

На правах рукописи

УДК 621.436

Чжао Цзяньхуэй

СОЗДАНИЕ ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ С  
ЭЛЕКТРОКЛАПАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Специальность 05.04.02 - Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре «Поршневые двигатели».

Научный руководитель: **Грехов Леонид Вадимович**  
доктор технических наук, профессор, кафедра  
«Поршневые двигатели» ФГБОУ ВПО  
«Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана»

Официальные оппоненты: **Голубков Леонид Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, кафедра «Теплотехника и автотракторные двигатели» ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

**Савастенко Андрей Александрович**  
кандидат технических наук, доцент, кафедра «Теплотехника и тепловые двигатели» ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячника»

Защита диссертации состоится «04» апреля 2013 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

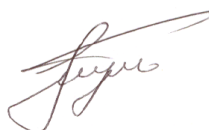
Ознакомиться с диссертацией можно в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент



Тумашев Р.З.

## ОБЩИЕ ПО ТЕКСТУ СОКРАЩЕНИЯ

ТПА - топливоподающая аппаратура    ЭМП - электромагнитный привод  
ЭКУ - электроклапанное управление    ТНВД - топливный насос высокого давления

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** ТПА с ЭМП управляющего клапана позволяет гибко изменять угол опережения впрыскивания, формировать внешнюю скоростную характеристику, в некоторых системах - управлять давлением и характеристикой впрыскивания. Снижение времени срабатывания исполнительного механизма - быстродействующего ЭМП управляющего клапана - повышает точность топливоподачи, позволяет организовывать многократное впрыскивание, обеспечивать минимум образования крупных капель и др.

Создание новой ТПА тормозится недостаточностью опыта и удобных и достоверных математических моделей, пригодных для оптимизации такой ТПА. Использование уточненной математической модели для описания механических, гидромеханических, электрических и магнитных процессов ЭМП в ТПА при решении сопряженной задачи не только делает моделирование более корректным, но и является единственным средством поиска оптимумов при противоречивом действии на поведение ТПА различных связанных параметров. Примером невозможности оптимизации ТПА на основе раздельного рассмотрения гидродинамики и электромагнетизма служит оптимизация по осевому (рабочему) зазору между электромагнитом и якорем ЭМП.

**Цель работы** состоит в создании ТПА нового поколения для перспективных транспортных двигателей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе ставятся и решаются следующие **задачи**:

1. Анализ основных направлений совершенствования ТПА, обосновывающих необходимость разработки типа ТПА с ЭМП с целью создания транспортных дизелей с уменьшенным расходом топлива и выбросом вредных веществ.

2. Создание простой и достоверной математической модели ЭМП управляющих клапанов ТПА.

3. Проверка математической модели ЭМП по экспериментальным данным.

4. Создание математической модели топливоподачи с учетом нестационарности процессов на основе решения сопряженной задачи гидродинамики и электромагнитных процессов.

5. Создание новой ТПА с ЭМП в целях улучшения экономических и экологических показателей работы дизелей.

**Научная новизна** работы заключается:

1. В предложении аппроксимирующих соотношений для описания магнитного насыщения и статического гистерезиса магнитомягких материалов на основе трех из четырех возможных справочных величин.

2. В предложении математической модели ЭМП ТПА, отличающейся корректным учетом нестационарных электромагнитных процессов.

3. В предложении математической модели сопротивления движению якоря со стороны поперечного вязкого движения топлива в зазоре ЭМП.

4. В осуществлении сопряженного решения задачи о гидродинамических и электромагнитных процессах в ЭМП ТПА для двигателей.

5. В обосновании важности учета нестационарных электрических и магнитных явлений для анализа ТПА дизелей с электронным управлением, в т.ч. динамического гистерезиса материалов ЭМП.

6. В получении новых результатов, описывающих поведение ТПА с электронным управлением и наличие оптимальных значений ее параметров.

**Методы исследования.** Для выполнения поставленных задач используется численное моделирование. Расчеты выполняются с использованием созданных автором программ для расчета электромагнитных и гидромеханических процессов в ЭМП в программном комплексе «Впрыск», а также с использованием ПК «Дизель РК». Известные и вновь полученные экспериментальные данные использовались для проверки моделей и расчетных результатов.

**Достоверность и обоснованность** научных положений работы обуславливаются: использованием общих уравнений для описания механических, гидродинамических, электрических и магнитных явлений; совпадением расчетных результатов с опубликованными экспериментальными данными; согласованием полученных частных результатов с известными.

**Практическая ценность работы заключается в следующем:**

1. Подготовлена компьютерная программа для описания работы быстродействующего ЭМП и ТПА с электронным управлением с использованием созданных математических моделей.

2. Выявлены оптимальные значения характеристик управления ЭМП, обоснована целесообразность предварительного намагничивания.

3. Выявлены оптимальные значения конструктивных параметров ЭМП и ТПА с электронным управлением.

4. Созданы два проекта ТПА с ЭМП: ТПА с всесторонней оптимизацией и ТПА с максимальной унификацией со штатными приводом плунжера ТНВД и форсункой.

**Апробация.** Основные результаты диссертации докладывались на научно-технических конференциях и семинарах: XVII международный конгресс двигателестроителей (Украина, пос. Рыбачье, 2012); Международная научно-техническая конференция «6-е Луканинские чтения. Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе» (Москва, 2013); Научный семинар «Чтения академика Васхил В.Н. Болтинского» (Москва, МГАУ имени В.П. Горячкина, 2013); Всероссийский научно-технический семинар «ВНТС по автоматическому управлению и регулированию теплоэнергетических установок» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 работы, из них 3 в изданиях по списку ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы. Общий объем составляет

168с., включая 151с. основного текста, содержащего 137 рисунков и 8 таблиц, а также 8с. списка литературы из 75 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, перечислены методы исследования, приведены положения научной новизны.

**Первая глава** посвящена обзору состояния и особенностей использования ЭКУ для перспективной ТПА дизелей. В штатной ТПА с механическим приводом плунжера и гидроуправляемой форсункой не осуществляется гибкое управление топливоподачей (максимальным давлением впрыскивания, углом опережения впрыскивания, характеристикой впрыскивания) в соответствии с режимами работы дизеля. В ходе развития ТПА осуществлены разные подходы к применению ЭМП электроуправляющих клапанов, в которые включены насос-форсунка с ЭКУ, HEUI (Hydraulically actuated Electronically controlled Unit Injection) с гидроуправляемой форсункой и усилителем давления, Common Rail, APCRS (Amplifier Piston Common Rail System), NGEUI (Next Generation electronically controlled Unit Injection) и UIS HD (Unit Injection System Heavy Duty). В этих аналогичных перспективных вариантах ТПА неизбежно применяются электроуправляемые клапаны, позволяющие осуществить гибкое независимое управление фазовыми и амплитудными параметрами впрыскивания.

Значительный вклад в развитие способов расчета, моделирования топливных систем дизелей был внесен трудами ученых СССР и России. Численное моделирование и оптимизация рабочего процесса ТПА позволяет резко ускорить и удешевить трудоемкий процесс, добиться лучших результатов благодаря анализу значительно большего числа варианта. Качество выполнения проектирования и оптимизации ТПА обуславливается достоверностью математических моделей. Они требуют совершенствования в соотношении математической модели. В области проектирования и оптимизации ТПА по сравнению с мировыми коммерческими программами российский профессиональный программный комплекс ПК «Впрыск», разработанный под руководством Л.В. Грехова построен на базе современных математических моделей. ПК «Впрыск» учитывает многие существенные в специфической сфере ТПА факторы, и позволяет усовершенствовать существующие модели. Совместное моделирование ПК «Впрыск» с ПК расчета рабочего процесса двигателей «Дизель РК», разработанным ученым А.С. Кулешовым позволяет исследовать влияние параметров ТПА на топливную экономичность и выбросы вредных веществ.

**Вторая глава** посвящена описанию базовых математических моделей топливоподачи для решения сопряженных задач гидродинамики и нестационарных электромагнитных процессов. В ТПА для вязкой сжимаемой жидкости нестационарное течение в пренебрежении конвективными членами  $U \cdot \partial U / \partial x$  и  $U \cdot \partial p / \partial x$  описывается традиционно в одномерной постановке:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = -K \cdot U \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность;  $x$  - продольная координата;  $U$  - скорость жидкости;  $K$  - диссипативный множитель. При начальных условиях  $t = 0$ ,  $p(t, x) = p_0$ ,  $U(t, x) = U_0$  на основе решения Д'Аламбера с учетом диссипации при помощи поправки Т.Ф.Кузнецова выражения:

$$\begin{cases} P_x = P_0 + F_{x=0}(t - x/\alpha) \cdot e^{-Kx/\alpha} - W_{x=L}[t - (L - x)/\alpha] \cdot e^{-K(L-x)/\alpha} \\ U_x = U_0 + \frac{F_{x=0}(t - x/\alpha) \cdot e^{-Kx/\alpha} + W_{x=L}[t - (L - x)/\alpha] \cdot e^{-K(L-x)/\alpha}}{\alpha \cdot \rho} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  - скорость звука;  $F_x$  - значение прямой волны;  $W_x$  - значение обратной волны;  $L$  - длина трубопровода. Граничные условия, описывающие процесс у ТНВД с ЭКУ (рис. 1):

$$\frac{dP_{\text{пл}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{пл}}^{\Sigma} \cdot \beta_{\text{пл}}^{\text{эфф}}} (f_{\text{пл}} \cdot c_{\text{пл}} - Q_{\text{пл}}^{\text{утеч}} - Q_{\text{кл}} - Q_{\text{кл}}^{\text{утеч}} - f_{\text{тр}} \cdot U_{\text{тр}}), \quad (3)$$

где  $P_{\text{пл}}$  - давление над плунжером;  $V_{\text{пл}}^{\Sigma}$  - суммарный объем надплунжерной полости;  $\beta_{\text{пл}}^{\text{эфф}}$  - эффективный коэффициент сжимаемости с учетом податливости полости;  $f_{\text{пл}}$ ,  $f_{\text{тр}}$  - площадь сечения плунжера, трубопровода;  $U_{\text{тр}}$  - скорость течения в трубопроводе;  $c_{\text{пл}}$  - скорость движения плунжера ТНВД;  $Q_{\text{пл}}^{\text{утеч}}$ ,  $Q_{\text{кл}}^{\text{утеч}}$  - расход утечек топлива через зазор плунжера ТНВД и разгружающий плунжер клапана ЭМП,  $Q_{\text{кл}}$  - расход топлива через клапанную щель.

Движение клапана описывается следующим образом:

$$\frac{dc_{\text{кл}}}{dt} = \frac{1}{m_{\text{кл}}^{\Sigma}} (F_{\text{эм}} - F_{\text{пружина}} - F_{\text{гидрав}}), \quad (4)$$

где  $m_{\text{кл}}^{\Sigma}$  - суммарная масса клапана;  $F_{\text{эм}}$  - усилие электромагнита;  $F_{\text{пружина}}$  - усилие пружины ЭМП;  $F_{\text{гидрав}}$  - суммарная сила гидравлических сопротивлений движению клапана ЭМП. Имеет место сопротивление движению якоря со стороны топлива в рабочем зазоре ЭМП. При быстром изменении рабочего зазора возникает поперечное (радиальное) движение среды вдоль зазора; при уменьшении рабочего зазора среда течет к периферии, а при увеличении рабочего зазора - к центру (рис. 2). В малом рабочем зазоре ламинарное течение с малыми скоростями:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (5)$$

где  $\eta$  - динамическая вязкость. Распределение давления топлива  $P$  и гидравлическое сопротивление движению якоря ЭМП в малом зазоре описывается:

$$P = \int_r^R \frac{\partial P}{\partial r} dr = \frac{3\eta}{\delta^3} c_{\text{кл}} (R^2 - r^2), \quad (6)$$

$$F_{\text{гидрав-1}} = \int_0^R P \cdot 2\pi r \cdot dr = \frac{3\eta\pi}{2\delta^3} c_{\text{кл}} R^4. \quad (7)$$

Гидравлическое сопротивление движению клапана ЭМП со стороны зазора прецизионной пары, полученное в диссертации В.В. Фонова описывается выражением:

$$F_{\text{гидрав-2}} = \pi d_{\text{кл}} \left[ \frac{(-1) \cdot \delta_{\text{пл-кл}}}{2} \cdot (P_{\text{пл}} - P_{\text{кл}}) + \frac{c_{\text{кл}} L_{\text{кл}} \bar{\eta}}{\delta_{\text{пл-кл}}} \right], \quad (8)$$

где  $\bar{\eta}$  - средняя эффективная вязкость по длине прецизионной пары. Суммарное гидравлическое сопротивление движению клапана ЭМП:

$$F_{\text{гидрав}} = F_{\text{гидрав-1}} + F_{\text{гидрав-2}}. \quad (9)$$

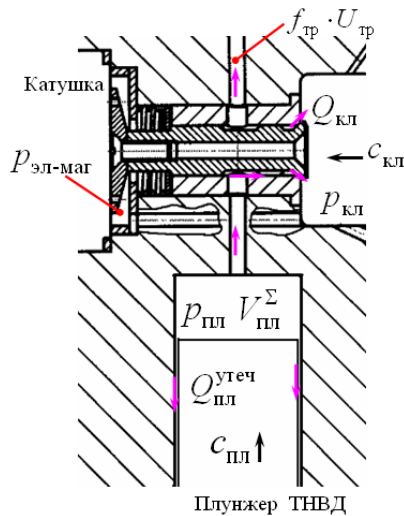


Рис. 1. Расчетная схема ТНВД с ЭКУ

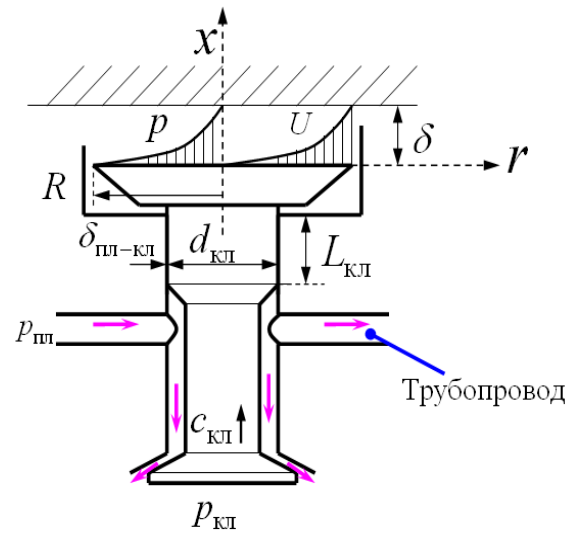


Рис. 2. Схема распределения скорости и давления в зазоре клапана ЭМП

Для расчета нестационарных электромагнитных процессов ЭМП в ТПА предлагается использование прямого интегрирования по времени исходных дифференциальных уравнений в сопряжении с гидродинамическим расчетом. Уравнение для тока в цепи в нестационарном процессе управления ЭМП:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left[ E - \frac{1}{C} \int_0^t i dt - i R_{\text{актив}} - i \frac{dL}{dt} \right], \quad (10)$$

$$L = \frac{w^2}{R_{\text{зазор}} + R_{\text{серд}}} = \frac{w^2}{\frac{2\delta}{S_{\text{зазор}} \cdot \mu_{\text{т}}} + \frac{l_{\text{серд}} \cdot H_{\text{серд}}}{S_{\text{серд}} \cdot B_{\text{серд}}}}, \quad (11)$$

где  $i$  - ток;  $w$  - количество витков катушки;  $\delta$  - рабочий зазор;  $\mu_{\text{т}}$  - магнитная проницаемость топлива;  $B_{\text{серд}}$  - индукция в сердечнике;  $H_{\text{серд}}$  - напряженность в сердечнике;  $l_{\text{серд}}$  - длина по средней линии магнитопровода;  $E$  - Э.Д.С источника;  $R_{\text{актив}}$  - активное сопротивление;  $L$  - индуктивность;  $C$  - емкость импульсного конденсатора;  $S_{\text{зазор}}$ ,  $S_{\text{серд}}$  - площадь сечения рабочего зазора, магнитопровода;  $R_{\text{зазор}}$ ,

$R_{\text{серд}}$  - магнитное сопротивление зазора, сердечника. Описание намагничивания в ЭМП:

$$B = i \cdot w / \left( \frac{2\delta}{\mu_T} + \frac{l_{\text{серд}} \cdot H_{\text{серд}}}{B_{\text{серд}}} \right), \quad (12)$$

$$B_{\text{серд}} = f(H_{\text{серд}}), \quad (13)$$

$$B_{\text{серд}} = B \cdot \sigma, \quad F_{\text{эм}} = B^2 \cdot S_{\text{зазор}} / \mu_T, \quad (14)$$

где  $\sigma$  - коэффициент рассеяния. Следует отметить, что формула (13) является ключевой для решения вышеприведенных дифференциальных уравнений. Это соотношение посредством аппроксимирующего отношения искалось в форме наиболее простого, явного, адекватного аппроксимирующего выражения, которое бы базировалось на немногочисленных справочных данных (индукции насыщения  $B_m$ , коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  или максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{max}}$ ). В противном случае описать развернутые кривые намагничивания (статического гистерезиса) для широкого круга материалов не представляется возможным для рядовых пользователей (проектировщиков) ТПА. Из большого числа исследованных аппроксимирующих формул предлагается следующая формула (рис. 3):

$$B = \frac{1}{a} \cdot \lg^C [H/H_c + 1], \quad \text{для участка О - А.} \quad (15)$$

$$B = \begin{cases} \frac{1}{a} \cdot \lg^C [H/H_c + 2] & \text{для участка А - С} \\ \frac{-1}{a} \cdot \lg^C [-H/H_c] & \text{для участка С - D} \\ \frac{-1}{a} \cdot \lg^C [-H/H_c + 2] & \text{для участка D - E} \\ \frac{1}{a} \cdot \lg^C [H/H_c] & \text{для участка E - А} \end{cases} \quad (16)$$

Если имеются справочные данные  $B_m(H_m)$ ,  $H_c$ ,  $B_r$ , то  $C$  и  $a$ :

$$C = \lg (B_m/B_r) / \lg \left[ \frac{\lg(H_m/H_c + 2)}{\lg 2} \right], \quad a = \lg^C (H_m/H_c) / B_m. \quad (17)$$

Если имеются справочные данные  $B_m(H_m)$ ,  $H_c$ ,  $\mu_{\text{max}}$ , то  $C$  и  $a$ :

$$C = \frac{\lg\left(\frac{B_m}{\mu_{\text{max}} \cdot \Delta H}\right)}{\lg\left(\frac{\lg(H_m/H_c)}{\lg\left(\frac{\Delta H}{H_c} + 1\right)}\right)}, \quad a = \frac{(\lg(H_m/H_c))^C}{B_m}. \quad (18)$$

где  $\Delta H$  - искусственная малая величина ( $\Delta H \approx 0,25H_c$ ). На рис. 4 иллюстрируется, что предлагаемая формула позволяет получить хорошее совпадение расчета с экспериментом для описания кривой намагничивания.



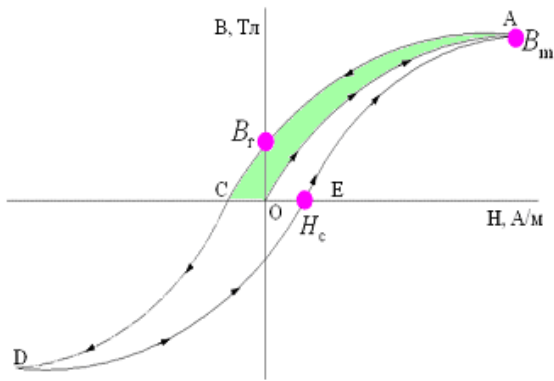


Рис. 3. Схема статического гистерезиса; затонирована основная область работы оптимизированного ЭМП в составе ТПА дизелей

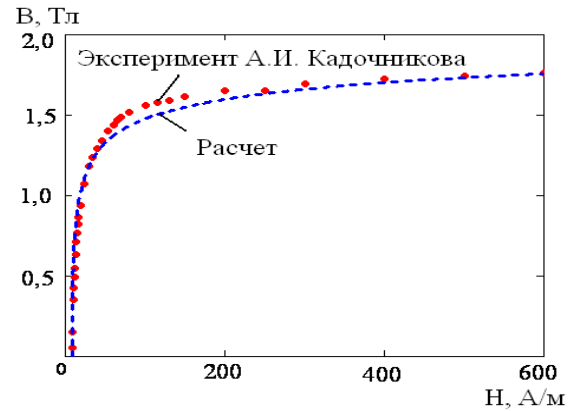


Рис. 4. Индукция в зависимости от напряженности для электротехнической стали 3414

В работе ЭМП ТПА идет нестационарный процесс, поэтому надо учитывать специфические нестационарные электромагнитные явления, т.е. так называемый динамический магнитный гистерезис. Динамический гистерезис учитывает не только статический гистерезис, а также потери с поворотом магнитных доменов и вихревыми токами. В нашей работе используется простое и адекватное полуэмпирическое описание важнейших нестационарных эффектов при перемагничивании, разработанное в Институте физики металлов УрО РАН А.И. Кадочниковым:

$$H_e(t) = H_{cm}(B) + \frac{1}{r} \exp\left(\varpi \frac{B^2}{B_m^2}\right) \cdot \frac{dB}{dt} + \frac{1}{3} \gamma_{eq} \Pi^2 \cdot \frac{dB}{dt}, \quad (19)$$

где  $\Pi$  - половина толщины ленты шихтованных пластин;  $H_{cm}(B)$  - статическая петля перемагничивания;  $r$  - коэффициент магнитной вязкости;  $\gamma_{eq}$  - эквивалентная удельная электропроводность материала;  $\varpi$  - параметр, зависящий от состава и технологии изготовления. С помощью формул (16) и (19) при синусоидальном изменении индукции для электротехнической стали 3421 получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом (рис. 5). Тестовая задача оправдала нашу математическую модель с учетом динамического гистерезиса.

**В третьей главе** проведены исследования влияния конструктивных параметров электромагнита, магнитных свойств сердечника, закона управления напряжением питания ЭМП. На рис. 6 и 7 показано, что в быстропротекающем ЭМП ТПА необходимо учесть специфичный динамический нестационарный электромагнитный процесс. Свойства магнитного материала  $B_m$ ,  $H_c$ ,  $B_r$  являются важными параметрами ЭМП. Магнитные свойства сердечника обуславливают характеристики работы ЭМП. На рис. 8 показано, что чем больше индукция насыщения, тем меньше время открытия клапана. Причина этого заключается в том, что повышение индукции насыщения приводит к росту максимального электромагнитного усилия, это ускоряет открытие клапана.

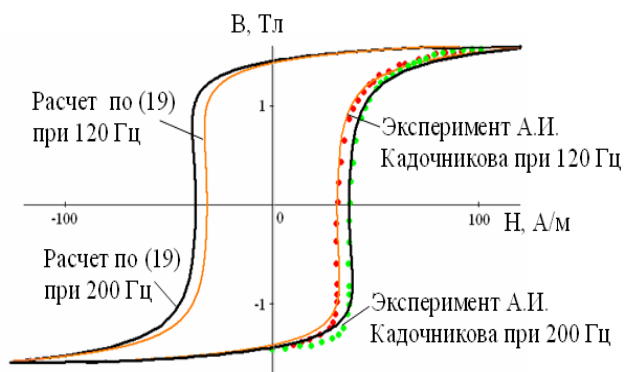


Рис. 5. Сравнение расчета для стали 342 с экспериментом

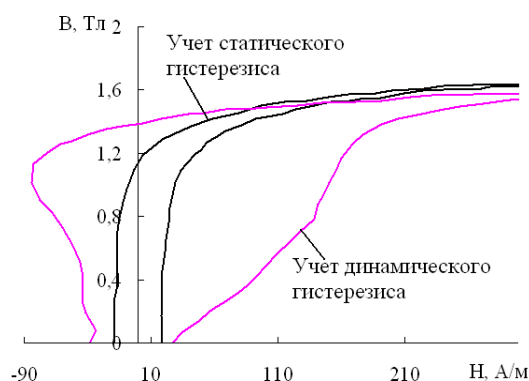


Рис. 6. Магнитная индукция в зависимости от напряженности

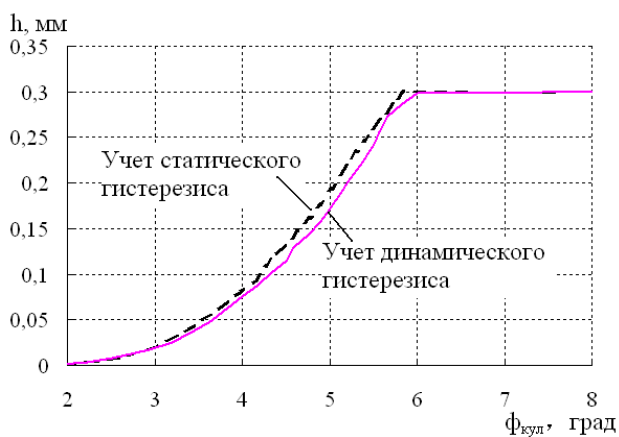


Рис. 7. Ход якоря ЭМП в зависимости от угла поворота кулачка

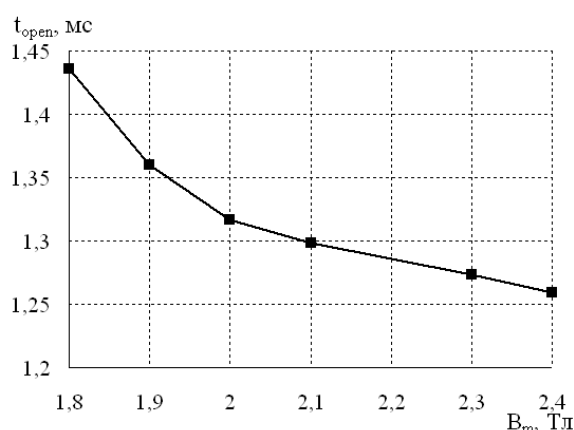


Рис. 8. Время открытия клапана ЭМП в зависимости от индукции насыщения

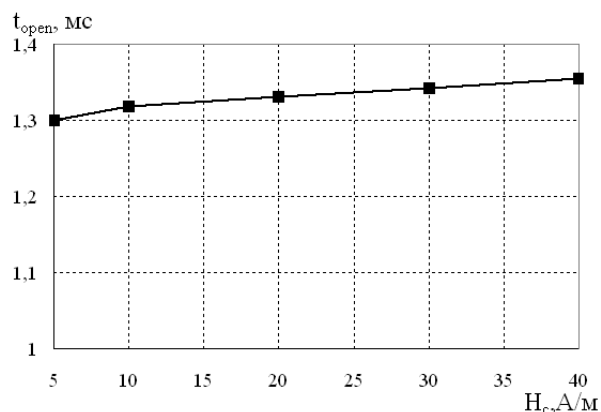


Рис. 9. Время открытия клапана ЭМП в зависимости от коэрцитивной силы для стали 3414

На рис. 9 показано, что повышение  $H_c$  увеличивает время открытия клапана, замедляется его открытие. Это объясняется тем, что увеличение  $H_c$  уменьшает крутизну кривой намагничивания, что приводит к уменьшению усилия электромагнита еще в начале процесса (до достижения насыщения). На рис. 10 иллюстрируется, что увеличение  $B_r$ , с одной стороны, повышает быстроту открытия клапана, а с другой стороны, увеличивает остаточное усилие электромагнита, которое задерживает посадку клапана. В связи с этим, надо учитывать уровень остаточной индукции у материала магнитопровода. На рис. 11 показано, что чем больше площадь сечения магнитопровода ( $S_{серд}$ ), тем больше усилие электромагнита, тем быстрее открытие клапана, но это значение ограничивается размером ЭМП. Для повышения быстроты открытия клапана чрез-

мерное значение  $S_{серд}$  оказывается неэффективной, но растут размеры электромагнита.

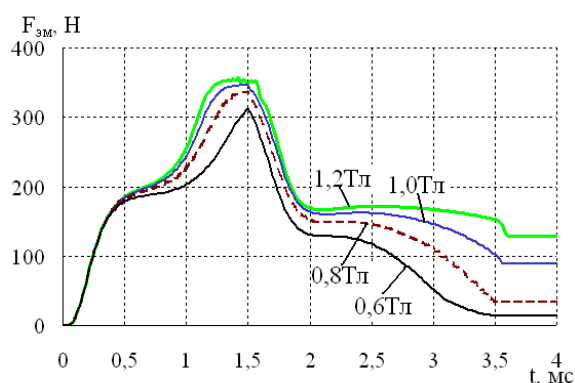


Рис. 10. Усилие электромагнита в зависимости от остаточной индукции

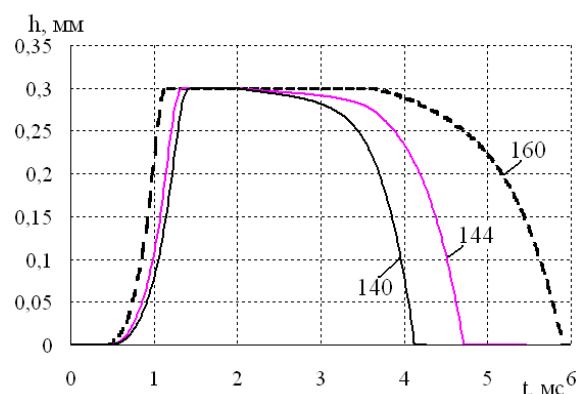


Рис. 11. Ход якоря ЭМП в функции от площади сечения магнитопровода ( $мм^2$ )

Количество витков катушки ( $w$ ) одновременно влияет и на намагничивающую силу, и на скорость нарастания тока. На рис. 12 показано, что при фиксации активного сопротивления с увеличением  $w$  время открытия клапана сначала уменьшается, а потом увеличивается. Это объясняется тем, что, с одной стороны, увеличение  $w$  повышает индуктивность, это приводит к уменьшению скорости нарастания тока. С другой стороны, его увеличение повышает намагничивающую силу, это приводит к увеличению усилия электромагнита. В связи с этим, для ЭМП существует оптимальное количество витков катушки для осуществления наименьшего времени открытия клапана. Этот результат принципиально отличен от принципов проектирования электромагнитов, к которым не предъявляют жестких требований по быстродействию. Закон управления напряжением питания ЭМП существенно влияет на характеристику работы клапана, поэтому его исследование является очень важным (рис. 13).

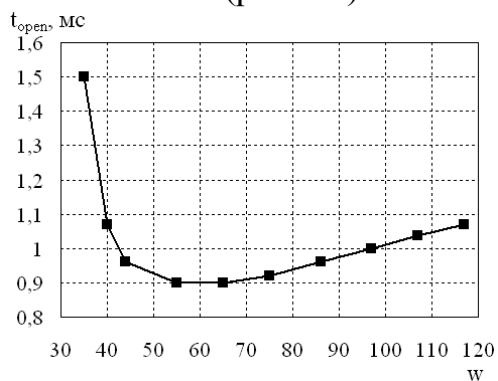


Рис. 12. Время открытия клапана в зависимости от  $w$

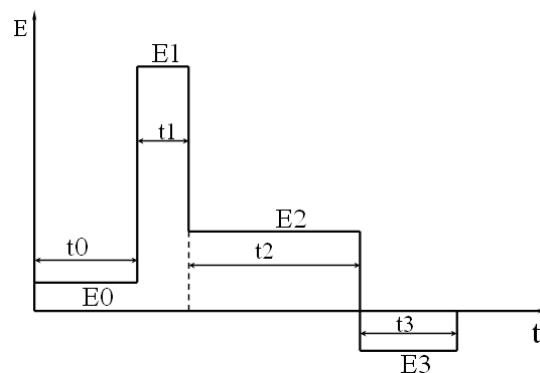


Рис. 13. Закон управления напряжением питания ЭМП

Введение предварительного напряжения ( $E_0$ ) предназначено для повышения быстроты открытия клапана. На рис. 14 показано, что с увеличением  $E_0$  быстрота открытия клапана улучшается. Роль  $E_0$  заключается в том, что оно обеспечивает малое первоначальное значение тока, чтобы при подаче напряжения форсирования ( $E_1$ ) клапан быстрее поднялся. Поведение  $E_1$  должна повысить быстродействие от-

крытия клапана. Предварительное подмагничивание с помощью  $E_0$  не используется и не обсуждается. Оно предлагается нами в качестве дополнительной меры для увеличения быстродействия ЭМП.

На рис. 15 показано, что с увеличением  $E_1$  время открытия клапана уменьшается. Но при избыточном  $E_1$  его рост уже мало приводит к ускорению открытия клапана. Это объясняется тем, что при чрезмерном  $E_1$  сердечник электромагнита быстро достигает магнитного насыщения, в этом случае усилие электромагнита очень мало растет по времени. С одной стороны, малое  $E_1$  не обеспечивает быстроту открытия клапана, а с другой стороны, большое  $E_1$  мало положительно влияет на время открытия клапана, поэтому существует целесообразное значение  $E_1$ .

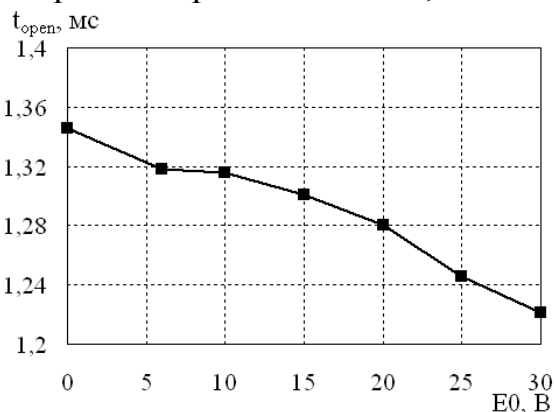


Рис. 14. Время открытия клапана в зависимости от  $E_0$

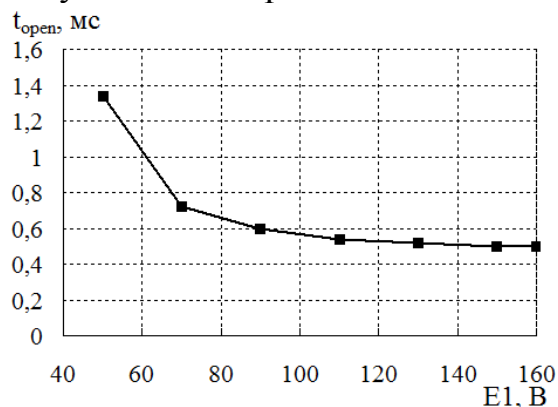


Рис. 15. Время открытия клапана в зависимости от напряжения форсирования  $E_1$

В ТПА с ЭМП требуемая необходимая подача топлива определяется продолжительностью удержания клапана в положении максимального хода. На рис. 16 показано, что с ростом напряжения удержания ( $E_2$ ) продолжительность удержания клапана на максимальном подъеме сначала увеличивается, а после  $E_2 = 24$  В не изменяется в зависимости от  $E_2$ . Причина этого заключается в том, что при нахождении якоря на максимальном подъеме существует минимальный ток удержания (минимальное  $E_2$ ). Это минимальное напряжение вызывает достаточное усилие электромагнита для того, чтобы поддерживать якорь на максимальном подъеме. Малое  $E_2$  не обеспечивает нормальную работу клапана, а большое  $E_2$  оказывается неоправданным, поэтому мы стремились найти и использовать это минимальное  $E_2$  для обеспечения нормальной работы электромагнита.

Роль напряжения размагничивания ( $E_3$ ) заключается в ускорении посадки клапана путем обнуления намагничивающей силы. На рис. 17 видно, что с увеличением  $E_3$  время закрытия клапана сначала уменьшается, а потом увеличивается. Это объясняется тем, что в начале роста  $E_3$  оно быстрее размагничивает сердечник электромагнита, что приводит к повышению быстроты закрытия клапана. При большом  $E_3$  после снижения усилия электромагнита до нуля в электромагните образуется новое усилие электромагнита (обратного знака индукции, но того же знака силы ЭМП), противодействующее отходу якоря в исходное положение. Так, при излишне большом  $E_3$  возникает вторичный подъем якоря (например,  $E_3 = 30$  В).

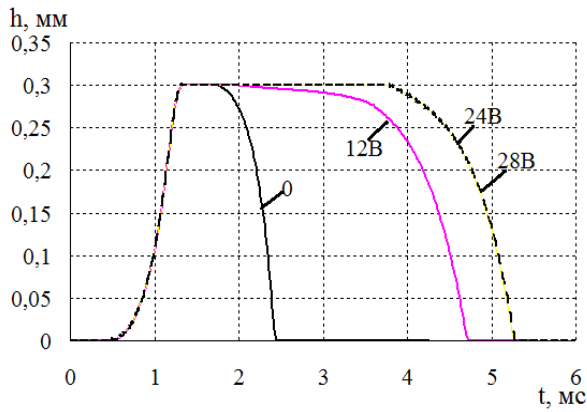


Рис. 16. Ход якоря ЭМП в зависимости от напряжения удержания E2

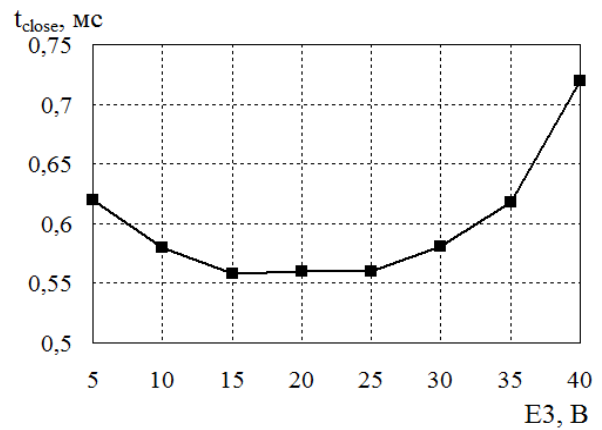


Рис. 17. Время закрытия клапана в зависимости от E2

В четвертой главе исследованы параметры конструкции ТПА, закона управления напряжением питания ЭМП при помощи созданных математических моделей для тепловозного дизеля Д50 в целях улучшения его экологических и экономических показателей. На рис. 18 показано, что уменьшение мертвого объема надплунжерной полости ТНВД приводит к повышению  $P_{впр}^{max}$ . Из этого следует желательность сокращения этого объема до допустимого по условиям технологии. В ТНВД с ЭМП максимальное усилие электромагнита ( $F_{эм}^{max}$ ) существенно влияет на время открытия клапана. На рис. 19 показано, что при увеличении  $F_{эм}^{max}$  от 133 до 300 Н  $P_{впр}^{max}$  повышается за счет ускорения срабатывания ЭМП, а после  $F_{эм}^{max} = 300$  Н положительный эффект повышения быстроты открытия клапана малозаметен. Клапан возвращается к исходному положению за счет пружины. Поэтому с целью повышения быстродействия посадки клапана, выбираем большое усилие пружины, это требует большее усилие электромагнита. В результате исследований выбрано  $F_{эм}^{max} = 350$  Н.

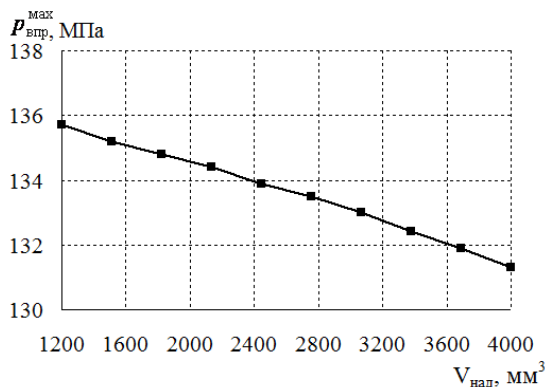


Рис. 18.  $P_{впр}^{max}$  в зависимости от мертвого объема надплунжерной полости

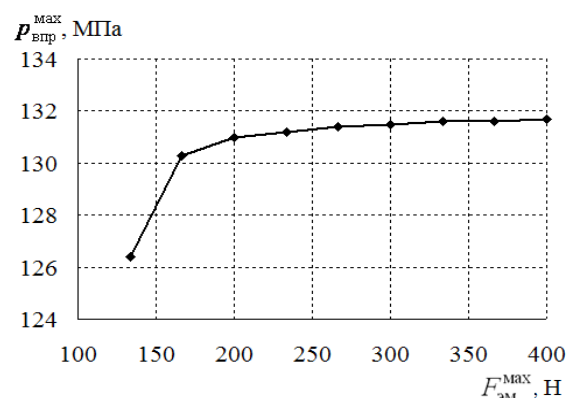


Рис. 19.  $P_{впр}^{max}$  в зависимости от максимального усилия электромагнита

При малом максимальном ходе клапана велики гидравлические потери в клапане, в ТНВД с клапаным управлением это увеличивает продолжительность

впрыскивания и уменьшает давление впрыскивания. При излишнем большом ходе клапана быстрдействие клапана ухудшается. Для подбора значения максимального хода клапана организован расчет наполнения с учетом кинематики и заднего профиля кулачка, условий образования газовой фазы в плунжерной полости (т.е. многократный счет цикла ТНВД при  $\varphi_{\text{ТНВД}} = 0 \dots 360^\circ$ ). Критерием совершения принимается нулевое газосодержание топлива к моменту начала нагнетания. Лучшим же условием наполнения, как принято в гидравлических насосах, является условие невозникновения газовой фазы по всему времени наполнения. В данном случае обосновано рациональное значение максимального хода клапана - 0,3 мм (рис. 20).

На рис. 21 показано, что при  $w = 45$  наблюдается наибольшее  $P_{\text{впр}}^{\text{max}}$ . Изменение  $w$  приводит к изменению времени открытия клапана, как иллюстрировалось на рис. 12. Скорость открытия клапана, обусловленная индуктивностью ЭМП, также влияет и на показатели топливоподачи: чем быстрее открытие клапана, тем меньше продолжительность топливоподачи и больше давление впрыскивания. При уменьшении диаметра трубопровода гидравлические потери растут, а при увеличении диаметра трубопровода усиливается негативное влияние сжимаемости топлива. На рис. 22 показано, что на номинале наблюдается максимум  $P_{\text{впр}}^{\text{max}}$  при диаметре трубопровода, равном 2,2 мм. Для частичных режимов, холостого хода, желателен трубопровод с еще меньшим диаметром. Из соображения обеспечения качества распыливания топлива и достаточного  $P_{\text{впр}}^{\text{max}}$  принимаем рациональное значение диаметра трубопровода 2,5 мм.

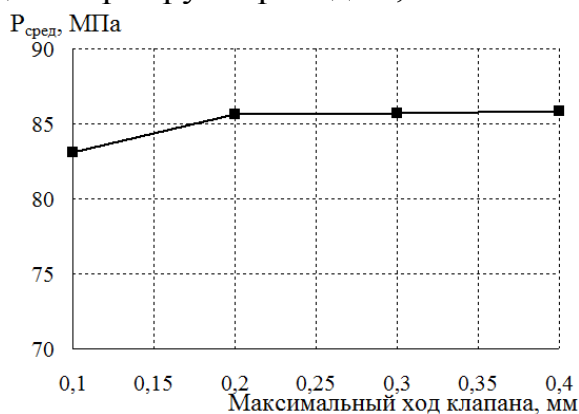


Рис. 20. Среднее давление впрыскивания в зависимости от максимального хода клапана ЭМП

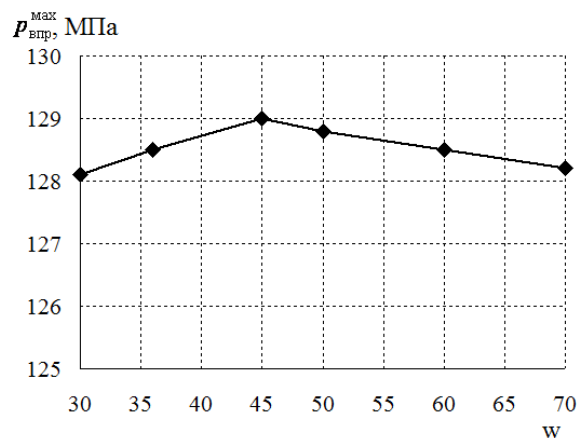


Рис. 21.  $P_{\text{впр}}^{\text{max}}$  в зависимости от количества витков катушки

На рис. 23 показано, что с ростом  $E_0$  максимальное давление впрыскивания увеличивается. Предложенный нами способ улучшения работы ЭМП с помощью  $E_0$  обеспечивает повышение быстроты открытия клапана. Без перегрузки электрической цепи и недопущения преждевременного открытия клапана подобрано целесообразное значение  $E_0 = 20$  В. На рис. 24 показано, что чем выше  $E_1$ , тем выше усилие электромагнита, тем быстрее открытие клапана. Из-за наличия индукции насыщения чрезмерное значение  $E_1$  оказывается неэффективным, поэтому здесь



выбрано оптимальное значение  $E1 = 60$  В. На рис. 25 показано, что при увеличении  $E2$  от 0 до 14 В  $P_{\text{впр}}^{\text{max}}$  сначала повышается, а после  $E2 = 5$  В его повышение уже не приводит к изменению поведения клапана. Причина этого заключается в наличии минимального тока удержания, достаточного для поддержания клапана на максимальном подъеме. При меньшем токе давление впрыскивания падает, при большем токе топливоподача не улучшается, но перегружается электрическая цепь.

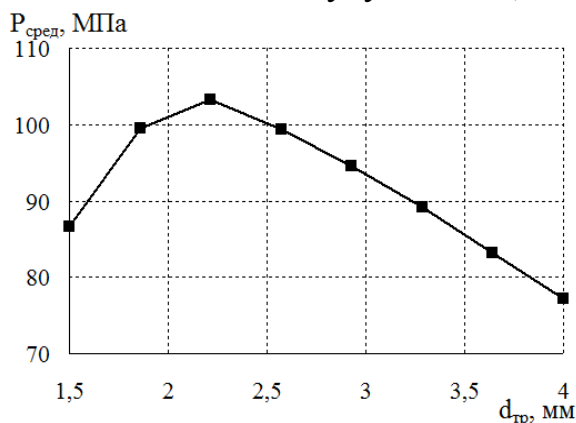


Рис. 22. Среднее давление впрыскивания в зависимости от диаметра трубопровода

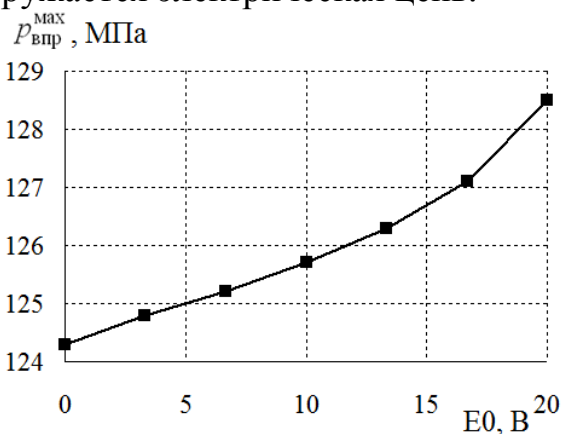


Рис. 23.  $P_{\text{впр}}^{\text{max}}$  в зависимости от предварительного напряжения  $E0$

Из рис. 26 видно, что при повышении  $E3$  среднее давление впрыскивания немного увеличивается, а после  $E3 = 20$  В давление впрыскивания быстро падает. Причина этого заключается в том, что при  $E3 > 18$  В происходит вторичный подъем клапана после удачной посадки, что иллюстрируется на рис. 27. Это явление неуправляемое, надо предотвращать его возникновение.

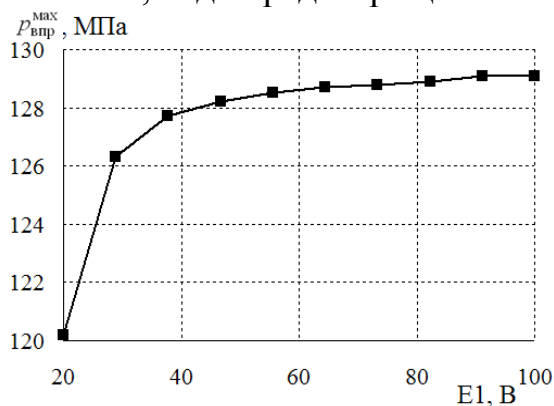


Рис. 24.  $P_{\text{впр}}^{\text{max}}$  в зависимости от  $E1$

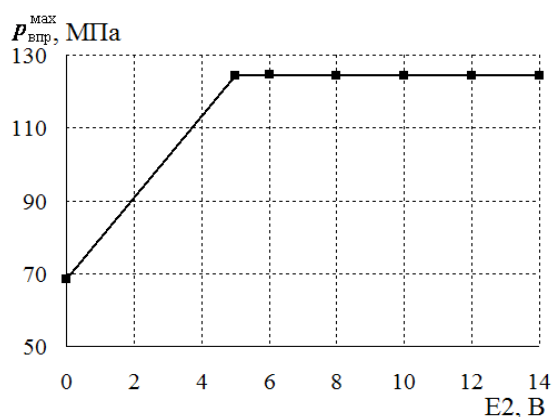


Рис. 25.  $P_{\text{впр}}^{\text{max}}$  в зависимости от  $E2$

С использованием расчетной оптимизации велась работа по подготовке двух проектов ТПА с ЭМП. Один под условным названием «ТПА с всесторонней оптимизацией» был создан в соответствии с требованиями организации рабочего процесса по критерию выполнения строгого экологического норматива EU Stage IIIВ. Этот проект реализован в виде ТНВД на ОАО «Волгодизельаппарат» и в настоящее время подготовлен к испытаниям.

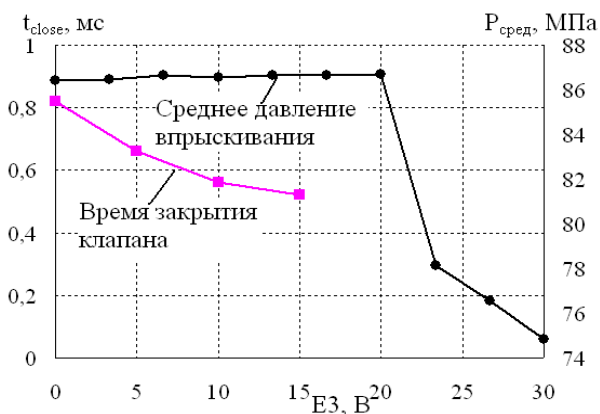


Рис. 26. Среднее давление впрыскивания и время закрытия клапана в зависимости от  $E3$

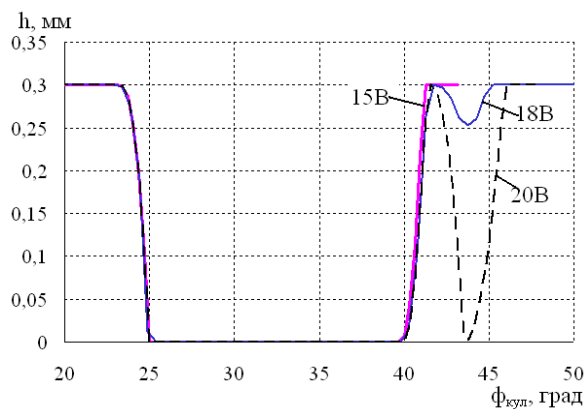


Рис. 27. Ход якоря в зависимости от угла поворота кулачка при разных  $E3$

Второй проект под условным названием «ТПА с максимальной унификацией после оптимизации» рассматривался с учетом сохранения штатных картера привода насосных секций ТНВД, штатной форсунки и имел цель снижения расхода топлива, выполнения экологического норматива ГОСТ 51249-99 и нацеливался на скорейшую реализацию. Приоритет этой реализации принадлежит ООО ППП «Дизельавтоматика». Эти проекты готовились по заказу или в сотрудничестве с ОАО «Пензадизельмаш» и ООО ППП «Дизельавтоматика». Участие автора заключалось в выполнении расчетно-аналитических работ, положенных в основу проектов новой ТПА.

В результате работы выявлено, что ТПА с максимальной унификацией после оптимизации обеспечивает требуемое  $P_{впр}^{max}$  на всех режимах работы с позиции организации рабочего процесса (рис. 28). ТПА с всесторонней оптимизацией позволяет приблизиться к требованию рабочего процесса максимальному давлению впрыскивания в целях выполнения норматива EU Stage IIIB (рис. 29). Требуемое максимальное давление впрыскивания обосновано в работах МГТУ им Н.Э. Баумана по оптимизации дизеля Д50 по критерию улучшения экономических экологических показателей работы по заказу ОАО «Пензадизельмаш».

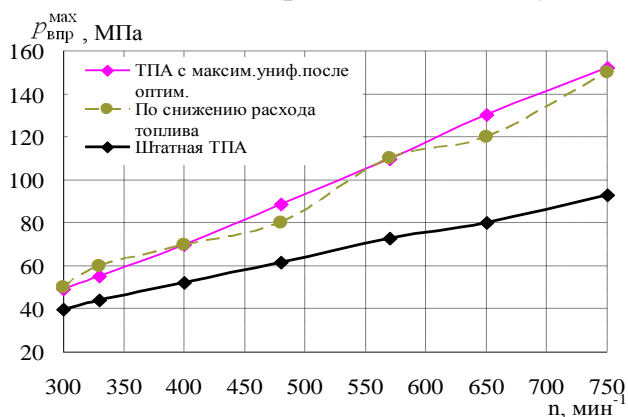


Рис. 28.  $P_{впр}^{max}$  в зависимости от частоты вращения коленчатого вала

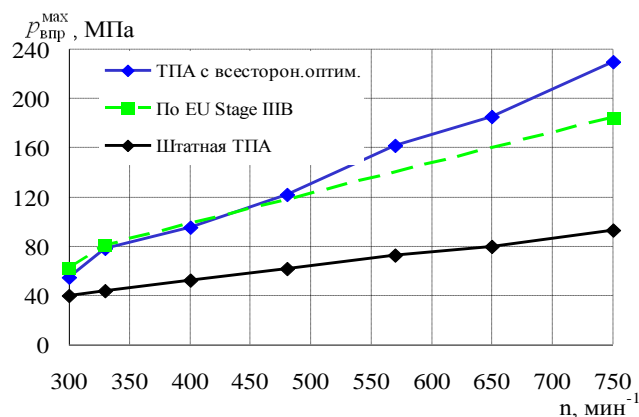


Рис. 29.  $P_{впр}^{max}$  в зависимости от частоты вращения коленчатого вала



Вследствие трудности быстрой реализации ТПА с всесторонней оптимизацией ООО ППП “Дизельавтоматика” была изготовлена ТПА с максимальной унификацией. Силами ОАО “Пензадизельмаш” и ООО ППП “Дизельавтоматика” проведены испытания. На рис. 30 иллюстрируется, что по сравнению со штатной ТПА

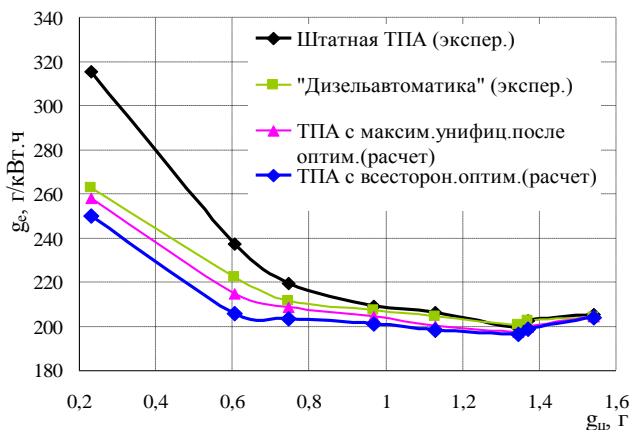


Рис. 30. Расход топлива по тепловозной характеристике Д50

максимальная унифицированная ТПА “ППП Дизельавтоматика” обеспечивает снижение расхода топлива на всех режимах работы. Планируется, что подготовленный по нашему проекту ТНВД «ТПА с всесторонней оптимизацией» позволит получить дополнительные результаты, как по топливной экономичности, так и по снижению вредных веществ. Как прогноз, на рис. 31 и 32 показаны расчетные результаты, полученные с помощью ПК «Дизель РК». Так, выбросы оксидов азота по тепловозной характеристике заметно снижаются без роста выбросов твердых частиц.

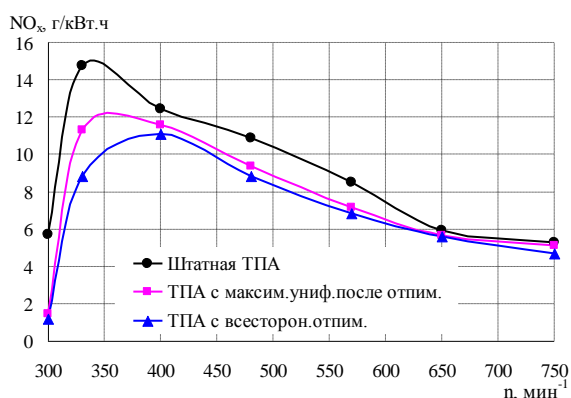


Рис. 31. Выбросы  $\text{NO}_x$  по тепловозной характеристике

максимальная унифицированная ТПА “ППП Дизельавтоматика” обеспечивает снижение расхода топлива на всех режимах работы. Планируется, что подготовленный по нашему проекту ТНВД «ТПА с всесторонней оптимизацией» позволит получить дополнительные результаты, как по топливной экономичности, так и по снижению вредных веществ. Как прогноз, на рис. 31 и 32 показаны расчетные результаты, полученные с помощью ПК «Дизель РК». Так, выбросы оксидов азота по тепловозной

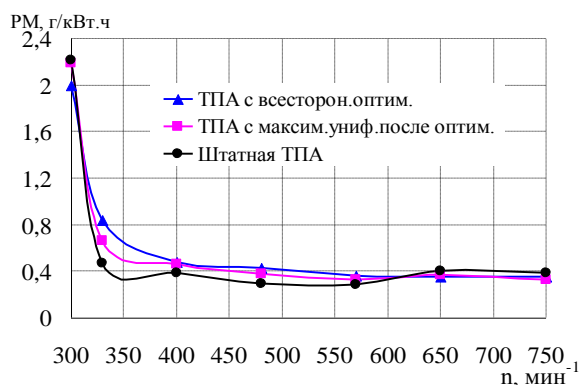


Рис. 32. Выбросы твердых частиц по тепловозной характеристике

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для описания магнитного насыщения магнитомягких материалов и статического гистерезиса удастся использовать простые аппроксимации на основе логарифмической функции и трех из четырех возможных справочных величин.

2. Модель вязкого течения топлива в рабочем зазоре ЭМП позволяет рассчитывать сопротивление его движению, а в сопряжении с расчетом электромагнитного процесса - оптимизировать параметры и режимы ЭМП.

3. Для описания ЭМП ТПА использованы результаты исследований Института физики металлов УрО РАН. Доказано, что для условий ТПА процесс перемагничивания сильно зависит от вихревых токов, магнитной вязкости, частоты.

4. Предложена и проверена математическая модель ЭМП ТПА, отличающаяся корректным учетом нестационарных электромагнитных процессов. Достаточная

простота и малые затраты времени счета позволили встроить ее в гидродинамический расчет топливоподачи и обеспечили решение сопряженных задач.

5. При помощи усовершенствованной математической модели с учетом динамического гистерезиса проведена оптимизация параметров ЭМП ТПА для дизеля Д50. В целях обеспечения наибольшего быстродействия клапана выявлены оптимальные конструктивные параметры ЭМП: количество витков катушки, размеры магнитопровода, минимальный рабочий зазор, максимальный ход якоря и др., а также определено минимально необходимое усилие электромагнита.

6. Выявлено, что для ускорения срабатывания клапана существует резерв в использовании предварительного напряжения намагничивания и определена величина его рационального значения, а также определены оптимальные параметры форсирования, минимального напряжения удержания, размагничивания.

7. Выявлено, что в целях повышения быстродействия клапана следует искать магнитомягкие материалы с наибольшей  $B_m$ , наименьшей  $H_c$ , и целесообразным значением  $B_r$ .

8. Для исследуемой ТПА дизеля Д50 определены оптимальные значения конструктивных, режимных и регулировочных параметров для обеспечения различной степени интенсификации впрыскивания (по критерию снижения расхода топлива или выполнения перспективных нормативных выбросов вредных веществ). Соответственно, максимальное давление впрыскивания для номинального режима близко к 150 и 196,6 МПа.

9. Проекты двух вариантов ТПА продемонстрировали свою эффективность: снижение расхода топлива до 18% (достигнутый уровень) а также без роста выбросов РМ уменьшение выбросов  $NO_x$  от 3,5% до 79,5% (ожидаемые расчетные результаты).

#### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Грехов Л.В., Чжао Цзяньхуэй. Математическая модель электромагнитного процесса в быстродействующем приводе клапанов топливных систем двигателей внутреннего сгорания с электронным управлением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2011. Специальный выпуск. С. 89-96.
2. Грехов Л.В., Чжао Цзяньхуэй. Методика расчета процессов в приводе управляющих клапанов топливной аппаратуры двигателей внутреннего сгорания с электронным управлением // Известия вузов. Машиностроение. 2012. №6. С. 46-51.
3. Расчетные исследования электронной системы управления топливоподачей дизеля / Акимов В.С., Чжао Ц., Фурман В.В. [и др.] // Грузовик. 2012. №11. С. 21-27.
4. Иващенко Н.А., Грехов Л.В., Чжао Цзяньхуэй. Методика расчета быстродействующего привода управляющего клапана топливоподающей аппаратуры // Двигатели внутреннего сгорания (Украина). 2012. №1. С. 65-69.
5. Грехов Л.В., Чжао Цзяньхуэй. Оптимизация параметров быстродействующего электромагнитного привода топливоподающей аппаратуры с учетом динамического магнитного гистерезиса // Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе: Материалы доклада международной научно-технической конференции 6-е Луканинские чтения. М., 2013. С. 72-73.