

Запирание транзистора без защищенных элементов может сопровождаться так называемым лавинным пробоем, т.е. при определенных параметрах системы зажигания (индуктивности  $L_1$ , тока разрыва  $I_p$ ), параметрах транзистора и условиях его запирания (обрыв цепи базы, шунтирование перехода база — эмиттер сопротивлением или активное запирание) напряжение на эмиттер-коллекторном переходе может достигнуть величины лавинного пробоя  $U_n$ . При  $I_6 = 0$  напряжение лавинного пробоя равно  $U_\alpha$ . Опыт показывает, что при токах эмиттера до 4-5 а и индуктивностях  $L_1$  до 4-5 мГн напряжение  $U_{3.K}$  еще не достигает  $U_n$ , стремясь к нему при увеличении  $L_1$ . Для транзистора П210А при  $I_3 = 7$  а и  $L_1 \ge 5$  мГн, напряжение  $U_{3.K}$  достигает почти 70 B, а для транзисторов типа ГТ701А при тех же параметрах 190 В. Величина критической индуктивности, при которой

напряжение  $U_{_{9.K}}$  достигает значение  $U_{_{\Pi}}$ , возрастает при увеличении  $U_{_{\Pi}}$ . Режим лавинного пробоя не желателен.

При исследовании переходных процессов в системе зажигания, происходящих при запирании транзистора, приходится считаться с определенным фазовым сдвигом между напряжениями и токами в транзисторе. Этот сдвиг фаз вызывает явления, подобные тем, которые обусловливаются наличием индуктивности. Индуктивные свойства транзистора при запирании обусловлены участком отрицательного сопротивления на его вольт-амперных характеристиках и специфическим характером движения носителей в транзисторе. Эти свойства не являются индуктивными в общепринятом смысле этого слова. «Кажущая индуктивность» транзистора  $L_{\text{т.к.}}$  зависит, как почти все параметры транзистора, от тока эмиттера. При увеличении тока эмиттера  $L_{\text{т.к.}}$  уменьшается; так, при  $I_3$ =3 a,  $L_{\text{т.к.}}$  = 65÷105 мкгн для транзистора П210-А и 180–270 мкГн для транзисторов типа ГТ701А. При  $I_3$ =6 а  $L_{\text{т.к.}}$  соответственно составляет 25-35 и 50-130 мкГн.

Протекание переходных процессов в контактно-транзисторных системах тесно связано с явлениями, происходящими в транзисторе, и с параметрами схемы. В зависимости от характера запирания транзистора с лавинным пробоем или без него расчетные формулы для токов и напряжений получаются различными.

Максимум вторичного напряжения при запирании транзистора без первичного пробоя определяется соотношением [3]:

$$U_{2m} = I_p \frac{W_2}{W_1} \cdot \xi \cdot K_M \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 (W_2 / W_1)^2}} \cdot \eta, \qquad (2.14)$$

где  $K_{TP} = \frac{W_2}{W_1}$  — коэффициент трансформации катушки зажигания;

 $K_{\rm m}$  – коэффициент магнитной связи обмоток катушки зажигания;

 $\xi$  – коэффициент, учитывающий уменьшение силы тока разрыва, влияющего на величину  $U_{2m}$ . В случае запирания транзистора без первичного пробоя [3]:

$$\xi = k(1 - \alpha \tau_{cn}), \tag{2.15}$$

ГДе  $\alpha = 0.5[R_2L_2 + 1/R_nC_2];$ 

 $\eta$  – коэффициент, учитывающий снижение вторичного напряжения от потерь [1]:

$$\eta = \exp\left\{-\frac{arctg\sqrt{\frac{4R_{_{9}}^{2}C_{_{19}}-1}{L_{_{1}}}}}{\sqrt{\frac{4R_{_{9}}^{2}C_{_{19}}}{L_{_{1}}}-1}}\right\},\tag{2.16}$$

где  $C_{19} = C_1 + C_2 (W_2/W_1)^2$  — эквивалентная емкость первичной цепи.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Из каких основных этапов состоит рабочий процесс транзисторных СЗ?
- 2. Какие имеются особенности коммутации тока транзистором выходного каскада СЗ при индуктивно-емкостной нагрузке?
- 3. Для чего используются эквивалентные схемы замещения полупроводниковых приборов в СЗ?
- 4. Привести эквивалентные схемы замещения стабилитрона, варистора.
- 5. Привести эквивалентные схемы замещения выходного транзистора при включении первичной обмотки катушки зажигания к источнику питания.
- 6. Привести эквивалентную схему замещения транзистора выходного каскада при запирании без пробоя.
- 7. Что определяет время спада  $\tau_{cn}$  в системе зажигания?
- 8. По какому закону осуществляется спад коллекторного тока выходного транзистора при пассивном запирании?
- 9. По какому закону осуществляется спад коллекторного тока выходного транзистора при активном запирании?
- 10.По какому закону происходит процесс нарастания тока в первичной обмотке катушки зажигания при включении КЗ к источнику питания?
- 11. Что такое сила тока разрыва и в чем она определяется?

- 12. Каким образом осуществляется процесс запирания коммутационного транзистора выходного каскада СЗ?
- 13. Как изменяется траектория рабочей точки вольтамперной характеристики транзистора выходного каскада СЗ?

# 3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТРАНЗИСТОРНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Задачи, которые необходимо решать при проектировании транзисторных систем зажигания, разнообразны, к ним относятся:

- -выбор принципиальной схемы системы зажигания;
- -расчёт или выбор некоторых элементов принципиальной схемы;
- -определение электрических параметров катушки зажигания;
- -расчёт магнитной цепи и обмоточных данных катушки зажигания;
- -расчёт элементов цепей управления и защиты (импульсного трансформатора, характеристик варистора и т.п.);
  - -прогнозирование надёжности новой системы зажигания.

Иногда возникает необходимость определения параметров теплоотводящих радиаторов для полупроводниковых приборов (и т.д.).

Хотя имеется множество схемных решений транзисторных систем зажигания (как контактно-транзисторных, так и бесконтактных), все они содержат обычно одинаковые элементы: транзистор, катушку зажигания, первичный конденсатор, стабилитрон или варистор. В отдельных частных случаях конденсатор или стабилитрон может отсутствовать.

### 3.1. ОСОБЕННОСТЬ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

Рабочие процессы классической и транзисторной систем зажигания имеют много общего, в особенности в характере нарастания первичного тока и накопления энергии, в характере разрядных процессов. Различие заключается главным образом в процессе, происходящем после размыкания контактов прерывателя, и состоит в следующем:

- запирание транзистора в отличие от размыкания контактов происходит не мгновенно и может продолжаться несколько десятков микросекунд; за это время вторичное напряжение увеличивается незначительно, но первичное напряжение может быть значительным;
- свободные колебания энергии в катушке, в процессе которых во вторичной цепи возникает высокое напряжение, начинаются после запирания транзистора; при этом в образовании вторичного напряжения участвует не весь ток разрыва, а его большая часть. Это обстоятельство учитывают введением в расчётные формулы коэффициента ξ, который определяет долю тока разрыва, участвующего в образовании вторичного напряжения;
- первичное напряжение, как правило, ограничивается стабилитроном (варистором) или в процессе запирания транзистора, или при свободных колебаниях в катушке;
- мощность, которую способны переключать транзисторы, ограничена, что определяет требования к параметрам системы зажигания. Наибольший первичный ток не должен превышать максимально допустимого тока коллектора  $I_{\kappa \, max}$  транзистора. В процессе запирания транзистора и при свободных колебаниях в катушке рабочая точка транзистора не должна выходить за пределы допустимой зоны устойчивой работы, определяемой областью безопасной работы транзистора в импульсном режиме.

При запирании транзистора (когда ток коллектора снижается от  $I_{\kappa \, max}$  до нуля) напряжение «эмиттер — коллектор» транзистора не должно превышать граничного напряжения  $U_{\alpha}$ . Эти особенности приходится учитывать на всех этапах проектирования системы зажигания.

# 3.2. ВЫБОР ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ. ВЫБОР ВЫХОДНОГО ТРАНЗИСТОРА И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Схема системы зависит от следующих факторов:

-наличие полупроводниковых приборов, пригодных для работы в электронных системах зажигания. При этом учитывается необходи-

мость активного запирания и подключения элементов защиты транзистора;

-требования к патентной чистоте схемы проектируемой системы зажигания;

-включение первичной обмотки катушки зажигания в цепь коллектора или эмиттера транзистора. В первом случае облегчается режим работы цепи управления, так как рабочее напряжение не превышает 12-24 В. Поэтому в бесконтактных системах зажигания катушка включается в цепь коллектора. Во втором случае в образовании вторичного напряжения участвует не только ток коллектора, но и ток базы транзистора, поэтому такая схема более экономична и часто применяется в контактно-транзисторных системах зажигания.

Определение параметров схемы. При выбранном типе транзистора определяют ёмкость первичного конденсатора по формуле [3, 4]:

$$C_1 \ge I_{k \max} \tau_{CII} / 2(U_{\alpha} - U_{\delta am}).$$
 (3.1)

В том случае, если задана допустимая зона динамических характеристик транзистора, в формулу (3.1) вместо величины  $U_{\alpha}$  можно подставить напряжение, соответствующее допустимой зоне. Напряжение стабилизации стабилитрона при включении его параллельно участку «эмиттер – коллектор» транзистора  $U_{CT} = U_{_{9\kappa,\partial on}} - \Delta U$ , а при включении стабилитрона параллельно первичной обмотке катушки  $U_{CT} = U_{_{9\kappa,\partial on}} - U_{_{6am}} - \Delta U$  ( $U_{_{9\kappa,\partial on}}$  — допустимое значение напряжения «эмиттер — коллектор»;  $\Delta U$  — падение напряжения на резисторе с динамическим сопротивлением стабилитрона при силе тока 2-5 A, обычно  $\Delta U$ =10÷20 B).

Тип стабилитрона необходимо выбирать с учётом допуска на напряжение стабилизации так, чтобы при всех режимах работы первичное напряжение не превышало допустимого для транзистора значения. При включении стабилитрона или варистора параллельно переходу «коллектор — база» необходимо следить за тем, чтобы при всех возможных случаях работы системы зажигания, включая

и аномальные, ток коллектора при срабатывании защитного стабилитрона (коллекторное напряжение достаточно высокое) не выходил за допустимую зону ограничения мощности рассеяния (ОМР) при соответствующей его длительности.

#### 3.3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ КАТУШКИ ЗАЖИГАНИЯ

Параметрами катушки зажигания, которые следует определить в первую очередь, являются коэффициент трансформации, индуктивность первичной обмотки и ток разрыва. Для расчёта электрических параметров катушки, предназначенной для транзисторной системы зажигания (контактной или бесконтактной), должны быть известны следующие параметры [3, 5]:

- вторичное напряжение, которое должна развивать система зажигания на различных режимах работы двигателя, в частности при пуске двигателя  $U_{2\text{мп}}$ , при небольшой  $U_{2\text{мм}}$  и максимальной  $U_{2\text{мmаx}}$  частотах вращения коленчатого вала двигателя. Эти напряжения могут быть заданы непосредственно или определены по известным пробивным напряжениям свечей двигателя соответственно при пуске  $U_{\text{проб. п}}$ , при небольшой  $U_{\text{проб. м}}$  и максимальной  $U_{\text{проб. max}}$  частотах вращения коленчатого вала двигателя и по необходимому коэффициенту запаса по вторичному напряжению (соответственно  $K_{3.\text{п}}$ ,  $K_{3.\text{m}}$ ,  $K_{3.\text{max}}$ );
- —максимальная частота вращения коленчатого вала двигателя  $n_{e\ max},\ muh^{-1};$
- —вторичные нагрузки при пуске и в различных условиях эксплуатации, т.е. минимальное шунтирующее сопротивление  $R_{\rm m}$  и максимальная ёмкость  $C_{2\,max}$  вторичной цепи;
- —напряжение питания (аккумуляторной батареи) в рабочем режиме  $U_{\text{б}}$  и при пуске двигателя  $U_{\text{б.п.}}$ ;
  - -число цилиндров двигателя z;
- -относительная замкнутость прерывателя  $au_3$  (контактного или бесконтактного);

-требуемое значение dU<sub>2</sub>/dt.

Кроме того, необходимо знать параметры транзистора:

- -силу максимально допустимого тока коллектора  $I_{\kappa \ max}$ ;
- –граничное напряжение  $U_{\alpha}$ ;
- -допустимое напряжение «эммитер коллектор» запертого транзистора;
  - -время спада коллекторного тока при активном запирании  $\tau_{cn}$ ;
  - -коэффициент усиления по току В;
  - -сопротивление насыщения  $R_{\text{нас}}$ .

При расчёте необходимо знать некоторые параметры или задавать их на основании опыта. К числу таких параметров относятся:

- -коэффициент связи обмоток катушки, который целесообразно принимать равным 0,9;
- -сопротивление собственных потерь в катушке  $R_{\rm n}$ , выбираемое в пределах 6-8 мОм;
- -собственная ёмкость вторичной обмотки катушки, составляющая 40-50 п $\Phi$ ;
- -коэффициент  $\xi$ , который можно принять 0,95-0,98 для низкочастотных транзисторов; для высокочастотных транзисторов он должен быть равным единице.

Расчёт параметров катушки зажигания целесообразно начинать с определения коэффициента трансформации. Минимальный расход меди и наименьший потребляемый системой зажигания ток получаются при определении коэффициента трансформации по формуле

$$K_{mp} = W_2 / W_1 = U'_{2_{M_M}} / (U_{_{9\kappa,\partial on}} - U_{_{\delta}}),$$
 (3.2)

где  $U'_{2_{MM}}$  — значение минимально необходимого вторичного напряжения, развиваемого системой зажигания при малой частоте вращения валика распределителя в реальных условиях эксплуатации, т.е. для дли-

тельной работы при максимальной температуре окружающей среды и наибольших вторичных нагрузках ( $C_{2 \text{ max}}$  и  $R_{\text{III min}}$ );

 $U_{\text{эк. доп.}}$  — максимально допустимое напряжение «эмиттер — коллектор» запертого транзистора в реальных условиях эксплуатации.

Напряжение U'<sub>2мм</sub> бывает задано либо определяется по формуле [3]:

$$U'_{2_{M_M}} = U_{npo\delta.M} K_{3M}$$
.

Если выбрать коэффициент  $K_{TP}$  трансформации выше значений, рассчитанных по формуле (3.2), то увеличится расход меди для вторичной обмотки катушки зажигания, а транзистор будет недоиспользован по допустимому напряжению и существенно упадёт значение  $dU_2/dt$ . В некоторых случаях на это приходится идти, так как снижение нагрузки на транзистор может несколько увеличить надёжность системы зажигания. Обеспечить требуемое вторичное напряжение при коэффициенте трансформации, значительно меньшем, чем он может быть определён по формуле (3.2), практически невозможно.

Одинаковое значение вторичного напряжения, как следует из формулы (2.14), при малой частоте вращения валика распределителя может быть получено при различном соотношении силы тока разрыва и индуктивности первичной обмотки катушки зажигания. Вместе с тем снижение вторичного напряжения при увеличении частоты вращения валика распределителя определяется выражением [3]:

$$U_{2_{M}\max}/U_{2_{M_{M}}} = 1 - \exp[-R_{1}\tau_{3} \cdot 120/(L_{1}zn_{e})].$$
 (3.3)

Если представить себе сопротивление всей первичной цепи системы зажигания в реальных условиях эксплуатации в виде  $R_1 = U_{\text{бат}}/I_{\text{р.м}}$ , то можно получить соотношение для определения  $I_pL_1$  [3]:

$$L_{1}I_{pM} = \frac{-U_{6}\tau_{3}120}{zn_{e\max}\ln\left(1 - \frac{U_{2M\max}}{U_{2M_{M}}}\right)}.$$
(3.4)

Учитывая формулы (2.13) и (2.14), для  $R_{\text{III min}}$  и  $C_{2 \text{ max}}$  имеем:

$$I_{pM} = \frac{U_{2M}^{2} C_{13} z n_{e \max} \left[ -\ln \left( 1 - \frac{U_{2M \max}}{U_{2M_{M}}} \right) \right]}{U_{\delta} \tau_{3} 120 \left( \frac{W_{2}}{W_{1}} \eta \xi \right)^{2}}.$$
 (3.5)

Из формулы (3.4) получаем выражение для  $L_1$ :

$$L_{1} = \frac{-U_{\delta}\tau_{3}120}{zn_{e \max} \ln \left(1 - \frac{U_{2M \max}}{U_{2M_{M}}}\right)I_{pM}}.$$
(3.6)

Определив параметры катушки зажигания для рабочего режима, необходимо рассчитать режим пуска двигателя. В этом режиме в транзисторных системах с ненормированным временем накопления для компенсации падения напряжения на аккумуляторной батарее замыкается добавочный резистор катушки или его часть. Сила тока разрыва при пуске определяется графически в зависимости  $U_{2M} = f(I_p)$ , причём напряжение  $U_{2M}$  рассчитывается по формуле [1, 2]:

$$U_{2M_M} = I_p \frac{W_2}{W_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_{19}}} \eta K_M, \qquad (3.7)$$

где  $\eta$  — коэффициент, учитывающий снижение вторичного напряжения от потерь [1];

 $C_{19} = C_1 + C_2 k_{mp}^2$  — эквивалентная емкость первичной цепи.

Таким образом, рекомендуемый порядок расчёта сводится к определению следующих параметров:

- 1) коэффициента трансформации  $W_2/W_1$  по формуле (3.2);
- 2) ёмкости  $C_{19}$  по формуле:

$$C_{19} = C_1 + (C_{W_2} + C_{2\max})(W_2/W_1)^2$$
;

- 3) значения  $\eta$  по формуле (2.16) и ориентировочно выбранной индуктивности L1=4÷6 м $\Gamma$ ;
  - 4) силы тока  $I_{p,M}$  по формуле (3.5);
  - 5) индуктивности по формуле (3.6);
- 6) зависимости  $U_{2M}$  =  $f(I_p)$  по формуле (3.7) и силы тока разрыва  $I_{p.m}$ . в режиме пуска. Эта зависимость строится при значениях  $R_{mmin}$  и  $C_{2min}$ ;
  - 7) сопротивления добавочного резистора по формуле:

$$R_{II} = R_{1\Sigma} - R_{w1} - R_{\mu ac} B/(B+1)$$

ГДе 
$$R_{1\Sigma} = \frac{U_{\delta}}{1,2I_{p,M}}$$
;  $R_{w1} = P/I_{p,M}^2$ ,

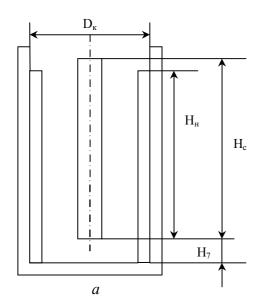
где P — допустимая для катушки мощность;

8) сопротивления добавочного резистора, исключаемого в режиме пуска двигателя:

$$R_{A.3} = R_{1\Sigma} - U_{\delta.n} / I_{p.n} .$$

В том случае, если система зажигания при пуске должна развивать напряжение, гораздо большее, чем в режиме малых частот вращения валика распределителя, необходимо при вычислении  $w_2/w_1$  ориентироваться на  $U_{2\text{мп}}$ . Поэтому после определения параметров катушки следует рассчитать её рабочие характеристики и, если потребуется, вновь определить параметры для коэффициента трансформации, рассчитанного из условий пуска двигателя.

В следующей части расчета вычисляем размеры катушки и её обмоточные данные, обеспечивающие выбранные ранее значения  $R_1$ ,  $L_1$  и  $k_{\text{тр}}$ . Необходимо ориентироваться на какую-либо уже известную магнитную систему катушки зажигания или выбрать новую. В практике применяют два вида катушек зажигания (рис. 3.1) с замкнутой магнитной цепью.



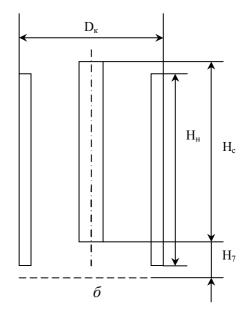


Рис. 3.1. Магнитопроводы катушек зажигания:

a — корпус из магнитного материала;

 $\delta$  – корпус из немагнитного материала

В табл. 3.1 приведены основные размеры применяемых магнитных систем катушек зажигания.

Магнитные системы A и Б, так же как B и Г, различаются между собой диаметром кожуха и взаимным расположением сердечника и наружного магнитопровода. Диаметр (мм) провода первичной обмотки можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$d_1 = 7.4 \sqrt{\frac{D_{_{H}} w_{_{1}}}{R_{_{w1}}}} \cdot 10^{-3}.$$

Число витков первичной обмотки

$$w_1 = \sqrt{L_1/G_{M1}} , (3.8)$$

где  $G_{\scriptscriptstyle M1}$  – условная магнитная проводимость потока, созданного первичной обмоткой катушки.

Таблица 3.1

Катушки	Магнитная	Материал	Размеры (см. рис. 3.1), м			1), мм
	система	корпуса	$D_{K}$	$H_{\mathrm{H}}$	$H_{C}$	$H_7$
Б102-Б, Б115, Б116-В	A	Сталь	56	98	77	8
Б114, Б114-Б, Б118	Б		61	93	77	8
KM01	В	Алюминий	37	80	80	10
Б117-А, Б117-Б	Γ		56,6	100	95	7

Зная  $L_1$  и  $G_{\text{м1}}$  катушки (табл. 3.2), магнитная система которой взята за основу, по формуле (3.8) можно найти число витков первичной обмотки. При этом предполагается, что обмотки проектируемой катушки зажигания будут иметь те же размеры и занимать то же место.

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = w_1 k_{mp}.$$

Диаметр провода вторичной обмотки выбирают исходя из его механической прочности, обусловленной технологическим процессом намотки, размерами и стоимостью катушки. Как видно из табл. 3.2, диаметр  $d_2$  провода равен 0,06...0,07 мм.

Таблица 3.2

Параметр	Б117-А, Б117-В	Б116	Б115	Б115-В,	27.3701	
7. 0		0.67.072	1.0	Б115-Д		
$R_{\omega}$ , Om	3,13,5	0,670,73	1,9	1,9	0,45	
$R_{\partial}$ , Om	_	_	1,01,1	1,01,1	_	
$L_1$ , м $\Gamma$ н	9,510,0	4,55,1	9,09,5	9,09,5	3,8	
$\omega_{_{1}}$	310	250	330	250	198	
$\omega_2$	23600	38000	22500	22800	16200	
$k_{mp}$	76,12	152	68,18	91,20	82	
$d_1$ , MM	0,53	1,12	0,72	0,67	1,12	
$d_2$ , MM	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	
$D_{K}$ , MM	56,0	61,0	56,6	56,6	56,8	

# 3.4. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ КОММУТАТОРОВ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ

Переходный процесс контактно-транзисторной системы зажигания после размыкания контактов прерывателя, как показано выше, можно распределить на два этапа: запирание транзистора и свободные колебания энергии в катушке зажигания.

На первом этапе импульсный трансформатор должен обеспечить поступление в базу транзистора в режиме рассасывания тока, сила которого не превышает определённого значения.

На втором этапе на эмиттерный переход транзистора должно воздействовать соответствующее запирающее напряжение. Сила тока базы в режиме рассасывания зависит в основном от коэффициента трансформации импульсного трансформатора, а не от индуктивности его обмоток; время протекания этого тока — от частотных свойств транзистора. Длительность импульса запирающего напряжения зависит главным образом от индуктивности вторичной обмотки трансформатора, а его амплитуда — от сопротивления резистора, шунтирующего эмиттерный переход транзистора.

При расчёте параметров трансформатора необходимо учитывать следующее:

- 1. Сопротивление первичной обмотки трансформатора в контактно-резисторной системе зажигания должно быть возможно меньшим для того, чтобы падение напряжения на первичной обмотке не смещало рабочую точку транзистора в открытом состоянии. Так, для трансформатора транзисторного коммутатора ТК102 сопротивление первичной обмотки должно быть не более 0,05-0,1 Ом.
- 2. От сопротивления вторичной обмотки зависит сила дополнительного тока, протекающего через контакты (помимо тока базы резистора). При расчёте сопротивления этой обмотки целесообразно задаваться значением силы дополнительного тока. Если ввести коэффициент, показывающий, во сколько раз сила тока, протекающего через контакты при наличии трансформатора, превышает силу тока базы  $\gamma = I_y / I_\delta$ , то активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора  $R_{w2} = B^2 R_{hac} / [(\gamma 1)(B + 1)]$ .
- 3. Коэффициент трансформации n трансформатора в значительной степени определяет силу тока рассасывания (обратный ток базы). Зная предельно допустимое значение обратного тока базы  $I_{63}$ , можно получить следующую зависимость:

$$n \rangle kI_1/(I_{\delta.3}-I_2), \tag{3.9}$$

где k – коэффициент связи между обмотками катушки зажигания;

 $I_1$  и  $I_2$  – токи, протекающие в первичной и вторичной обмотках импульсного трансформатора.

4. Расчёт индуктивности первичной обмотки трансформатора проводится с учётом двух условий: напряжение «база — эмиттер» на запертом транзисторе не должно превышать допустимого для транзистора значения  $U_{\text{б.э.доп}}$ ; время действия запирающего напряжения  $t_3$  не должно быть меньше времени действия повышенного напряжения «эмиттер — коллектор», причём значение этого напряжения должно быть не ниже напряжения  $U_{\text{б.э.min}}$ , необходимого для активного запирания транзистора.

Первое условие с учётом выражения (3.9) записывается в виде

$$I_{\delta.3}R_{\delta.3} \exp[-R_2t_0/(n_2L_1)] < U_{\delta.9 \,\text{max}}$$

где  $R_{\text{б.3}}-$  сопротивление запертого эмиттерного перехода.

Второе условие

$$I_{\tilde{6}_{3}}R_{\tilde{6}_{3}}\exp\left[-R_{2}t_{0}+R_{\tilde{6}_{3}}t_{3}/(n_{2}L_{1})\right]>U_{\tilde{6}_{3}\min}$$
.

После преобразований и ряда упрощений величина R  $_{6.3}$  влияет на максимальное значение запирающего напряжения; чтобы после запирания транзистора запирающее напряжение не превышало  $U_{6.9.max}$ , следует соблюдать условие

$$R_{\delta.3} < U_{\delta.3 \,\text{max}} / I_{\delta.3} + (t_0 / t_3) R_2 \ln U_{\delta.3 \,\text{max}} / U_{\delta.3 \,\text{min}}$$
 (3.10)

Поскольку активное сопротивление запертого эмиттерного перехода транзистора велико и может составлять десятки килоом, эмиттерный переход специально шунтируют резистором меньшего сопротивления.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Какие задачи решаются при проектировании транзисторных систем зажигания?
- 2. В чем состоит отличие расчета параметров транзисторной системы зажигания от классической батарейной СЗ?
  - 3. Как осуществляется выбор транзистора выходного каскада СЗ?
- 4. Как осуществляется выбор стабилитрона для защиты транзистора выходного каскада СЗ?
- 5. Как осуществляется расчет электрических параметров катушки зажигания?
- 6. От чего зависит величина коэффициента трансформации катушки зажигания?
- 7. Для чего служит конденсатор  $C_1$ , включенный параллельно первичной обмотки трансформатора?
- 8. От каких факторов зависит максимальное вторичное напряжение, развиваемое катушкой зажигания?
- 9. Дать сравнительную характеристику бесконтактных датчиков импульсов, применяемых в БСЗ.

### 4. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ И ЕЕ СОДЕРЖАНИЕ

Исходными данными для расчета бесконтактной транзисторной системы зажигания являются:

- —величина амплитуды вторичного напряжения создаваемого системой зажигания: при пуске двигателя  $U_{2\text{мп}}$ , при небольшой  $U_{2\text{мм}}$  и максимальной  $U_{2\text{мmax}}$  частотах вращения коленчатого вала двигателя;
  - -величина коэффициента запаса по вторичному напряжению K<sub>3</sub>;
  - -максимальная частота вращения коленчатого вала двигателя n<sub>emax</sub>;
- -вторичные нагрузки при пуске и в различных условиях эксплуатации, т.е. минимальное шунтирующее сопротивление  $R_{\text{ш}}$  и максимальная емкость вторичной цепи  $C_{2\text{max}}$ ;

- —напряжение аккумуляторной батареи в рабочем режиме  $U_{\text{б}}$  и при пуске двигателя  $U_{\text{бп}}$ ;
  - -число цилиндров двигателя z;
- -относительное время замкнутого состояния контактов (УЗСК)  $\tau_3$  для контактно-транзисторной системы зажигания (или угол включенного состояния транзистора для бесконтактных систем зажигания);
- -граничное напряжение транзистора  $U_{\alpha}$ , соответствующее напряжению первичного пробоя транзистора выходного каскада системы зажигания;
- -время спада коллекторного тока  $\tau_{cn}$  выходного транзистора системы зажигания при активном запирании;
- —допустимое напряжение  $U_{\mbox{\tiny кэдоп}}$  запертого транзистора выходного каскада.

Принципиальную схему БТСЗ – бесконтактной транзисторной системы зажигания (коммутатора) – выбирают на основе исходных данных существующих схем. Выбор схемы системы зажигания (СЗ) зависит от следующих факторов:

- наличие полупроводниковых приборов (транзисторов), способных работать в СЗ;
- необходимость активного запирания и подключения защиты выходного транзистора СЗ.

В курсовой работе выбор принципиальной схемы коммутатора, исходных данных для расчета СЗ осуществляется на основе табл. 4.1.

Курсовая работа содержит следующие разделы:

Введение

- 1. Описание работы заданной схемы коммутатора и системы зажигания.
- 2. Расчет и выбор элементов выходного каскада коммутатора C3 (транзистора, стабилитрона или варистора, конденсатора).
  - 3. Расчет электрических параметров катушки зажигания.
- 4. Расчет магнитной цепи и обмоточных данных катушки зажигания.

### Заключение.

### Список литературы.

Графическая часть курсовой работы выполняется в соответствии с требованиями ЕСКД и содержит принципиальную схему коммутатора; сборочный чертеж катушки зажигания; спецификацию на разработку и составляет 0,5 листа формата A1.

Таблица 4.1

№ вари-	№ рисунка	Исходные данные для расчёта							
анта	схемы комму- татора (см. приложе- ние)	U <sub>2 мм</sub> , кВ	n <sub>e max</sub> , мин <sup>-1</sup>	Z	τ <sub>3</sub>	U <sub>6</sub> , B	$U_{\alpha}$ , $B$	τ <sub>сп</sub> , ΜΚС	К3
1	Рис. 1	20	7500	4	0,6	12	200	30	1,5
2	Рис. 2	22	7500	4	0,6	12	250	30	1,5
3	Рис. 3	24	7500	4	0,6	12	250	30	1,5
4	Рис. 4	25	7500	4	0,6	12	250	30	1,5
5	Рис. 5	26	7500	4	0,6	12	300	30	1,5
6	Рис. 1	20	7500	4	0,65	12	200	40	1,6
7	Рис. 2	22	7500	4	0,65	12	250	40	1,6
8	Рис. 3	22	7500	4	0,65	12	250	40	1,6
9	Рис. 4	23	7500	4	0,65	12	300	40	1,6
10	Рис. 5	24	7500	4	0,65	12	300	40	1,6
11	Рис. 1	22	7500	4	0,7	12	200	25	1,7
12	Рис. 2	22	7500	4	0,7	12	250	25	1,7
13	Рис. 3	23	7000	4	0,7	12	250	25	1,7
14	Рис. 4	25	7000	4	0,63	12	250	25	1,7
15	Рис. 5	26	7000	4	0,63	12	250	25	1,7
16	Рис. 1	20	7000	4	0,63	12	200	50	1,5
17	Рис. 2	21	7000	4	0,63	12	300	50	1,5
18	Рис. 3	22	7000	4	0,63	12	300	50	1,5
19	Рис. 4	23	7000	4	0,63	12	300	50	1,5
20	Рис. 5	24	7000	4	0,63	12	300	50	1,5

# Пример расчёта бесконтактной транзисторной системы зажигания

- 1. Расчет и выбор элементов выходного каскада СЗ.
- 1.1. Исходя из заданных значений  $U_{\rm 2MM}$   $U_{\alpha}$  ,  $U_{\delta}$  подсчитываем коэффициент трансформации

$$K_{TP} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{U_{2MM}}{U_{\alpha} - U_{\beta}} = \frac{20 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^2 - 12} = 106,$$

где  $U_{\alpha}=200B,~U_{\delta}=12B,~U_{2MM}=20\kappa B$  .

1.2. Выбираем коммутационный (выходной) транзистор для коммутатора системы зажигания: КТ897A

Важнейшими параметрами выходного транзистора являются:

- —напряжение первичного пробоя  $U_{\alpha} = 200B$ ;
- —максимальный допустимый ток коллектора  $I_{K \max} = 10A$ ;
- —время спада коллекторного (эмиттерного) тока  $\tau_{\it CH} = 20 \cdot 10^{-6} c$  .
- 1.3. При выбранном типе транзистора определяем ёмкость первичного конденсатора по формуле (3.1):

$$C_1 \geq \frac{I_{K \max} \cdot \tau_{CII}}{2(U_{\alpha} - U_{\delta})} = \frac{10 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{2(2 \cdot 10^2 - 12)} = 0,53 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

- 2. Расчет электрических параметров катушки зажигания.
- 2.1. Расчёт максимального тока разрыва в системе зажигания из формулы (3.5):

$$I_{PM} = \frac{U_{2MM}^2 \cdot C_{19} \cdot z \cdot n_{e\text{max}} \left[ -\ln \left( 1 - \frac{U_{2M \, \text{max}}}{U_{2MM}} \right) \right]}{U_{\delta} \cdot \tau_3 \cdot 120 \left( \frac{W_2}{W_1} \cdot \eta \cdot \xi \cdot K_M \right)^2}.$$

Предварительно определяем  $C_{1}$ .

Выбираем  $C_1$  равной 0,54 мкФ;  $C_{2W}$ =50пФ.

$$C_{13} = C_1 + C_{2W} \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^2 = 0.54 \cdot 10^{-6} + 50 \cdot 10^{-12} (106)^2 = 0.54 \cdot 10^{-6} + 0.56 \cdot 10^{-6} = 1.1 \cdot 10^{-6} \Phi;$$

$$I_{PM} = \frac{U_{2_{MM}}^2 \cdot C_{19} \cdot z \cdot n_{e\,\text{max}} \left[ -\ln \left( 1 - \frac{U_{2_{M}\,\text{max}}}{U_{2_{MM}}} \right) \right]}{U_{\delta} \cdot \tau_3 \cdot 120 \! \left( \frac{W_2}{W_1} \cdot \eta \cdot \xi \cdot K_M \right)^2} = \frac{4 \cdot 10^8 \cdot 1,\! 1 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 7,\! 5 \cdot 10^3 \cdot 2,\! 3}{12 \cdot 0,\! 6 \cdot 120 \! \left( 106 \cdot 0,\! 95 \cdot 0,\! 9 \right)^2} = 4,\! 5A$$

2.2. Рассчитываем индуктивность катушки зажигания  $L_1$  по формуле (3.6):

$$L_{1} = \frac{-U_{\delta}\tau_{3}120}{zn_{e\,\mathrm{max}}\,\ln\!\left(1 - \frac{U_{2\,M\,\mathrm{max}}}{U_{2\,M_{M}}}\right)\!I_{p\!\scriptscriptstyle{M}}} = \frac{12\cdot0,\!6\cdot\!120}{4\cdot7,\!5\cdot\!10^{3}\cdot\!2,\!3\cdot\!4,\!5} = 2,\!78\cdot\!10^{-3}\,\Gamma_{H}\;.$$

2.3. Рассчитываем  $U_{2_{MM}}$  по формуле

$$U_{_{2MM}} = I_{_p} \cdot K_{_M} \cdot \frac{W_{_2}}{W_{_1}} \sqrt{\frac{L_{_1}}{C_{_{19}}}} \cdot \eta = 4,5 \cdot 1 \cdot 106 \sqrt{\frac{2,78 \cdot 10^{-3}}{1,1 \cdot 10^{-6}}} \cdot 0,9 = 23,98 \kappa B \ .$$

2.4. Определяем добавочное сопротивление по формуле:

$$\begin{split} R_{\Delta} &= R_{I\Sigma} - R_{W1} - R_{_{HAC}} \, B/B + 1 \approx R_{_{1\Sigma}} - R_{W1}; \\ R_{W1} &= 0.8O\text{M}; \ R_{I\Sigma} = \frac{U_{_{6}}}{1,2I_{_{p}}} = \frac{12}{1,2\cdot4,5} = 2,22O\text{M}; \\ R_{_{II}} &= 2,22-0.8 = 1,42O\text{M}. \end{split}$$

2.5. Определяем сопротивление добавочного резистора, исключаемого в режиме пуска:

$$R_{{\it Д}3}=R_{{\it I}\Sigma}-rac{U_{\it \delta n}}{I_{\it pn}}=2,\!22-rac{7}{5,\!6}=2,\!22-1,\!25=0,\!97O\!M\,,$$
где  $U_{\it \delta n}=7B,\;I_{\it pn}=5,\!6A$  .

3. Расчет магнитной цепи и обмоточных данных катушки зажигания.

Рассчитываем размеры катушки зажигания и ее обмоточные данные, обеспечивающие рассчитанные ранее  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $K_{\text{тр}}$ . При расчете необходимо ориентироваться на какую-либо известную магнитную систему катушки зажигания.

### Пример расчета катушки зажигания

Исходные данные:

Катушка зажигания с параметрами  $R_1$ =0,75 Ом,  $L_1$ =4,5 мГн,  $k_{\text{тр}}$ =80. Система зажигания содержит добавочный резистор сопротивлением 1,25 Ом и имеет напряжение  $U_H$ =12 В. Частота вращения коленчатого вала двигателя при холост. ходе 1000 мин<sup>-1</sup>.

Последовательность расчета:

- 1. Из анализа существующих катушек зажигания за аналог можно принять катушку зажигания 27.3701 с параметрами:  $R_{01}$ =0,45 Ом,  $L_{01}$ =3,8×10<sup>-3</sup> Гн,  $k_{01}$ =82,  $w_{01}$ =198,  $d_{01}$ =1,12 мм,  $w_{02}$ =1620,  $d_{02}$ =0,07 мм,  $\rho$ =1/57 Ом×мм²/м,  $S_{01}$ =0,973 мм².
- 2. Число витков первичной обмотки проектируемой катушки зажигания

$$w_1 = w_{01} \sqrt{\frac{L_1}{L_{01}}} = 198 \sqrt{\frac{4.5 \cdot 10^{-3}}{3.8 \cdot 10^{-3}}} = 216.$$

3. Для определения диаметра провода первичной обмотки проектируемой катушки зажигания вычисляем:

среднюю длину витка первичной обмотки катушки зажигания 27.3701:

$$R_{01} = \frac{\rho l_{cp} w_{01}}{S_{01}}; \quad l_{cp} = \frac{R_{01} S_{01}}{\rho w_{01}} = \frac{0,455 \cdot 0,937 \cdot 57}{198} = 0,126 \text{m};$$

сечение провода первичной обмотки проектируемой катушки зажигания:

$$S_1 = \rho \frac{l_{01cp} w_1}{R_1} = \frac{0,126 \cdot 216}{57 \cdot 0,75} = 0,634 \text{MM}^2;$$

диаметр провода первичной обмотки проектируемой катушки зажигания:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,634}{3,14}} \approx 0,9$$
мм.

4. Проверяем возможность укладки первичной обмотки в габаритах катушки зажигания 27.3701 по площади, занимаемой первичной обмоткой:

$$S_{01} = w_{01}s_{01} = 198 \cdot 0,973 = 193 \text{ MM}^2,$$
  
 $S_1 = w_1s_1 = 216 \cdot 0.634 = 137 \text{ MM}^2.$ 

Таким образом, первичная обмотка проектируемой катушки зажигания укладывается в объем катушки зажигания 27.3701.

## 5. Число витков вторичной обмотки катушки зажигания

$$w_2 = w_1 k_{mp} = 216 \cdot 80 = 17200.$$

Диаметр провода можно оставить прежним  $d_2$ =0,07 мм, поскольку  $S_1 \!\!<\!\! S_{01}.$ 

Технические характеристики катушек зажигания представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

	Тип катушки КСЗ							
Показатели	Б114Б	Б115; Б115В	Б116	6117A	Б118	27.3705, 027.37		
Технические условия	37.003.435—72	37.003.173-72	37.003.882—83	ФИАТ-ВАЗ 9932 07	37.466.070—96	37.466.07296		
		Пере	ичная обмотка					
Марка провода	ПЭВ-1	пэл	ПЭТВ-2	ПЭМВМ	ПЭВ-1	ПЭВ-1		
Диаметр провода, мм	1,33	0,78/0,69	1,12	0,53	1,12	1,12		
Число витков $W_1$	180±1	330±3; 268±3	260±3	302±0,5	260±2	198±5		
Сопротивление, Ом	0,345 0,372	1,861,99; 1,501,61	0,7880,793	3,0723,328	0,7170,727	0,40,5		
Индуктивность $L_1$ , м $\Gamma$ н	2,953,35	9,39,8; 7,37,6	5,655,85	1011	5,65 5,85	3,73,8		
		Bmoj	ричная обмотка					
Марка и диаметр провода, мм	пэл 0,075	ПЭВТЛ 0,085; 0,07	ПЭВ-155 0,065	ПЭМВМ 0,07	ПЭЛ 0,076	ПЭВ-1 0,071		
Число витков $W_2$	41 000_500	22 500 <sub>-500</sub> ; 20 800 <sub>-600</sub>	38 600_600	23 600+300	30 000_500	15 300_300		
Сопротивление, кОм	21,4422,9	9,349,15; 6,146,75	15,6	6,39,2	15,14	4,55,5		
Индуктивность $L_2$ ,	174189	45,549; 3235	87,4	44,547,5	84,3	2225		
Емкость С2, пФ	3136	3844; 4851	5557	44 , 47	5557	34,3		
$W_2/W_1$	227	68, 88	153	78,5	115	82		
Добавочное сопро- тивление $R_{no5}$ , Ом	1,01,04	1,81,9; 1,01,1	0,52 n 0,71	Нет	0,540,66	Нет		
Ток разрыва, А	7,5	3,5; 3,7	7	4	8	7,5		
Развиваемое на- пряжение при R <sub>m</sub> = 1 мОм, кВ	25	22	. 20	22 .	20	22		
Время нарастания вторичного напряжения от 2 до 15 кВ, мкс	21	30	20	30	20	20		
Длительность иск- рового разряда, мс	2,3	1,6; 1,7	2,6	1,5	2,6	2 .		
Ток, мА/энергия иск- рового разряда, мДж	30/35	38/25	27/30	30/20	27/35	30/60		
Применяемость по двигателям	ЗИЛ-130, ЗМЗ-53	УЗАМ	ЗИЛ-131	BA3-1200, -1300, -1500, -1600	ЗИЛ-131	ВАЗ с БСЗ с датчком Холла		

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Электрические аппараты систем зажигания автомобилей – наиболее ответственные изделия электрооборудования, обеспечивающие пуск и непрерывную работу ДВС на установившихся и не установившихся режимах его работы. В настоящее время разработаны и внедрены электронные СЗ, в том числе с применением цифровой и микропроцессорной техники. Система зажигания стала неотъемлемой частью электронных систем управления двигателем (ЭСУД), в котором программными средствами решаются задачи регулирования углов опережения зажигания (УОЗ), времени накопления энергии в катушках зажигания, управления распределением высокого напряжения по цилиндрам двигателя.

Рабочие процессы систем зажигания с накоплением энергии в первичной обмотке катушки зажигания протекают практически одинаково, хотя в зависимости от конструктивных параметров первичной и вторичной цепей катушек зажигания имеются некоторые отличия. В электронных СЗ процесс нарастания тока в первичной цепи и процесс прерывания тока отличны от классических контактных СЗ, так как электронный ключ имеет особенности при его открывании (переход в состояние насыщения) и при его запирании (режим отсечки), что обусловлено влиянием параметров электронного прибора (транзистора, тиристора), применяемого для прерывания тока в первичной цепи системы зажигания.

Учебное пособие охватывает многие ключевые вопросы проектирования и расчета ЭСЗ, что в целом способствует ознакомлению и ориентации студентов на разработку перспективных электронных систем зажигания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 2007. 320 с.
- 2. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования / М.Н. Фесенко, Л.В. Копылова, В.И. Коротков и др. Под общ. ред. М.Н. Фесенко. М.: Машиностроение, 1992. 384 с.
- 3. Опарин И.М., Купев Ю.А., Белов Е.А. Электронные системы зажигания. М.: Машиностроение, 1987. 200 с.
- 4. Балагуров В.А. Аппараты зажигания. М.: Машиностроение, 1968. 352 с.
- 5. Глезер Г.Н., Опарин И.М. Автомобильные электронные системы зажигания. М.: Машиностроение, 1997. 144 с.
- 6. Набоких В.А. Аппараты систем зажигания: справочник. М.: Изд. центр «Академия», 2009. 320 с.
- 7. Ходасевич А.Г., Ходасевич Т.И. Справочник по устройству и ремонту электронных приборов автомобилей. Вып 1. Электронные системы зажигания. М.: АНТЕЛЕКОМ, 2001. 208 с.
- 8. Ходасевич А.Г., Ходасевич Т.И. Справочник по устройству и ремонту электронных приборов автомобилей. Вып 2. Электронные системы зажигания. М.: АНТЕЛЕКОМ, 2002. 242 с.
- 9. Акимов А.В., Акимов О.А., Акимов С.В. и др. Электрооборудование автомобилей: Справочник / Под ред. Ю.П. Чижкова. М.: Транспорт, 1993. 223 с.
- 10. Соснин Д.А. Электрическое, электронное и автотронное оборудование легковых автомобилей (Автотроника-3): учебник для вузов. М.: Солн-Пресс, 2010. 384 с.
- 11. Дентон Т. Автомобильная электроника: перевод с англ. М.: HTПресс, 2008. 384 с.

- 12. Мигунов А.Л. Системы электроники и автоматики автомобилей и тракторов: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т,  $2010.-210~\rm c.$
- 13. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. 2-е изд. испр. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2004. 320 с.
- 14. Петухов В.М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности низкочастотные и их зарубежные аналоги. Т.2. Справочник. М.: Кубк-а, 1997.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

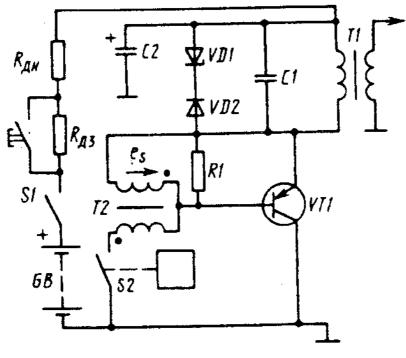


Рис. П1

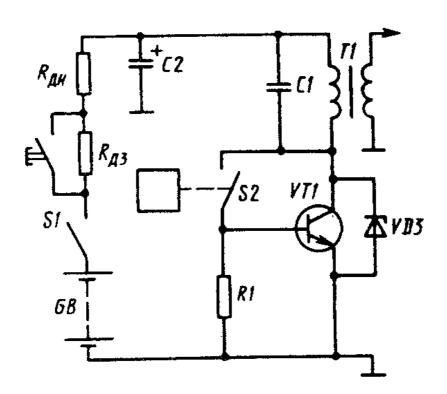


Рис. П2

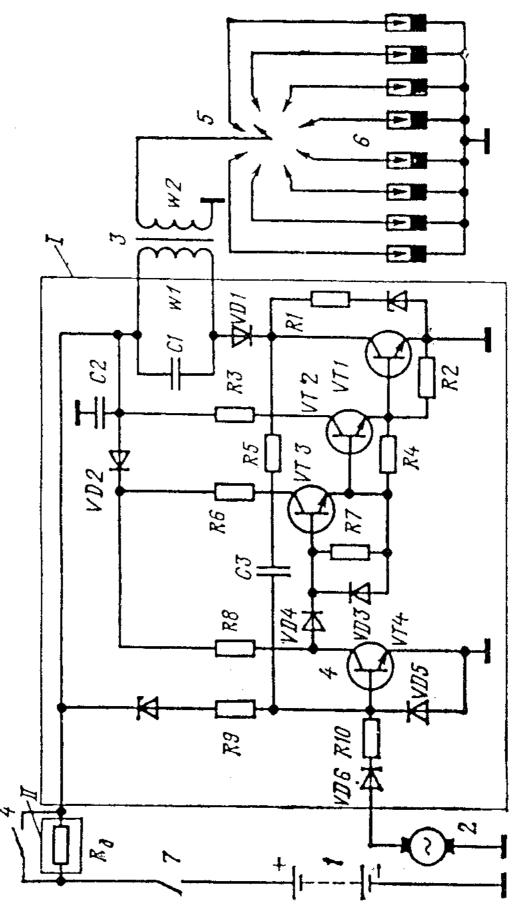


Рис. ПЗ

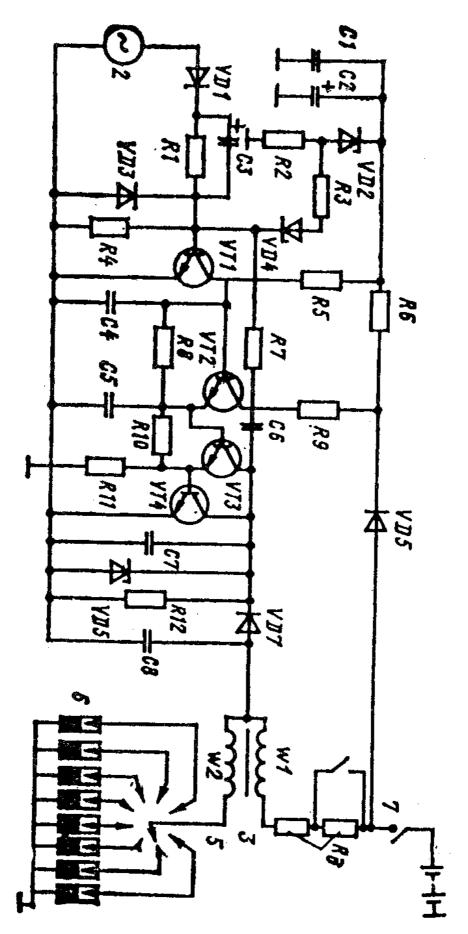


Рис. П4

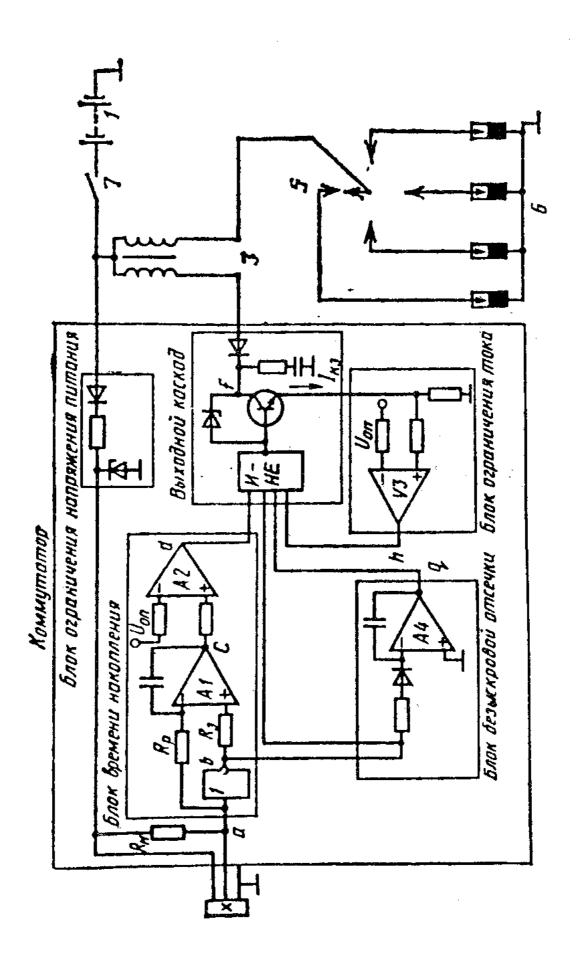


Рис. П5

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ	7
1.1. Принципы построения коммутаторов контактно-транзисторных систем зажигания	. 12
1.2. Бесконтактные системы зажигания	. 19
1.3. Датчики систем зажигания	. 32
1.4. Способы защиты от перенапряжения электронных	
систем зажигания	. 40
2. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТРАНЗИСТОРНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ	. 46
2.1. Особенности коммутации тока транзистором	
при индуктивно-емкостной нагрузке	. 47
2.2. Схемы замещения электронных компонентов	. 54
2.3. Процесс включения первичной обмотки катушки зажигания	
к источнику питания	
2.4. Процесс запирания коммутационного транзистора	. 64
3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТРАНЗИСТОРНЫХ	60
СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ	
3.1. Особенность расчёта параметров транзисторной системы зажигания	
3.2. Выбор принципиальной схемы системы зажигания. Выбор выходного	
транзистора и вспомогательных элементов	
3.3. Расчёт параметров катушки зажигания	. 71
3.4. Расчет элементов цепей управления и защиты выходных каскадов коммутаторов систем зажигания	77
4. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ И ЕЕ СОДЕРЖАНИЕ	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	
ПРИЛОЖЕНИЯ	90

#### Учебное издание

Составитель: МИГУНОВ Александр Леонидович

#### Теория, конструкция и расчет электронных систем зажигания

Редактор *Е.В. Абрамова*Верстка *В.В. Прокопова*Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская* 

Подписано в печать 11.07.12 Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная Усл. п. л. 5,4. Уч.-изд. л. 5,37 Тираж 50 экз. Рег. №62/12

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8