

На правах рукописи

СОСНИН Дмитрий Александрович

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ
ПРИВОД ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ
ПОРШНЕВОГО ДВС**

(05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы)

А в т о р е ф е р а т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2005

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и электрооборудование» Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета)

- Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор ЮтТВ.Е.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Опарин И.М.,
- кандидат технических наук, профессор Купеев Ю.А.
- Ведущая организация - ГНЦ РФ ФГУП НАМИ

Защита состоится 18 августа 2005 года в 10 часов на заседании специализированного совета Д212.126.05 при Московском автомобильно-дорожном институте (государственном техническом университете) по адресу: Москва, Ленинградский пр., дом 64, ауд. № 42.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125319, Москва ГСП-47, Ленинградский пр., дом 64, ученому секретарю совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАДИ (ГТУ).

Телефон для справок: 155-03-28.

Автореферат разослан 16 февр 2005 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук, доцент



Н.В.Михайлова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Разработчикам автомобильных двигателей хорошо известно, что идея создания автомобильного поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) без распределительного вала является исключительно плодотворной. При замене механического привода клапанов на привод от силовых электромагнитов с целью внедрения электронного управления процессами газораспределения открываются новые перспективы дальнейшего совершенствования поршневых двигателей по показателям развиваемой мощности, топливной экономичности и экологии. В середине 80-х годов автомобильные фирмы западных стран начали развивать исследования по созданию новых моделей поршневых ДВС с электромагнитным управлением процессами газораспределения. Основной проблемой, возникающей при проектировании и разработке электронно-управляемого газораспределительного механизма (ГРМ), является проблема создания такого электромагнитного клапана (ЭМ-клапана), который способен развивать значительную тяговую силу (не менее 320 Н) при малых габаритных размерах (не более 50x70 мм) и при этом потреблять из бортсети автомобиля незначительный ток (не более 2,5А на один клапан). Наиболее успешно над решением проблемы работали и продолжают работать инженеры и ученые немецких фирм BMW AG и FEV MT, которым принадлежит подавляющее большинство патентов по ЭМ-клапанам, зарегистрированных за последние 15 лет. Аналогичные исследования ведутся и в других странах: Японии («Mitsubishi»), Италии («Fiat»), США («Ford»), России (АвтоВАЗ, ФГУП НАМИ, МАДИ (ГТУ)). После внедрения в практику новых международных стандартов OBD-II (Onboard diagnostic-II) и EOBD (European On Board Diagnostic) - III (2001 год) требования к понижению концентрации токсичных компонентов в отработавших газах автомобильных двигателей значительно возросли и были закреплены законодательно. При этом требования к повышению топливной экономичности ДВС также стали более жесткими. Теперь все проблемы, связанные с разработкой новых более совершенных ДВС, стали особенно актуальными. К таким актуальным проблемам относится и проблема создания электромагнитного привода для газораспределительных клапанов поршневого двигателя.

Целью работы является: разработка частной теории оптимального проектирования силовых электромагнитных приводов для газораспределительных клапанов ДВС и создание на ее основе инженерной методики расчета новых изделий. Для достижения цели были решены следующие задачи:

теоретическое исследование газораспределительного механизма поршневого двигателя с распределительным валом и механическими клапанами, который рассмотрен как объект автоматического управления;

критический анализ отечественных и зарубежных разработок по электромагнитным клапанам, сведения о которых опубликованы в открытой научно-технической и патентной литературе;

создание теории оптимального проектирования силовых тяговых электромагнитов с применением математического аппарата вариационного исчисления;

разработка инженерной методики расчета силовых электромагнитов с применением современных компьютерных технологий.

Методы исследований, использованные в диссертационной работе, основаны: на теории рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания, с помощью которой проведено исследование основных рабочих параметров и фазовых характеристик газораспределительного механизма поршневого ДВС как объекта автоматического управления; критическом анализе существующих разработок по научным и патентным публикациям; теории оптимального проектирования силовых электромагнитных механизмов; математическом аппарате вариационного исчисления; теории дифференциальных уравнений; методах оптимизации проектирования.

Научная новизна. Разработаны частные теоретические аспекты проектирования электромагнитных газораспределительных клапанов поршневого двигателя, включающие в себя математическое и схематическое моделирование рабочих процессов в сложносоставных электромагнитно-механических приводах. Получены и теоретически обоснованы ранее неизвестные взаимосвязи между различными расчетными значениями магнитодвижущих сил F в работоспособном электромагнитном приводе

$$F_p = F_U = F_D = F_{\theta},$$

где F_p , F_U , F_D , F_{θ} — намагничивающие силы, соответственно определенные из анализа баланса сил P на выходе приводного механизма, анализа баланса напряжения U на входе системы, анализа распределения магнитного поля (индукции B) в воздушном зазоре, анализа теплового баланса по допустимой температуре θ . Получено уравнение связи между текущим значением тяговой силы F_3 приводного электромагнита и текущим значением рабочего воздушного зазора δ в магнитопроводе. Описаны физические связи электрических и магнитных параметров с габаритными размерами и температурой перегрева в электромагнитном клапане. Получены математические зависимости, позволяющие количественно сравнивать электрические, магнитные и размерные параметры электромагнитов для силового привода газораспределительных клапанов при задании различных исходных данных к расчету.

Практическая ценность. Доказана невозможность применения электромагнитного клапана с одним тяговым электромагнитом в реальных ГРМ автомобильных двигателей. Показано, что электромагнитный клапан с двумя (открывающим и закрывающим) электромагнитами может быть рассчитан и спроектирован под реальные технические условия для современных поршневых ДВС и, как следствие, имеет реальную перспективу широкого применения. Внедрена в дипломное проектирование методика инженерного расчета

электромагнитных клапанов поршневых ДВС. Разработан экспериментальный метод расчета параметров и характеристик магнитных цепей электромагнитного клапана на персональном компьютере с применением стандартных программ моделирования и проектирования.

Реализация результатов работы. Теоретическое описание и предложенная методика расчета силовых электромагнитных приводов использованы при проектировании и испытании газораспределительного механизма с электромагнитными клапанами экспериментального двигателя для автомобиля ВАЗ. Материалы диссертационной работы используются в дипломном проектировании студентами энерго-экологического факультета МАДИ(ГТУ).

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях МАДИ(ГТУ) в 1995-2005 гг. и одобрены на заседании кафедры «Электротехника и электроборудование» МАДИ(ГТУ).

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в пяти печатных работах.

На защиту выносятся:

- критический анализ существующих конструкций ЭМ-клапанов для газораспределительных механизмов поршневого ДВС;
- разработанные теоретические аспекты оптимального проектирования ЭМ-клапанов;
- разработанная методика инженерного расчета параметров и характеристик силовых электромагнитов для автоматизированного электропривода ГР-клапанов;
- результаты компьютерного эксперимента по проверке пригодности методики расчета ЭМ-клапанов в инженерном проектировании.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и списка литературы. Содержание составляют 215 страниц, из которых: 125 страниц - текстового материала; 76 страниц - чертежи, графики и таблицы; 7 страниц - приложения; 7 страниц - список литературы (71 наименование).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана целесообразность создания автомобильного ДВС с электронно-управляемыми электромагнитными клапанами в газораспределительном механизме (ГРМ). Обосновывается актуальность темы диссертационной работы, ставится цель и определяются задачи исследований.

В первой главе проведено исследование основных параметров и фазовых характеристик ГРМ 4-цилиндрового четырехтактного бензинового двигателя как объекта автоматического управления. По индикаторной диаграмме такого двигателя определены соотношения рабочих давлений газов в цилиндре ДВС, которые являются исходными данными при расчете тяговых усилий в электромагнитном приводе клапанов. Жесткая кинематическая связь газораспределительных клапанов с коленчатым валом двигателя является главным конструктивным недостатком современных автомобильных ДВС, который препятствует дальнейшему их совершенствованию. Показано, что с введением в ГРМ электронного управления клапанами посредством применения автоматизированного электромагнитного привода фазы газораспределения становятся управляемыми, и поршневой двигатель приобретает совершенно новые качественные показатели по топливной экономичности, экологии выхлопных газов, равномерности крутящего момента и удельной мощности. Определено, что фазовые характеристики в ДВС с «жестким» распределительным валом не могут быть оптимальными, так как каждому конкретному типу двигателя, режиму и условиям его работы соответствует своя фазовая диаграмма (рис. 1).

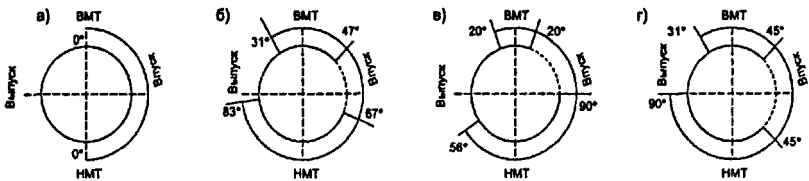


Рис. 1. Фазовые диаграммы различных ДВС:

- а) - теоретического; б) - реального (ЗИЛ-116); в) - с оптимальным газораспределением в ' режиме холостого хода; г) - форсированного

При этом каждому виду фазовой диаграммы соответствует определенная форма кулачков и их положение на распределительном валу. Проведенный расчет оптимальной формы кулачков показал, что дальнейшее улучшение процессов газообмена в поршневом двигателе за счет совершенствования размерных параметров распределительного вала невозможно. Отсюда ясно, что жесткая привязка фаз газораспределения к вращению коленчатого вала, даже при их конструктивном расширении или (и) смещении относительно рабочих тактов двигателя, не является оптимальным способом формирования процессов газораспределения в реальных ДВС, ибо при изменении режима работы двигателя следует соответственно изменить и фазы газораспределения, но жесткая кине-

матика не позволяет этого сделать. При автоматизированном электромагнитном приводе клапанов с управлением от электронной автоматики текущее изменение фаз газораспределения может быть легко реализовано адаптивным управлением клапанами от сигналов датчиков ЭСАУ-Д по заданной программе, которая закладывается и хранится в постоянной памяти ЭБУ.

Во второй главе проведен критический анализ известных конструкций газораспределительных клапанов (ГР-клапанов) с автоматизированным электромагнитным приводом. Аналитический обзор выполнен по патентам и журнальным публикациям за период 1985-2004 гг. Определены и описаны преимущества и недостатки газораспределительных электромагнитных клапанов различных по принципу действия и конструктивному исполнению. Показано, что в большинстве известных разработок используется прямой электромагнитный привод, в котором якорь силового электромагнита сочленен непосредственно со стержнем клапана (рис. 2,а). В таких конструкциях ЭМ-клапана с одним силовым электромагнитом обязательно присутствует жесткая клапанная пружина, работающая на закрытие клапана. Усилие этой пружины должно преодолевать открывающийся электромагнит, что делает его громоздким и непригодным для установки в ГРМ автомобильных двигателей.

Показано, что реальным условиям эксплуатации в автомобильном ДВС отвечает прямой электромагнитный привод ГР-клапана с двумя электромагнитами, один из которых открывающий, а другой закрывающий (рис. 2,б). В такой конструкции ЭМ-клапана запорная клапанная пружина не требуется. Однако остается проблема амортизации соударений подвижных компонентов привода о концевые опоры. Описаны все известные способы амортизации, пригодные для использования в ЭМ-клапанах (пружинные, гидравлические, пневматические, магнитные). Наиболее простая пружинная амортизация уже находит применение в реальных конструкциях ЭМ-клапанов фирмы FEV-MT (ФРГ)

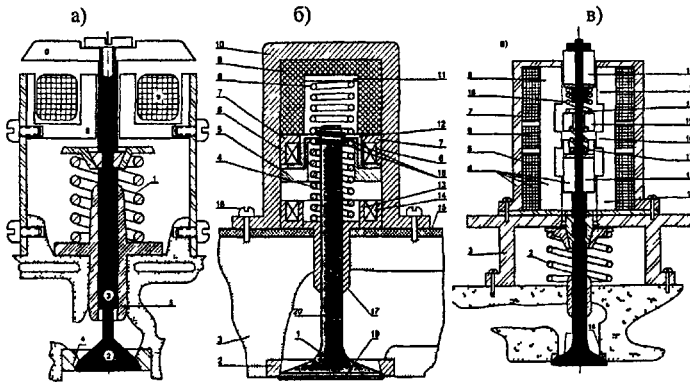


Рис 2 ЭМ-клапаны а) с одним электромагнитом, б) с двумя электромагнитами, в) с соленоидом

Пневматическая и особенно гидравлическая амортизация в ЭМ-клапане не имеет перспективы, так как придает подвижным элементам привода значительную инерционность. Более приемлемыми следует считать электромагнитные способы амортизации путем остановки подвижного якоря в длинном токопроводящем соленоиде, который не имеет краевых опор (рис. 2, в).

Обследованы также опосредствованные (непрямые) способы привода ГР-клапанов, в которых наряду с распределительным кулачковым валом используются электрические устройства управления фазами газораспределения. Такие приводы из-за конструктивной сложности применяются ограниченно.

На основании исследований, проведенных во второй главе, сделан вывод, что все известные публикации по теме отображают лишь конструктивные поиски разработчиков и не содержат сведений о проработке теоретических аспектов проектирования ЭМ-клапанов для автомобильных ДВС. Это обстоятельство послужило мотивом к постановке цели - разработать частную теорию проектирования ЭМ-привода для ГР-клапанов поршневого двигателя, на основе которой создать несуществующую до настоящего времени методику инженерного расчета силовых электромагнитов, пригодных для работы в ГРМ автомобильных двигателей.

В третьей главе разработаны теоретические аспекты оптимального проектирования электромагнитного привода, работающего на тяговом смыкающемся электромагните (см. рис.2,а), для ГР-клапанов поршневого двигателя. Расчетные формулы для определения параметров и характеристик электромагнита составлены с применением вариационного исчисления. Для упрощения математического аппарата при анализе динамики электромагнитного механизма использованы обобщающие параметры и коэффициенты кратности, введенные в уравнения вариационного исчисления. Расчетная модель такого механизма представлена на рис. 3.

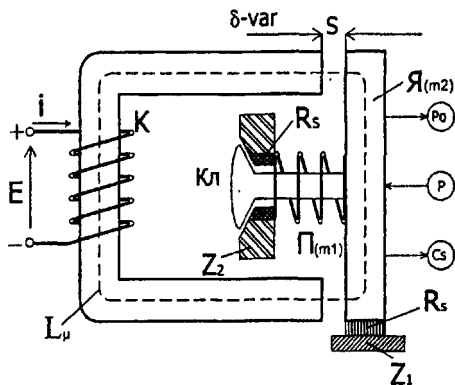


Рис. 3. Расчетная модель ЭМ-клапана:

δ - рабочий воздушный зазор (величина хода S клапана); Π - возвратная запорная пружина; K - намагничивающая катушка; i - ток в катушке K ; $Кл$ - газораспределительный клапан; P - тяговая сила электромагнита; L_{μ} - магнитопровод; $Я$ - якорь; Z_1 - опора 1 (направляющая втулка клапана); Z_2 - опора 2 (фаска посадочного седла клапана); R_s - сопротивление вязкого трения; C_s - эластичность пружины Π ; P_0 - внешние статические силы

При проектировании электромагнитный механизм рассматривается как совокупность трех энергопроводящих цепей: электрической, магнитной и механической. Каждая из трех цепей может быть описана дифференциальными уравнениями с обобщенными параметрами, которые являются и параметрами для расчетной эквивалентной схемы-аналога (рис. 4).

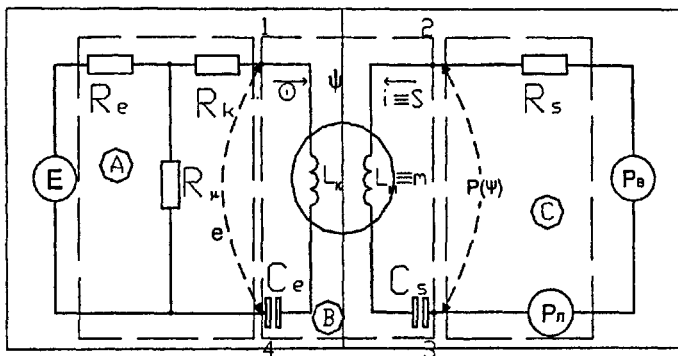


Рис. 4. Расчетная схема-аналог ЭМ-клапана:

А - электрическое звено с потерями; В - электромагнитное звено без потерь; С - механическое звено с потерями; R_k - омическое сопротивление катушки; R_E - омическое сопротивление источника E ; R_μ - эквивалентное сопротивление потерь в ферромагнитных частях; E - внешняя э.д.с.; L_k - индуктивность катушки; C_E - межвитковая емкость катушки; $L_m \rightleftharpoons m$ - приведенная масса подвижных частей; C_s - эластичность клапанной пружины; P_n - сила упругости предварительно сжатой пружины; P_s - сила внешнего воздействия; R_s - коэффициент вязкого трения; ψ - потокоцепление, отображающее связь электрической L_k и механической L_m инерционностей

Условные обозначения обобщенных параметров для электрических, магнитных и механических цепей представлены в диссертации таблично.

Динамическое состояние системы электромагнитного привода ГР-клапана можно описать силовой функцией Лагранжа

$$L = L(q, \dot{q}, t) = L(q_1, q_2, \dots, q_r; \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_r; t), \quad (O)$$

где q - обобщенные параметры в вариационном исчислении.

Для электрического звена схемы-аналога (рис.4,А) q - это количество электричества, протекающего в k -м контуре $q_k = q_1, q_2, \dots, q_m, (1 \dots m)$. Для механического звена (рис.4,С) q - это координата положения якоря в k -м контуре $q_m = q_{m+1}, q_{m+2}, \dots, q_r = S_k; (k=m+1, \dots, r)$. Производные от обобщающих параметров q соответственно равны: токи $\dot{q}_k = dq_k/dt = i(t)$ - для электрического звена в k -м контуре; линейные скорости перемещения $\dot{q}_m = dq_m/dt = dS/dt = V(t)$ -

для механического звена, где S -длина пути перемещения якоря от нулевой точки до координаты q_m .

Значение функции Лагранжа определяется как разность между кинетической T и потенциальной V энергиями рассматриваемой системы

$$L(q, \dot{q}, t) = T - V. \quad (2)$$

Применительно к ЭМ-клапану потенциальная энергия V описывается совокупностью стационарных параметров таких как: геометрические размеры компонентов клапана и его электромагнитного привода; обмоточные данные намагничивающей катушки электромагнита; магнитные свойства ферромагнитных материалов магнитопровода; параметры, характеризующие свойства возвратной запорной пружины; коэффициент трения в подвижных сочленениях, коэффициенты температурного расширения и т.п. Изменение состояния системы между моментами времени t_1 и t_2 описывается интегралом от силовой функции Лагранжа

$$I_D = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt. \quad (3)$$

Согласно принципу наименьшего действия (принципу Гамильтона) при движении системы (изменении ее состояния) в каждый момент времени этот интеграл принимает наименьшее из возможных значений и в вариационном исчислении называется функционалом наименьшего действия. По условиям динамики приводной системы ЭМ-клапана уравнение движения якоря электромагнита, полученное с учетом требования минимума для функционала наименьшего действия, имеет вид

$$I_D[z(x)] = \int_{x_1}^{x_2} L(z) dx \rightarrow \min,$$

где $z(x)$ - неоднородная совокупность, состоящая из перечисленных стационарных параметров, обобщенных параметров q и их производных \dot{q} ; x_1, x_2 - текущее положение (состояние) системы; $L(z)$ - функция Лагранжа, зависящая от совокупности $z(x)$; I_D - интеграл от функции Лагранжа (функционал).

Определение значений функций q, \dot{q} , при которых выполняется данное условие, сводится к решению дифференциального уравнения Эйлера

$$\frac{\partial L(z)}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(z)}{\partial \dot{q}} \right] = 0. \quad (4)$$

В общем случае, когда эквивалентная схема электромагнитного механизма имеет несколько электрических цепей (контуров) и несколько механических цепей, по уравнению Эйлера составляется система из $\langle n \rangle$ уравнений.

$$\frac{\partial L(z)}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(z)}{\partial \dot{q}_k} \right] = 0, \text{ (где } k = 1, 2, 3 \dots r \text{)}.$$

Для составления силовой функции Лагранжа $L(q, \dot{q}_1, t)$ электромагнитно-привода ГР-клапана эквивалентная схема-аналог разбивается на три подсистемы (рис. 4):

- токопроводящую подсистему А с тепловыми потерями электрической энергии в электрической и магнитной цепях электромагнита;
- электромагнитную подсистему В без потерь;
- механическую подсистему С с потерями на трение .

Электромагнитная подсистема (В) без потерь является консервативным звеном в системе тягового электромагнита, и может быть описана силовой функцией Лагранжа (функцией текущего состояния системы, не зависящей от состояния в прошлом). Для такой системы согласно (2) значение силовой функции Лагранжа

$$L = T - V = T^* + U,$$

где T^* - кинетическая коэнергия консервативной системы, определяющаяся как

$$W_k = K_1 \cdot \dot{q}_1 - \int \dot{q} dk \quad W_k = \int K d\dot{q}.$$

Величина W_k может быть условно принята за параметр, который несет формальный сигнал энергии (коэнергии). Если под инерционностью v для электромагнитной системы понимается индуктивность L катушки, то $k = vq = Li = \Psi$, где Ψ - потокосцепление, и тогда

$$W_k = \int_0^i \Psi di = \int_0^i Li di = T_k.$$

В дальнейших расчетах ЭМ-клапана по эквивалентной схеме-аналогу (рис. 4) величина $T_k = T_e^*$ принята за кинетическую коэнергию электромагнитной цепи без потерь. Корректность принятого допущения очевидна из подобия математических выражений для кинетической энергии движущейся массы m механической цепи

$$T_m = \int m \dot{q} d\dot{q} = \frac{m \dot{q}^2}{2} = T_m^*$$

и для кинетической коэнергии магнитного поля

$$T_k = \int_0^i L \cdot i \cdot di = \frac{Li^2}{2} = T_e^*,$$

что справедливо, если индуктивность L катушки не зависит от тока i в ее витках.

Отсюда обобщенная кинетическая коэнергия консервативной электромагнитной системы равна

$$T^* = T_e^* + T_m^*.$$

Здесь T_e^* - суммарная кинетическая коэнергия электрической подсистемы, имеющей r -контуров и V_e сосредоточенных электрических индуктивно-стей L в цепи

$$T_e^* = \sum_{k=1}^r \sum_{p=1}^{V_e} (T_e^*)_{pk} ,$$

а T_m^* - суммарная кинетическая энергия механической подсистемы, имеющей V_m число сосредоточенных масс m в механической цепи

$$T_m^* = \sum_{k=1}^r \sum_{p=1}^{V_m} (T_m^*)_{pk} .$$

Для механической цепи при $L_m \Leftrightarrow m$

$$(T_m^*)_{pk} = \frac{m_{pk} V_k^2}{2} .$$

При рассмотрении электромагнитного механизма с возвратной пружиной обобщенная потенциальная энергия V определяется как

$$V = - \int Q_c dq , \quad (5)$$

где Q_c - обобщенная сила упругости, а dq - обобщенный параметр состояния системы.

Для электрической цепи суммарная запасенная потенциальная энергия

$$V_e = \sum_{k=1}^r \sum_{p=1}^{V_e} (V_e)_{pk} ,$$

где V_e - число сосредоточенных электрических емкостей C_e .

Для электрической цепи (

$$(V_e)_{pk} = \frac{0,5 q_{ek}^2}{(C_e)_{pk}} ,$$

где q_e - обобщенный параметр электрической цепи - электрический заряд.

Для упругих элементов механической подсистемы ЭМ-клапана суммарная потенциальная энергия

$$V_m = \sum_{k=1}^r \sum_{p=1}^{V_m} (V_m)_{pk} ,$$

где V_m - число упругих элементов (пружин) C_m в механической цепи.

Для механической цепи (рис. 4)

$$(V_m)_{pk} = \frac{-0,5q_{mk}^2}{(C_m)_{pk}},$$

где q_m - обобщенный параметр механической цепи - перемещение якоря электромагнита S_k (и пружины соответственно). Отсюда обобщенная потенциальная энергия консервативной электромагнитной системы ГР-клапана с запорной пружиной

$$V = V_e - V_m,$$

знак «минус» - для учета увеличения упругой силы возвратной запорной пружины при ее сжатии (при открывании ГР-клапана).

Таким образом, силовая функция Лагранжа для электромагнитного привода с возвратной запорной пружиной в консервативной подсистеме определена как

$$L(q_1 q', t) = T^* - V = (T^*_e + T^*_m) - (V_e - V_m). \quad (6)$$

Для полной характеристики системы силового электромагнита потери в электрической и механической цепях не могут быть исключены из рассмотрения. Поэтому в выражение (6), описывающее состояние консервативной электромагнитной системы без потерь (рис. 4,В), внесены коррективы за счет неконсервативных подсистем с потерями (рис. 4,А и 4,С). Джоулевые потери в проводах R_e , катушке R_k и потери в стали R_μ вынесены в электрическую подсистему с потерями (рис. 4,А). Аналогичные потери, связанные с вязким трением, характеризующиеся коэффициентом R_s , вынесены в механическую подсистему с потерями (рис. 4,С).

Для учета потерь определим неконсервативную кинетическую энергию. Найдем функцию, зависящую от обобщенной скорости, функцию рассеяния

$$D_R = \int_0^q \sum_{k=1}^r R_k \dot{q}_k d\dot{q}_k = \sum_{k=1}^r 0,5 R_k (\dot{q}_k)^2.$$

Функция неконсервативной кинетической коэнергии

$$T_D^* = \int_0^t D_R dt = \int_0^t 0,5 \sum_{k=1}^r (\dot{q}_k)^2 R_k dt.$$

Для эквивалентной схемы-аналога кинетическая коэнергия рассеяния в электрической цепи (рис. 4,А) определяется как

$$\left(T_{De}^*\right)_{pk} = 0,5(R_e)_{pk} \int_0^t i_k^2(t) dt,$$

где $p = 1 \dots v_e$; $k = 1 \dots r$; v_e - число рассеивающих элементов R_e в k -м контуре электрических цепей. Энергия рассеяния в механической цепи (рис. 4,С)

$$(T_{Dm}^*)_{pk} = 0,5(R_m)_{pk} \int_0^t V_k^2 dt,$$

где $p = 1...v_m$; $k = 1...r$; v_m - число рассеивающих элементов R_m в механических узлах ЭМ-привода.

Обобщенная кинетическая коэнергия рассеяния в ЭМ-приводе для ГР-клапана определяется как

$$T_D^* = T_{De}^* + T_{Dm}^*.$$

Для учета влияния сторонних сил E , $P_{\text{вс}}$ можно связать их воздействие с неконсервативной потенциальной энергией по аналогии с (5)

$$V_Q = \int_0^q \sum_{k=1}^r (-Q_{ik}) dq_k = - \sum_{k=1}^r \int_0^{q_k} Q_{ik} \cdot dq_k. \quad (7)$$

Так как для электромагнитного привода ГР-клапана сторонние силы воздействия не зависят от обобщенных параметров q и их скоростей \dot{q} , а являются суммарными постоянными внешними воздействиями или зависят только от времени, то выражение (7) для ГР-клапана будет иметь вид

$$V_Q = \sum_{k=1}^r Q_{ik} q_k.$$

Для электрической цепи эквивалентной схемы-аналога (рис. 4,А) суммарная потенциальная энергия V_{Qe} внешней э. д. с. определяется как

$$(V_{Qe})_{pk} = -(E)_{pk} \cdot q_{ek},$$

где $p = 1...v_e$; $k = 1...r$; v_e - число внешних э.д.с. E в k -й электрической цепи; q_e - k -й электрический заряд. Для механической цепи (рис. 4,С) суммарная потенциальная энергия V_{Qm} внешних сил воздействия на ЭМ-клапан

$$(V_{Qm})_{pk} = -(Q_t)_{pk} \cdot q_{mk},$$

где $p = 1...v_m$; $k = 1...r$; v_m - число внешних сил механического воздействия; q_m - k -е перемещение.

Обобщенная потенциальная энергия V_Q внешних сил, действующих на ЭМ-привод

$$V_Q = V_{Qe} + V_{Qm}.$$

При анализе динамики неконсервативной подсистемы электромагнитного механизма ГР-клапана было показано, что принцип наименьшего действия Гамильтона может быть использован и для таких систем, только уравнение Эйлера (4) должно быть модифицировано под неконсервативные параметры.

Для этого в качестве силовой функции $L(q, \dot{q}, t)$ Лагранжа необходимо при-
менить новый неконсервативный лагранжиан

$$L_{QD}(q, \dot{q}, t) = (T^* + T_D^*) - (V + U_Q). \quad (8)$$

Отсюда уравнение Эйлера для неконсервативной системы электромаг-
нитного механизма имеет вид

$$\frac{\partial L_{QD}}{\partial \dot{q}_k} - \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_{QD}}{\partial \dot{q}_k} \right] = 0. \quad (9)$$

Решение этого уравнения в общем виде будет содержать произвольные
постоянные. Полное описание состояния ЭМ-системы сводится к определе-
нию ряда этих произвольных постоянных, для чего необходимо знать началь-
ные условия, в которых находится ЭМ-система в наперед заданный момент
времени. Начальные условия можно задать в виде совокупности дополни-
тельных ограничений.

В эту совокупность включаются основные ограничения по условиям ста-
тики, гарантирующие стабильное функционирование:

а) ограничение, обеспечивающее надежное срабатывание ЭМ-клапана от
начальной тяговой силы P_o электромагнита

$$P_o(z) - \chi_p P_{so} = 0, \quad (10)$$

где P_{so} - противодействующая сила запорной возвратной пружины при отпу-
щенном якоре ЭМ; χ_p - запас по противодействующей силе P_{so} , учитывающий
технологический и эксплуатационный разброс параметров пружины ($\chi_p > 1$);

б) ограничение по допустимому максимальному нагреву θ_{max}

$$\theta_{max}(z) - \chi_\theta \theta_{дон} = 0, \quad (11)$$

где $\theta_{дон}$ - допустимое превышение температуры нагрева; χ_θ - запас по нагреву
в установившемся режиме ($\chi_\theta > 1$);

в) ограничение по индукции насыщения B_n магнитопровода силового
электромагнита

$$B(z) - \chi_b B_n = 0, \quad (12)$$

где χ_b - запас по насыщению ($\chi_b \leq 1$);

г) ограничение по допустимому максимальному отклонению напряжения бортовой сети автомобиля, приложенного к намагничивающей катушке ЭМ

$$U(z) - \chi_u U_H = 0, \quad (13)$$

где U_H - номинальное напряжение; χ_u - допустимое уменьшение напряжения ($\chi_u \leq 1$);

д) ограничение на заполнение площади $S_{ок}$ окна катушки электромагнита проводом сечением S_w

$$K(z) - \chi_y K(S_w) = 0, \quad (14)$$

где $K(S_w)$ - допустимый коэффициент заполнения; χ_y - запас по укладке витков катушки, учитывающий толщину изоляционных прокладок и неплотность укладки витков.

Для инженерных расчетов уравнения ограничений (10)...(14) целесообразно преобразовать в зависимости намагничивающей силы электромагнита $F = I \cdot \omega$ от ограничивающих факторов

$$F = F_p(z, P_{во}); F = F_\theta(z, \theta_{дон}); F = F_B(z, B_{нас}); F = F_u(z, U_H); F = F_i(z, i_k); F = F_\omega(z, \omega).$$

По условиям динамики электромагнитного механизма ГР-клапана к основным ограничениям может быть отнесено уравнение движения якоря ЭМ

$$I_D [z(x)] = \int_{x_1}^{x_2} L(z) dx \rightarrow \min,$$

где I_D - интеграл наименьшего действия; $L(z)$ - силовая функция Лагранжа.

В четвертой главе на основе проведенных в главе 3 теоретических исследований динамики электромагнитного привода для ГР-клапана разработана методика расчета силовых электромагнитов. Выведены и обоснованы критерии оптимального проектирования: конструктивные (геометрические размеры магнитопровода, величина воздушного зазора δ_0) и энергетические (требуемая тяговая сила электромагнита, заданный температурный режим). Составлены уравнения, связывающие критерии и основные параметры силового смыкающегося электромагнита, к последним относятся: тяговая сила $F_T \cdot P_{во}$, величина рабочего воздушного зазора δ_0 , допустимая температура перегрева катушки и геометрические размеры магнитопровода. Показано, что, задавшись одним из критериев, по составленным уравнениям и с учетом рекомендованной совокупности дополнительных ограничений легко рассчитывать все параметры и характеристики силового электромагнита.

Аналитический обзор известных конструкций ГР-клапанов с электромагнитным приводом (глава 2) указывает на исключительное разнообразие их

устройств. Однако общим является то, что во всех конструкциях таких клапанов используются электромагниты с возвратно-поступательным перемещением якоря, который жестко соединен со стержнем ГР-клапана. Это позволило выбрать в качестве расчетного прототипа ЭМ-клапан с открывающим электромагнитом и жесткой возвратной пружиной (рис. 2,а). С использованием разработанных теоретических аспектов проектирования (глава 3) для выбранного прототипа составлена расчетная модель ЭМ-клапана (рис. 3).

Чтобы определить тяговую силу F_T электромагнита, составлен энергетический баланс для выбранной конструкции электромагнитного привода. Энергетический баланс приводного устройства отображает закон сохранения энергии и в общем виде может быть описан как

$$W_{ax} = W_{вых} + W_{ном}.$$

В случае электромагнитного привода входная энергия W_{ax} - это электрическая энергия W_e , потребляемая ЭМ-приводом из борсети автомобиля, а выходная энергия $W_{вых}$ - это выходная механическая энергия W_O , затраченная на полезное перемещение (открытие) ГР-клапана. Потери энергии $W_{ном}$ в ЭМ-приводе складываются из активных потерь в омических сопротивлениях W_R , потерь в магнитопроводе W_{μ} , механических потерь на трение и демпфирование в подвижных частях W_d , а также из реактивных потерь в магнитном поле токопроводящей катушки W_L , потерь, связанных с накоплением электрической энергии в электростатическом поле системы W_c и реактивных механических потерь на преобразование потенциальной энергии подвижных масс привода в кинетическую энергию их движения W_m . Тогда энергетический баланс ЭМ-привода можно представить так:

$$W_e = W_O + W_R + W_{\mu} + W_d + W_L + W_c + W_m. \quad (15)$$

На основании формулы (15) построена энергетическая диаграмма ЭМ-клапана (рис. 5), которая наглядно показывает распределение энергетических потоков в ЭМ-приводе для ГР-клапана с возвратной (запорной) пружиной.

Если с целью упрощения расчета допустить, что W_c и W_m - относительно малые величины, а потери W_R в катушке отнести к потерям во внешней электрической цепи, то выражение для полезной электрической энергии W_e , затраченной на механическую работу, значительно упростится и примет вид

$$W_e = W_L + W_{Mex}.$$

Величина W_e может быть найдена как

$$W_e = \int_0^t e i dt = \int_0^t E i dt - \int_0^t R_e i^2 dt \quad W_e = \int_0^t \frac{d\psi}{dt} \cdot i dt = \int_0^{\psi} i(\psi, S) d\psi. \quad (16)$$

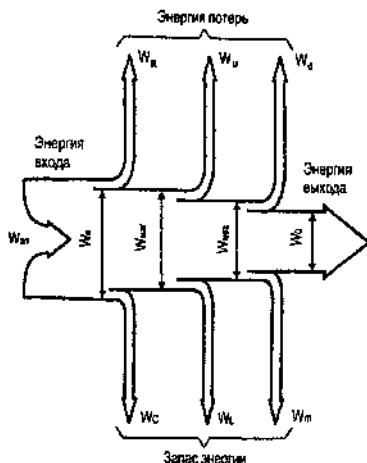


Рис. 5. Диаграмма энергетического баланса ЭМ-клапана

Здесь $e = \frac{d\psi}{dt}$ - разность потенциалов, компенсирующая противоЭДС, наводимую в обмотке намагничивающей катушки при изменении потокосцепления ψ ; $i = I(\omega, \delta)$ - ток в катушке, определяемый потокосцеплением ψ и переменным воздушным зазором $\delta = S$ в магнитопроводе. После преобразований уравнения (16) получим

$$P_{\mathcal{E}} = P_{cp} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta W_{mex}}{\Delta S} = \frac{dW_{mex}}{dS}$$

и тогда

$$P_{\mathcal{E}} = -\frac{\partial W_L(\psi, S)}{\partial S}, \quad i = +\frac{\partial W_L(\psi, S)}{\partial \psi}.$$

Используя выражение для энергии W_L , запасенной в магнитном поле системы, имеем

$$P_{\mathcal{E}} = -\int_0^{\psi} \frac{\partial i(\psi, \bar{S})}{\partial S} d\psi. \quad (17)$$

Уравнение (17) получено с учетом энергетических закономерностей, имеющих место в одноконтурных энергопроводящих цепях ЭМ-клапана. При расчете более сложных цепей тяговая сила электромагнита определяется с использованием силовой функции Лагранжа и обобщенных уравнений движения системы (глава 3).

В соответствии с (9) уравнение движения в общем виде можно представить как

$$\frac{\partial L(z)}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L(z)}{\partial \dot{q}_k} = 0,$$

где $L(z)$ - силовая функция Лагранжа (8), которая для неконсервативной системы в общем виде равна

$$L(z) = (T^* + T_D^*) - (V + V_Q).$$

В качестве независимых переменных q_k и \dot{q}_k в электрической цепи схемы-аналога (рис.4,А) приняты электрический заряд q_1 и его производная $\dot{q}_1 = i_1$ - ток в намагничивающей катушке. В механической цепи схемы (рис. 4,С) в качестве независимых переменных q_k и \dot{q}_k выбраны перемещение S_1 якоря и сжатие S_2 клапанной пружины. Тогда контурные токи в выходной цепи схемы-аналога можно представить как скорости \dot{S}_1 и \dot{S}_2 . Расчетная схема-аналог описана силовой функцией Лагранжа (8), в которую входят следующие слагаемые.

1) Обобщенная консервативная кинетическая коэнергия, которая определяется как

$$T^* = T_e^* + T_m^* = \int_0^{i_1} \Psi_1(i_1, S_1) di + \frac{1}{2} m_1 \dot{S}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{S}_2^2.$$

2) Обобщенная неконсервативная кинетическая коэнергия находится аналогично

$$T_D^* = T_{De}^* + T_{Dm}^* = \frac{1}{2} R_{e1} \int_0^{i_1} i_1^2(t) dt + \frac{1}{2} R_{S1} \int_0^{\dot{S}_1} \dot{S}_1^2(t) dt + \frac{1}{2} R_{S2} \int_0^{\dot{S}_2} \dot{S}_2^2(t) dt.$$

3) Обобщенная консервативная потенциальная энергия

$$V = V_e + V_m = \frac{q_1^2}{2C_e} + \frac{(S_1 - S_2)^2}{2C_S}.$$

4) Обобщенная неконсервативная потенциальная энергия

$$V_Q = V_{Qe} + V_{Qm} = P_{ba} \cdot S_1 - E_0 \cdot q_1.$$

Уравнение движения Эйлера для схемы-аналога при $q_k = S_1$ можно записать в виде

$$\frac{\partial L}{\partial S_1} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{S}_1} = 0.$$

После определения частных производных и подстановки их в уравнение Эйлера получено выражение, обобщающее все расчетные параметры схемы-аналога

$$\int_0^{i_1} \frac{\partial \Psi_1}{\partial S_1} di_1 = \frac{S_1 - S_2}{C_S} + P_{\delta_0} + m_1 \dot{S}_1 + R_{S1} \dot{S}_1. \quad (18)$$

Правая часть уравнения (18) представляет собой сумму внешних сил P_3 , которую должна преодолевать тяговая сила электромагнита $F_T = P_3$. Тогда тяговая сила электромагнита

$$F_T = P_3 = P_0 = \int_0^{i_1} \frac{\partial \Psi}{\partial S_1} di. \quad (19)$$

Выражение (19) для тяговой силы электромагнита, выведенное с применением принципа Гамильтона (3) и функции Лагранжа (1), идентично выражению (17), полученному из энергетического баланса электромагнитного привода с разветвленными входами и выходами использованием силовой функции Лагранжа и принципа наименьшего действия Гамильтона дает существенное преимущество. Если допустить, что индуктивность системы $L(S)$ (катушки и подвижного звена m_1) не зависит от тока i_1 и пренебречь насыщением стали, то формулу (19) для расчета тяговой силы P_3 электромагнита можно выразить через намагничивающую силу $f = i\omega$ токопроводящей катушки, что крайне важно для практических расчетов

$$P_3 = \int_0^{i_1} \frac{\partial L(S)}{\partial S} di = \frac{\partial L(S)}{\partial S} \cdot \int_0^{i_1} i di = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(S)}{\partial S} = \frac{1}{2} i^2 \omega^2 \left| \frac{dG(S)}{dS} \right| = \frac{1}{2} f^2 \frac{dG(S)}{dS}. \quad (20)$$

В формуле (20) $\psi = iL(S)$, ($i_1 = i$, $S_1 = S$), где $L(S) = \omega^2 \cdot G(S)$ - индуктивность системы, ω - число витков катушки, $G(S)$ - приведенная проводимость системы.

В общем случае, когда в реальной магнитопроводящей системе имеется несколько воздушных зазоров, тяговая электромагнитная сила P_3 с достаточной точностью может быть определена как сумма сил, проявляющих себя за счет изменения проводимостей в p - переменных воздушных зазорах

$$P_0 = \sum_{k=1}^n P_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n f_k^2 \frac{dG_k}{dS}. \quad (21)$$

Для дальнейших расчетов переменный рабочий воздушный зазор δ_0 выделен как основной, а тяговая сила P_3 в нем принята за базисную; установившееся значение намагничивающей силы электромагнита принято равным F_p , а в основном воздушном зазоре как F_0 . Для учета падения намагничивающей

Тогда можно записать:

$H_k = ma$ - высота намотки катушки;

$A_k = na$ - ширина намотки катушки;

$d_n = ea$ - диаметр полюсного наконечника якоря;

$A_3 = n_3a$ - толщина эпоксидного защитного слоя;

$\Delta n = \Delta \tau = \gamma a$ - высота полюсного наконечника якоря;

m, n, e, n_3, γ - основные коэффициенты кратности.

Помимо этого, любой линейный размер и любая площадь могут быть также представлены через определяющий размер:

$S_{0x} = \lambda_{0x} a^2$ - площадь поверхности охлаждения катушки;

$S_{0k} = \lambda_{0k} a^2$ - площадь окна намотки катушки;

$S_{\Pi} = \lambda_{\Pi} a^2$ - площадь торца полюсного наконечника;

$L_{ср} = \tau_{ср} a$ - длина средней линии витка намотки катушки;

$\lambda_{0x}, \lambda_{0k}, \lambda_{\Pi}, \tau_{ср}$ - обобщенные функции основных коэффициентов кратности, каждая из которых есть функция вида $F = f(m, n, e, \gamma)$.

Для универсальности и дальнейшего упрощения расчетов введено понятие «относительный определяющий размер»

$$x = \frac{a}{\delta_0} = \frac{d_c}{\delta_0}.$$

В общем случае проводимость $G_0(z)$ воздушного зазора зависит от многих факторов: размера сердечника d_c , величины δ_0 и формы рабочего зазора, совокупности размеров опорных поверхностей в зазоре. С учетом сказанного проводимость рабочего зазора определена путем разбиения магнитного поля в области зазора на несколько трубок магнитного потока (метод Ротерса). Тогда проводимость G_0 воздушного зазора можно представить как

$$G_0 = G_{\delta} + \sum_{\mu=2}^k G_{\mu} = \epsilon_0^2 \cdot G_{\delta},$$

где G_{δ} - базовая проводимость (укрупненной трубки).

ϵ_0^2 - корректирующая функция, зависящая от формы и размеров опорных поверхностей рабочего зазора. Для выбранной расчетной модели (рис. 6) проводимость G_0 может быть определена как

$$G_0 = \epsilon_0^2 \mu_0 \frac{\pi d^2}{4 \delta_0} = \epsilon_0^2 \mu_0 \frac{S_{\Pi}}{\delta_0}. \quad (23)$$

Производная проводимости рабочего зазора с учетом (23)

$$\frac{dG_0}{d\delta} = -\mu_0 \lambda_{\Pi} \epsilon_D^2 \frac{a^2}{\delta^2} = -\mu_0 \lambda_{\Pi} \epsilon_D^2 x^2, \quad (24)$$

где

$$\epsilon_D^2 = \left(\epsilon_0^2 - \delta \frac{d\epsilon_0^2}{d\delta} \right).$$

Функция ϵ_D^2 показывает, во сколько раз производная от проводимости реального зазора отличается от производной базисной проводимости.

Для надежного срабатывания ЭМ-клапана введены дополнительные ограничения (10) по силе P_0 и номинальному напряжению U_n (13), тогда

$$P_0 - k_0 \cdot P_{eo} = 0, E - \chi_u \cdot U_n = 0.$$

Исходя из уравнений (22) и (24), значение намагничивающей силы

$$F_p = \sqrt{\frac{2k_0 P_{eo}}{\mu_0 \Phi_0^2 \epsilon_D^2 \chi_u^2 \lambda_{\Pi} x^2}}. \quad (25)$$

Далее задача расчета электромагнита сведена к определению относительного определяющего размера x . Для решения поставленной задачи составлено уравнение $F_\theta = F_p$, отвечающее принципу соответствия намагничивающих сил, согласно которому намагничивающие силы F_n , определенные из анализа различных физических процессов, протекающих в магнитной системе, равны между собой.

Так как намагничивающая сила катушки F определяется током i , который протекает по ее виткам ω и, следовательно, ограничивается условиями нагрева и охлаждения обмотки, то из анализа теплового баланса катушек для систем постоянного тока при заданной температуре нагрева обмотки имеем

$$F_\theta = \sqrt{\frac{k_{з.м.} \cdot S_{ок} \cdot S_{окл} \cdot h_n \cdot x_\theta \cdot \theta_{доп}}{\rho \cdot l_{cp}}}, \quad (26)$$

где $k_{з.м.}$ - коэффициент заполнения окна намотки; $S_{ок}$ - поверхность охлаждения; h - коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки; x_θ - запас по допустимой температуре; $\theta_{доп}$ - допустимое превышение температуры обмотки; ρ - удельное сопротивление обмотки; l_{cp} - длина среднего витка обмотки. Выразив параметры, входящие в формулу (26), через определяющий размер a и приравняв (25) и (26), получим формулу для значения определяющего размера в виде

$$a = \sqrt[5]{\frac{2\rho \cdot \lambda_{cp} \cdot k_0 \cdot P_{eo} \cdot \delta_0^2}{\theta_{доп} \cdot \mu_0 \cdot x_\theta \cdot k_{з.м.} \cdot \chi_u^2 \cdot h \cdot \lambda_{ок} \cdot \lambda_{окл} \cdot \lambda_{\Pi} \cdot \Phi_0^2 \cdot \epsilon_D^2}}, \quad (27)$$

В соответствии с (27) значение относительного определяющего размера

$$x = \frac{a}{\delta} = \sqrt[5]{\frac{C}{\theta_{доп}} \cdot \frac{D(\zeta)}{K(x)} \cdot \frac{P_{eo}}{\delta_0^3}}, \quad (28)$$

где C - комплекс принятых постоянных величин и параметров

$$C = \frac{2\rho K_0}{\mu_0 \cdot x_0 \cdot k_{\text{г.м.}} \cdot \chi_{\text{н}}^2 \cdot h}; \quad (29)$$

ДО - комплекс кратностей геометрических размеров $\zeta = \zeta(\lambda_{\text{ок}}, \lambda_{\text{окт}}, \lambda_{\text{п}}, \lambda_{\text{ср}})$

$$D(\zeta) = \frac{\tau_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{ок}} \cdot \lambda_{\text{окт}} \cdot \lambda_{\text{п}}}; \quad (30)$$

$K(x)$ - комплекс корректирующих функций

$$K(x) = \varphi_0^2(x) \cdot \varepsilon_D^2(x). \quad (31)$$

Преобразуем (28) в вид, удобный для инженерных расчетов

$$x^5 \cdot \varphi_0^2(x) \cdot \varepsilon_D^2(x) = C_0 D(\zeta), \quad (32)$$

где

$$C_0 = \frac{C \cdot P_{\text{во}}}{\theta_{\text{дон}} \cdot \delta_0^3}.$$

Для определения суммы реальных внешних сил $P_{\text{во}}$ был проведен анализ динамики работы ГР-клапана поршневого двигателя ВАЗ-1600, из которого найдена величина $P_{\text{во}}$ как сумма трех сил: $P = P_{\text{г(г)}} + P_{\text{г}} + P_{\text{пр}} = 317,49 \text{ Н}$, где $P_{\text{пр}} = 59,19 \text{ Н}$ - сила предварительно сжатой пружины, $P_{\text{г}} = 184,5 \text{ Н}$ - сила давления газов на клапан в момент открытия, $P_{\text{г(г)}} = 73,8 \text{ Н}$ - сила инерции движущихся масс клапана. С учетом коэффициента запаса сила $P_{\text{во}}$ выбрана равной 380 Н.

Практическая ценность методики расчета параметров ЭМ-клапана по разработанной обобщенной формуле (32) состоит в том, что с ее помощью можно рассчитать любой из четырех основных параметров ($P_{\text{во}}$, x , δ , $\theta_{\text{дон}}$) силового электромагнита, задавшись значениями трех остальных. Это делает предлагаемую методику универсальной и пригодной для расчетов на ЭЦВМ.

В пятой главе проведена экспериментальная проверка пригодности разработанной методики для проектирования ЭМ-клапанов в инженерной практике. Расчет электрических магнитных и размерных параметров выполнен на персональном компьютере «Pentium-4» с использованием универсальной программы проектирования Microsoft-Excel-2002. Апробированы полученные расчетные формулы (27)...(31) с использованием наперед заданных условий и коэффициентов кратности. В качестве исходных данных использованы условия работы выпускного клапана двигателя ВАЗ-2106 и прототип ЭМ-клапана, исследованный в главе 3 (см. рис. 2,а).

Исходные данные и результаты расчета сведены в таблицу.

Наименование параметра	Значения параметров					
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	Вариант 6
Габариты ЭМ (мм)	52,8×155,4	<u>848×84</u>	<u>48×84</u>	<u>48×84*</u>	<u>48×84*</u>	<u>48×84*</u>
Ход якоря (мм)	<u>3</u>	<u>3</u>	1,3	<u>3</u>	<u>2</u>	1,83
Тяговое усилие (Н)	<u>380</u>	93,37	<u>380</u>	191,5	299	<u>400</u>
Температура катушки (°С)	<u>90°С</u>	<u>90°С</u>	<u>90°С</u>	<u>90°С</u>	<u>90°С</u>	<u>90°С</u>
Число витков катушки	1730	2160	-	-	-	-
Потребляемая мощность (Вт)	19,89	13,38	-	-	-	-

* - При расчетах коэффициент запаса по силе уменьшен до $K_0 = 1,2$. * - Подчеркнутые значения параметров - исходные данные для расчета; без черты - расчетный параметр.

Из результатов расчета, приведенных в таблице, следует:

- чтобы обеспечить ЭМ-клапану заданное открывающее усилие (380Н), электромагнит должен обладать большими габаритами 52,8x155,4мм (вар. 1);
- если при тех же исходных условиях выполнить требование обеспечения номинальных для ЭМ-клапана габаритных размеров (48x84 мм), то тяговая сила силового электромагнита не превысит 93,37 Н (вар. 2);
- можно получить требуемую тяговую силу от электромагнита с приемлемыми габаритными размерами, но степень открытия клапана, равная ходу якоря, не превысит 1,3 мм (вар. 3);
- значения рабочих параметров ЭМ-клапана можно приблизить к требуемым путем уменьшения расчетного коэффициента запаса ($K_0 = 1,2$), т.е. путем понижения эксплуатационной надежности ЭМ-клапана (вар. 4 и 5);
- значительную тяговую силу (400 А) можно получить от электромагнита стандартных размеров, если задать ход якоря (степень открытия клапана) не более 1,83 мм (вар. 6), что является следствием увеличения магнитной проводимости рабочего воздушного зазора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ физических процессов газообмена в поршневом двигателе показал, что с применением электронного автоматического управления клапанами достигается улучшение топливной экономичности, экологических и мощностных показателей двигателя.

2. Получены дифференциальные уравнения, описывающие движение якоря электромагнита в ГР-клапане, и разработаны способы их решения.
3. Впервые теоретически описаны взаимосвязи электрических, магнитных и механических параметров силовых электромагнитов, предназначенных для работы в ЭМ-клапане.
4. Разработана методика составления и расчета эквивалентной схемы-аналога для электромагнитного привода ГР-клапана.
5. Определены оптимальные параметры и характеристики ЭМ-клапана.
6. Установлены основные факторы, влияющие на форму тяговой характеристики электромагнита, и предложен способ ее коррекции путем введения в рабочий воздушный зазор ферромагнитного шунта с заданной формой.
7. Разработаны устройство и принцип действия ЭМ-клапана с одним и двумя электромагнитами, проведено сравнение их параметров, и показана целесообразность применения ЭМ-клапана с двумя электромагнитами.
8. На основании проведенных теоретических исследований разработана методика инженерного расчета электромагнитных клапанов для газораспределительного механизма поршневого двигателя.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Соснин Д.А. Клапаны с электромагнитным приводом для газораспределительного механизма поршневого двигателя. - М.: Ремонт и Сервис, 2001, №12 (39).
2. Соснин Д.А. Рабочие процессы в автомобильных двигателях внутреннего сгорания // Автотроника (Электрооборудование и системы бортовой автоматики современных легковых автомобилей). - М.: Солон-Р, 2001.
3. Соснин Д.А. Электромагнитный привод газораспределительных клапанов в поршневом двигателе внутреннего сгорания // Соснин Д.А. и Яковлев В.Ф. Новейшие автомобильные электронные системы. - М.: Солон-Пресс, 2005. - 486 с.
4. Соснин Д.А., Колесниченко В.Н. Теоретические аспекты современных электронных систем управления для двигателей внутреннего сгорания. // Сборник научных трудов МАДИ. 1981, № 187.
5. Соснин Д.А. Моделирование процессов в цепях переменного тока при помощи компьютерной системы MultiSim 2001. // Гаврилов Л.П. и Соснин Д.А. Расчет и моделирование линейных электрических цепей с применением персонального компьютера. - М.: Солон-Пресс, 2004. - 492 с.

05.09 - 05.11

22 АПР 2005



1326