

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРИВОДОВ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Л.В. Грехов<sup>1</sup>

Д.О. Онищенко<sup>1</sup>

В.В. Фурман<sup>2</sup>

И.А. Черезов<sup>2</sup>

grekhov@bmstu.ru

doctor@baumanracing.ru

dizavt@overta.ru

rw4cvz@mail.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «ППП «Дизельавтоматика», г. Саратов, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведен метод расчета быстродействующих электромагнитных приводов, встраиваемых в комплексную модель и программу расчета сопряженных гидромеханических, теплофизических, электромагнитных процессов, применяемых для проектирования и оптимизации высоконапорной топливоподающей аппаратуры современных бензиновых, дизельных и газовых двигателей. Рассмотрены особенности функционирования быстродействующих электромагнитных приводов, проанализированы используемые подходы к описанию протекающих в них процессов. Приведены математические модели нестационарных электрических процессов с питанием от бустерного источника, намагничивания магнитомягких материалов с учетом статического и динамического гистерезисов, а также модель привода для сопряженной задачи процессов в топливных высоконапорных системах. Результаты, полученные с помощью модели электромагнитного привода в составе комплексной математической модели топливной системы, сопоставлены с данными эксперимента и 3D-моделирования в среде ANSOFT Maxwell, что подтвердило ее достоверность. Описано проектирование привода управляющего клапана топливного насоса высокого давления среднеоборотного двигателя. Рассмотрены особенности расчета и проектирования быстродействующих приводов: влияние повышенной температуры, динамического гистерезиса, полного размагничивания на завершающей стадии процесса.

### Ключевые слова

*Дизельный двигатель, топливоподающая аппаратура, впрыскивание топлива, математическое моделирование, электромагнитный привод, быстродействие*

Приведен вывод об эффективности предлагаемых моделей для задач анализа и создания быстродействующих приводов со временем срабатывания 0,1 мс для топливных систем двигателей с электронным управлением

Поступила 21.10.2022

Принята 03.02.2023

© Автор(ы), 2023

*Исследование поддержано грантом РФФ № 21-49-00012 и выполнено с использованием оборудования УНЦ «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана*

**Введение.** Для расчета и проектирования быстродействующего электромагнитного привода (ЭМП) современных топливных систем двигателей невозможно применять известные методы, разработанные для статических электромагнитов, а полученные с их помощью выводы и рекомендации могут носить парадоксальный характер. При рассмотрении процессов в ЭМП приходится учитывать соизмеримость механической, электрической, электромагнитной инерционности и обязательность решения сопряженной нестационарной задачи [1].

Для описания статического магнитного гистерезиса (рис. 1) при отсутствии кривой намагничивания пользуются различными известными аппроксимациями, например, кусочно-линейной аппроксимацией различных участков петли, гиперболической функцией многочлена, экспонентами, гиперболическим синусом и сплайном. Часто предлагаются приближения, основанные на функции арктангенса [2]

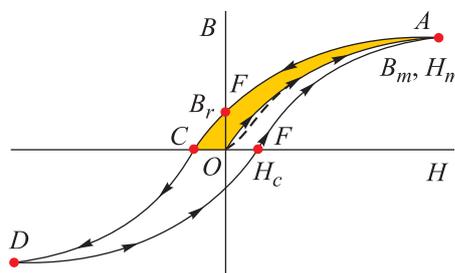
$$B = p_1 \operatorname{arctg}(p_2 H) + p_3 H$$

или функции гиперболического тангенса [3]

$$B = B_m \operatorname{th} \left[ (H \pm H_c) / (kH_c) \right].$$

**Рис. 1.** Петли статического гистерезиса:

$B$  — индукция;  $B_r$  — остаточная индукция;  $B_m$  — индукция насыщения;  
 $H$  — напряженность магнитного поля;  
 $H_c$  — коэрцитивная сила;  
 желтая зона — рабочая зона быстродействующего ЭМП



Для расчета статической петли гистерезиса стали популярны методы, основанные на модели Джайлса — Атертона [4]. Однако они требуют подбора параметров, более сложные, результаты также могут не совпадать

с экспериментальными данными, поэтому они постоянно совершенствуются [5–7].

Аппроксимации имеют недостатки, в целом ни одна из них не дает высокую точность и возможность использования только трех справочных величин ( $B_m$ ,  $B_r$ ,  $H_c$ ). Некоторые сложны для маршевого счета в составе более сложных сопряженных моделей. Задачей исследования является выбор форм аппроксимаций кривых намагничивания, применяемых в ЭМП магнитомягких материалов, что обеспечит удобство использования и соответствие экспериментальным данным. Применительно к быстродействующим ЭМП топливной аппаратуры двигателей со временем срабатывания менее 0,1 мс также поставлена задача разработки относительно простого описания и оценки значимости динамического гистерезиса, чтобы обеспечить возможность встраивания быстродействующего ЭМП в комплексную модель нестационарных процессов в топливной аппаратуре [8–10]. Необходимо рассмотреть и другие особенности ЭМП для топливной аппаратуры: влияние повышенной температуры, полное размагничивание материала ЭМП в конце процесса. При проектировании сложных магнитопроводов полезным дополнительным методом остается 3D-моделирование электромагнитных процессов [11, 12], а также ставится задача сопоставления результатов с расчетными и экспериментальными данными. Адекватное описание процессов позволит достичь конечную цель — проектирование быстродействующих ЭМП современной топливной аппаратуры [13].

**Описание кривых статического магнитного гистерезиса для расчета ЭМП топливных систем.** После сравнения известных соотношений с экспериментальными данными для сталей, используемых в ЭМП, предлагается следующий метод расчета кривых намагничивания и петель статического гистерезиса. При этом принимаются во внимание особенности протекающих в ЭМП процессов и допущения:

- ЭМП работает вблизи магнитного насыщения;
- используются магнитомягкие материалы с узкими петлями гистерезиса;
- начальная кривая намагничивания описывается как средняя линия между петлями гистерезиса ( $OA$ , см. рис. 1);
- аппроксимация базируется только на трех доступных и приводимых в справочниках показателях магнитных материалов:  $B_m$ ,  $B_r$ ,  $H_c$  или  $B_m$ ,  $H_c$ ,  $\mu_{\max}$  ( $\mu_{\max}$  — максимальная относительная магнитная проницаемость).

Применительно к ЭМП для актуальной рабочей зоны (см. рис. 1) можно записать:

$$B = (1/a) \lg^C [(H/H_c) + 1]; \quad B = (1/a) \lg^C [(H/H_c) + 2] \quad (1)$$

— для кривых  $OA$  и  $AC$ .

Для обеспечения функционирования математической модели ЭМП в случае при ошибочном избыточном перемагничивании принимается приближенное описание кривых при  $H < 0$ :

$$B = (-1/a) \lg^C [-H/H_c]; \quad B = (-1/a) \lg^C [(-H/H_c) + 1] \quad (2)$$

— для нештатного намагничивания (кривая  $CD$ ) и размагничивания (отрезок  $CO$ ).

Если есть справочные данные по  $B_m(H_m)$ ,  $B_r$  и  $H_c$ , то константы  $C$  и  $a$  определяются по соотношениям:

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

Если есть данные по  $B_m(H_m)$ ,  $H_c$  и максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{\max}$ , то  $\mu_{\max}$  относим к окрестности  $\Delta H \approx 0,25H_c$  вблизи  $B \rightarrow 0$ , тогда константы  $C$  и  $a$  определяются так:

$$C = \left\{ \lg\left(\frac{B_m}{\mu_{\max}\Delta H}\right) \right\} / \left\{ \lg\left[\frac{\lg(H_m/H_c)}{\lg((\Delta H/H_c) + 1)}\right] \right\}; \quad a = \frac{\lg^C(H_m/H_c)}{B_m}.$$

**Интегральная модель быстродействующего ЭМП топливной системы.** Расчетный анализ работы ЭМП проводится с помощью математической модели, которую в отличие от 3D-расчетов, можно назвать интегральной. Алгоритм расчета можно представить следующим образом. Если не известна функция тока  $i(t)$ , а задана функция напряжения питания  $E_0(t)$ , то предварительно определяют ток в нестационарном электрическом процессе из второго закона Кирхгофа для разрядки импульсного конденсатора через катушку и активные сопротивления  $R$  цепи, включая провода и катушку:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left[ E_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i dt - iR - i \frac{dL}{dt} \right],$$

где  $C$  — емкость импульсного источника питания;

$$L = \frac{w^2}{\frac{2\delta}{S_{\text{зав}}} \mu_{\text{т}} + \frac{l_{\text{маг}}}{S_{\text{маг}}} \mu_{\text{маг}}}$$

— индуктивность катушки ЭМП;

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{dL}{d\delta} U_{\text{кл}} = \frac{2w^2}{S_{\text{заз}} \mu_{\text{T}}} U_{\text{кл}} \left( \frac{2\delta}{S_{\text{заз}} \mu_{\text{T}}} + \frac{l_{\text{маг}}}{S_{\text{маг}} \mu_{\text{маг}}} \right)^{-2}.$$

Здесь  $w$  — число витков в катушке;  $S_{\text{заз}}$  — площадь сечения рабочего зазора;  $\mu_{\text{T}}$  — магнитная проницаемость топлива;  $l_{\text{маг}}$  — длина по средней линии магнитопровода;  $S_{\text{маг}}$  — площадь сечения магнитопровода (без его детализации по участкам);  $\mu_{\text{маг}}$  — магнитная проницаемость магнитопровода (сердечника);  $U_{\text{кл}}$  — скорость клапана (якоря).

Магнитный поток  $\Phi$  и напряженность магнитного поля  $H$  на очередном шаге  $k$  по времени определяются по известным значениям на предыдущем  $(k-1)$ -м шаге и для  $j$ -го участка магнитопровода:

$$\Phi^k = \frac{iw}{R_{\text{зазор}} + R_{\text{маг}}} = i^k w \sqrt{\left[ \sum_{j=1}^2 \frac{\delta_{\text{заз}}^{k-1}}{S_{\text{заз}} \mu_{\text{T}}} + \sum_{j=1}^n \frac{l_{\text{заз}}^j}{S_{\text{заз}}^j (\mu_{\text{заз}}^{k-1})^j} \right]};$$

$$(H_{\text{маг}}^k)^j = \frac{\Phi^k}{S_{\text{маг}}^j (\mu_{\text{маг}}^{k-1})^j}.$$

Осесимметричный магнитопровод обычно можно разделить на четыре участка  $n = 4$ , из которых один — якорь. Напротив, можно упростить задачу, считая  $n = 1$ , принимая площадь сечения  $S_{\text{маг}}$  по минимальному сечению. Тогда новые значения магнитной индукции  $B$  с использованием (1), (2) и магнитной проницаемости магнитопровода  $\mu_{\text{маг}}$  определяются так:

$$(B_{\text{маг}}^k)^j = f(H_{\text{маг}}^k)^j; (\mu_{\text{маг}}^k)^j = (B_{\text{маг}}^k)^j / (H_{\text{маг}}^k)^j,$$

где  $B_{\text{маг}}$  и  $H_{\text{маг}}$  — индукция и напряженность в магнитопроводе.

Индукция в рабочем зазоре каждого полюса

$$B_{\text{заз}} = B_{\text{маг}} S_{\text{маг}} / (S_{\text{заз}} \sigma),$$

где коэффициент рассеяния потока  $\sigma = (0,7175 B/B_{\text{max}} + 0,4695)^{0,5}$ , в простейшей оценке  $\sigma \approx 1,1$ .

Для решения сопряженной задачи о работе топливной аппаратуры определяется сила ЭМП

$$F_{\text{ЭМП}} = \frac{B_{\text{заз}}^2 S_{\text{заз}}}{\sqrt{k} \mu_0}, \quad (3)$$

где коэффициент  $k \approx 1,2$  введен в целях учета вихреобразования в магнитопроводе ЭМП.

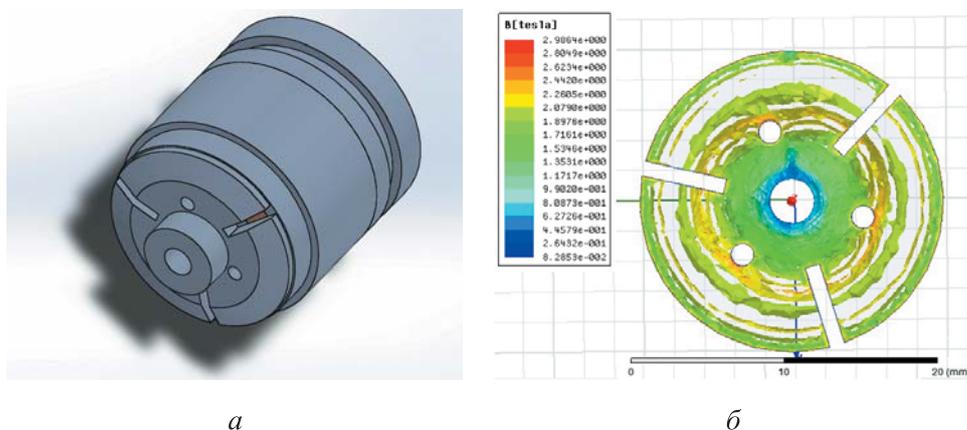
Более адекватный подход к важнейшей особенности работы ЭМП топливных систем со временем срабатывания до 0,1 мс — это рассмотрение динамического гистерезиса [1]. Согласно формуле Кадочникова [14], для получения такого же значения индукции необходима большая напряженность поля для преодоления магнитной вязкости, характеризующей динамическое взаимодействие доменных стенок с окружающей средой при перемагничивании, и для поля, создаваемого вихревыми токами:

$$H_{\text{дин}}(t) = H_{\text{ст}}(B_{\text{ст}}) + \frac{1}{r} \exp\left(\alpha \frac{B_{\text{ст}}^2}{B_{\text{max}}^2}\right) \frac{dB_{\text{ст}}}{dt} + \frac{1}{3} \gamma_{\text{экв}} \delta_{\text{ших}}^2 \frac{dB_{\text{ст}}}{dt}, \quad (4)$$

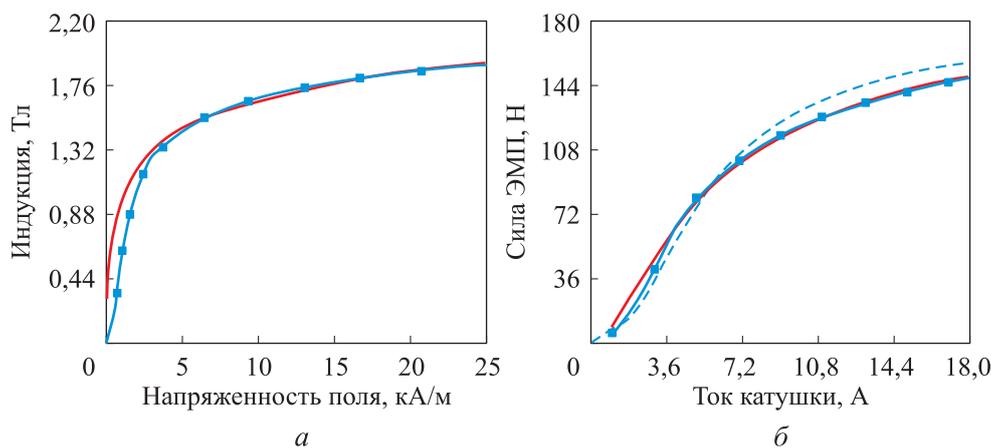
где  $H_{\text{дин}}$  — напряженность поля в динамическом процессе;  $H_{\text{ст}}(B_{\text{ст}})$  — статическая напряженность поля;  $r$  — коэффициент магнитной вязкости;  $\alpha$  — параметр в уравнении магнитной вязкости, зависящий от материала и технологии изготовления;  $\gamma_{\text{экв}} = \gamma \lambda$  — эквивалентная удельная электропроводность магнитного материала ( $\gamma$  — действительная удельная электропроводность материала;  $\lambda$  — коэффициент раздробленности доменной структуры);  $\delta_{\text{ших}}$  — половина толщины шихтованных пластин. Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\gamma_{\text{экв}}$ ,  $r$  зависят от частоты процесса [14].

**Идентификация модели ЭМП.** С целью оценить достоверность моделирования по описанному алгоритму сопоставляли расчетные результаты с экспериментально определенной кривой намагничивания и 3D-моделирования с помощью программы ANSOFT Maxwell (ANSYS) ЭМП форсунки Common Rail R. Bosch 0445110599 автомобилей BMW. Для проведения расчета в ANSOFT Maxwell в программе Solid Works создана трехмерная модель электромагнита (рис. 2). При моделировании задавались граничные условия: катушка изолирована, протекающий в ней ток задан параметрически в диапазоне от 0 до 20 А. Распределение магнитной индукции по якору приведено на рис. 2. Результаты сравнения расчетов ЭМП с рабочим зазором 0,1 мм и данных эксперимента по статическому намагничиванию представлены на рис. 3. Аналогичные результаты получены и с другими рабочими зазорами.

Далее выполняется сравнение расчетов нестационарного процесса в быстродействующем ЭМП. Задана диаграмма управляющего ЭМП тока в форме форсажа и двух уровней тока удержания. Результаты расчетов процессов ЭМП сравнивались с экспериментальными данными, получен-



**Рис. 2.** Трехмерная модель ЭМП автомобильной форсунки (а) и распределение индукции магнитного поля по якорю при  $i = 18$  А (б)

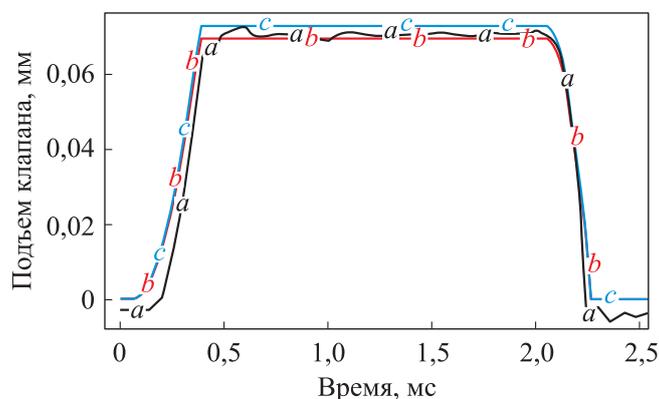


**Рис. 3.** Зависимости индукции магнитного поля от напряженности (а) и силы ЭМП от тока катушки (б):

— эксперимент; — расчет по описанному алгоритму;  
 --- расчет в среде ANSOFT Maxwell

ными на стенде, созданном в Харбинском инженерном университете [15]. Экспериментальные и расчетные кривые подъема регулирующего клапана с ЭМП в зависимости от времени приведены на рис. 4.

Очевидно, что результаты расчетов, выполненных с помощью двух разных программ, практически идентичны. Нулевая линия на экспериментальной кривой ниже нуля и ход более 0,07 мм определяются технологией измерения и фактическим ходом клапана в исследуемом ЭМП. Характерно, что в расчете ЭМП по описанному методу в составе общей модели топливоподдачи с учетом продольной деформации форсунки ход



**Рис. 4.** Экспериментальные (a) и расчетные в ANSOFT Maxwell (b) кривые подъема регулирующего клапана ЭМП в зависимости от времени (c — расчет по описанному алгоритму)

клапана хорошо совпадает с экспериментально зарегистрированным. Расчет в ANSOFT Maxwell не рассматривает форсунку как объект изучения, и ход клапана равен формально заданному.

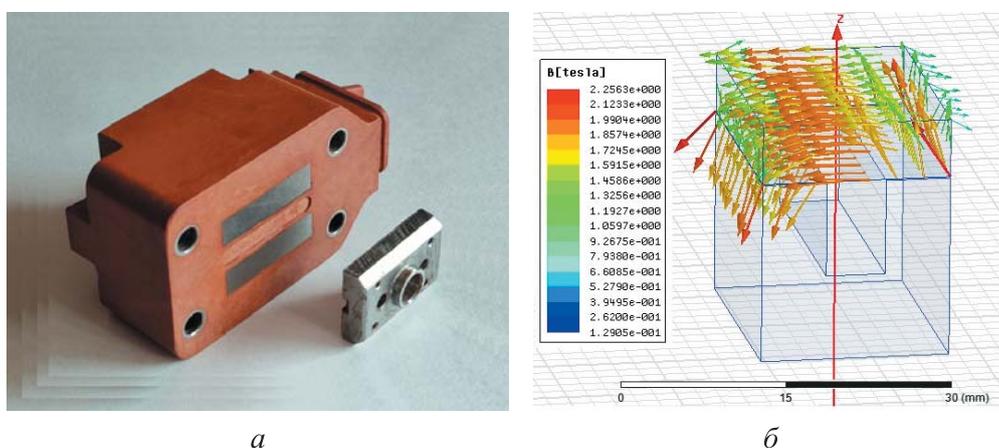
Преимуществом программы ANSOFT Maxwell является возможность более точного расчета магнитопровода произвольной геометрии. При этом интерес представляет оптимизированная геометрия с постоянным поперечным сечением по длине силовых линий магнитного поля. Задание магнитопровода в виде кусочно-постоянных площадей в описанном алгоритме удовлетворяет этому условию. Основным преимуществом алгоритма является его простота и быстродействие, а главное, — встраивание в сопряженную модель и программы высоконапорной топливоподающей аппаратуры двигателей.

**Анализ и обсуждение результатов расчета ЭМП управляющего клапана топливного насоса высокого давления.** Выбор типа топливоподающей аппаратуры — это многофакторная неоднозначная процедура и ее результаты могут быть различными даже для близких двигателей или их модификаций в зависимости от предъявляемых требований. С технической точки зрения важнейшими из них являются экологические. Обоснование типа и параметров топливной аппаратуры с позиции оптимизации рабочего процесса выполнено в МГТУ им. Н.Э. Баумана [16, 17].

Имеется много среднеоборотных двигателей, для которых оптимальной схемой топливоподачи является топливный насос высокого давления (ТНВД) с быстродействующим ЭМП и традиционная гидромеханическая форсунка. В таких схемах используется большие ход (0,2...0,3 мм)

и диаметр (6...12 мм) управляющего клапана, а также возможность сохранения некоторой гидравлической неразгруженности клапана. Для таких условий работы ЭМП остается актуальной обеспечение стабильности подачи и времени срабатывания клапана в обоих направлениях. Это требует оптимизации параметров такого ЭМП на этапе проектирования и наличия эффективного расчета.

Для нового отечественного дизеля 6ЧН22/28 (АО «РУМО») в качестве исходного варианта взят ЭМП дизеля (рис. 5) производства ООО «ППП «Дизельавтоматика», наиболее вероятного поставщика топливоподающей аппаратуры.



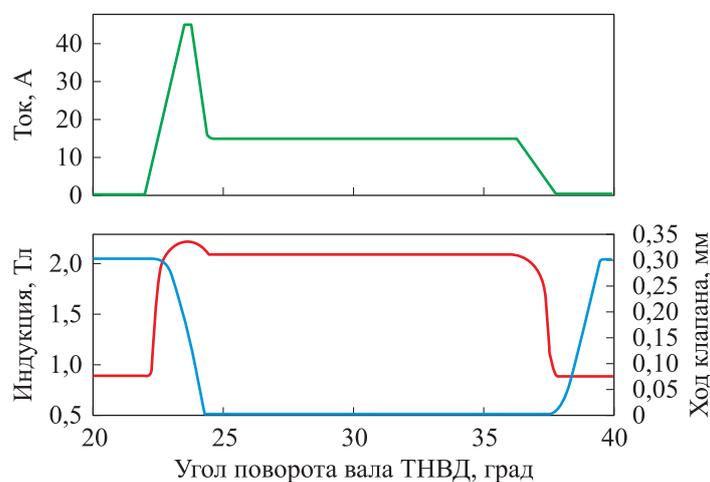
**Рис. 5.** Образец ЭМП дизеля производства ООО «ППП «Дизельавтоматика» (а) и расчет индукции в объеме магнитопровода (б)

Электромагнитный привод выполнен с магнитопроводом из ленты (сталь 3411), проводом диаметром 0,71 мм намотано 36 витков с минимальным рабочим зазором 0,1 мм. Актуальные параметры электротехнической стали 3411 приведены в таблице. За основу для последующей оптимизации принята стратегия управления со следующими параметрами: максимальный ток форсажа 45 А за 0,7 мс, ток удержания 12...15 А; длительность обратного импульса равна нулю. Характер процесса при данных параметрах управления в ЭМП приведен на рис. 6.

Для оценки рациональности проектирования магнитопровода проводились его расчеты в среде ANSOFT Maxwell. Результаты расчета электромагнитного процесса с помощью ANSOFT Maxwell и по описанному алгоритму отличаются не более чем на 10...15 Н (5 %).

**Актуальные параметры электротехнической стали 3411**

Статические характеристики [18]					
$B_{\max}$ , Тл (при $H$ , А/м)		$B_r$ , Тл	$\mu_{\max}$ , Гн/м	$H_r$ , А/м	
1,761 (600)		1,162	0,207	8,75	
Динамические характеристики					Примечание
$\alpha$	$\gamma$ , (Ом · м) <sup>-1</sup>	$\lambda$	$\gamma_e \delta^2$ , м/Ом	$r$ , Ом/м, при $f = 400$ Гц	Лента $2\delta$ , мм
2	$10^6$	3	0,042	200	0,32 [14]
2	$2 \cdot 10^6$	1	0,041	180; $r = 14,21 \sqrt{f} - 100$	0,32 [18]



**Рис. 6.** Зависимости тока (зеленая кривая), индукции (синяя) и хода клапана (красная) от угла поворота вала ТНВД

В обоих расчетах просматривается проблема обеспечения необходимой площади поперечного сечения вблизи разрыва магнитопровода, т. е. задача проектирования якоря вблизи рабочего зазора. Там быстрее достигается магнитное насыщение (см. рис. 5) и ограничение роста индукции. В целях обеспечения быстродействия ЭМП площадь сечений в рабочем зазоре и сечениях подвижного якоря выбрана минимально возможной для получения необходимой силы, в данном случае она составила  $144 \text{ мм}^2$ . С позиции оптимальности магнитопровода при магнитном насыщении как основном режиме работы ЭМП наилучшим законом изменения сечения по длине по средней линии магнитопровода является его постоянство. Увеличение площади сечения каких-то участков малополезно, т. е. особенности их исполнения уже не столь важны.

При проектировании магнитопровода, особенно для простейших осесимметричных и двумерных исполнений, расчеты по предлагаемому алгоритму не проигрывают более точным 3D-расчетам в среде ANSOFT Maxwell, но существенно проще, а главное выполняются в рамках сопряженной задачи о работе топливоподающей аппаратуры двигателя с одновременным определением показателей топливоподачи.

**Влияние динамического гистерезиса.** Для проектируемого ЭМП используются коэффициенты (4), приведенные в таблице [14, 18]. Эквивалентная частота определяется по крутизне фронтов изменения индукции. Результаты сравнительных расчетов приведены на рис. 7, петля динамического гистерезиса многократно шире петли статического гистерезиса, что указывает на большие затраты мощности на перемагничивание.

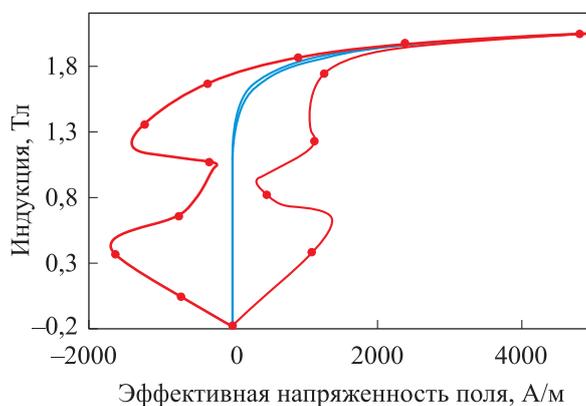


Рис. 7. Петли статического (—) и динамического (—•—) гистерезиса

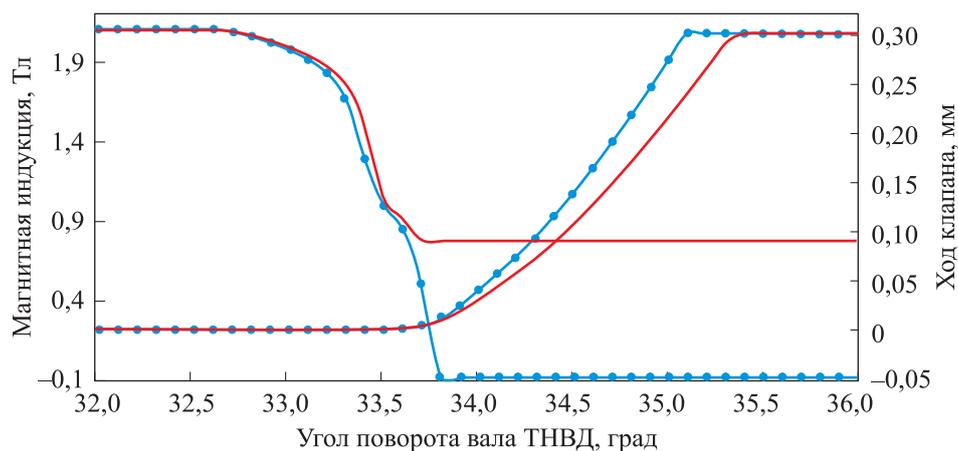
В целях сохранения быстродействия использованы решения, труднодоступные для ЭМП форсунок Common Rail. Так, отчасти в ущерб индукции насыщения выбран материал с низкими параметрами магнитной вязкости (см. таблицу), для снижения вихревых токов магнитопровод шихтован со скреплением местной сваркой. За счет этих мероприятий эффективная напряженность ограничена, а закон хода клапана изменяется незначительно.

**Влияние температуры ЭМП.** В приводах форсунок Common Rail магнитопровод нагревается током, теплотой от камеры сгорания и потока топлива на управление благодаря эффекту Джоуля — Томсона [19]. Увеличение температуры может значительно уменьшить индукцию насыщения, остаточную индукцию. Так, например, индукция насыщения материала ferrite Siemens N30 при повышении температуры от 20 до 120 °С уменьшается в 3 раза [20]. Вместе с тем для высокотемпературных усло-

вий оказалось возможным подобрать никелевый сплав DT4С с несколько уменьшенной индукцией насыщения (до 1,7 Тл при напряженности 7000 А/м), но в диапазоне от 20 до 150 °С ее значение уменьшается всего на 3 % [20]. В рассматриваемой топливоподающей аппаратуре с электроуправляемыми ТНВД тепловые условия более благоприятные, чем в приводах форсунок Common Rail, поэтому характеристики стали 3411 приняты удовлетворительными.

**Размагничивание магнитопровода в конце подачи.** Часто ток в контуре в конце подачи доводится до нуля (см. рис. 6). Но и для этого прикладывается отрицательное напряжение, поэтому говорят о «размагничивании». Однако доведение тока до нуля всего лишь прекращает намагничивание, но не ликвидирует остаточную намагниченность магнитопровода (см. рис. 6).

Для ускорения открытия клапана в конце процесса естественно «занулить» индукцию и электромагнитную силу, а не ток. Для этого необходим тщательный подбор продолжительности и амплитуды размагничивающего импульса. Результаты изменения процесса при полном размагничивании приведены на рис. 8. При полном размагничивании с занулением индукции и силы клапан закрывается быстрее. Умеренное влияние размагничивания обусловлено тем, что согласно (3) сила пропорциональна квадрату индукции и в области малых значений индукции слабо влияет на конечный процесс динамики клапана. Однако полное размагничивание как операцию, не требующую никаких дополнительных усилий, целесообразно предусматривать.



**Рис. 8.** Зависимости магнитной индукции и хода клапана от угла поворота вала ТНВД (завершающий этап подачи; синие кривые с маркером относятся к полному размагничиванию)

**Заключение.** Применительно к быстродействующим ЭМП топливной аппаратуры двигателей актуальны математические модели, достоверные для описания нестационарных электромагнитных процессов в приводах с временем срабатывания менее 0,1 мс, простых в использовании и доступных для встраивания в комплексную математическую модель топливной аппаратуры высоконапорного впрыскивания топлива.

Приведенная модель отвечает требованиям простоты и возможностям описания быстропротекающего процесса в ЭМП топливных систем. Для обеспечения ее функционирования в части описания кривых намагничивания достаточно трех базовых справочных величин  $B_m(H_m)$ ,  $B_r$  и  $H_c$  или  $B_m(H_m)$ ,  $H_c$  и  $\mu_{\max}$ .

Модель обеспечивает хорошее согласование с экспериментальными результатами в отношении описания кривых намагничивания, усилия ЭМП, быстродействующем, электромагнитном и гидромеханическом процессах, демонстрируя достаточность для решения задач анализа, оптимизации и проектирования ЭМП топливных систем двигателей с электронным управлением.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показывает, что для простых осесимметричных и плоских форм магнитопроводов с параметрами, близкими к оптимальным, предложенный метод расчета не уступает расчетам в среде ANSOFT Maxwell, но проще в реализации. Он также незаменим при создании сопряженных моделей нестационарных гидромеханических, теплофизических и электромагнитных процессов. Трехмерное моделирование имеет несомненное преимущество при проектировании сложных трехмерных магнитопроводов и должно использоваться как самостоятельное расчетное исследование при проектировании ЭМП.

Электромагнитные приводы топливных систем непосредственного действия с электроуправляемыми топливными насосами находятся в специфических условиях, что допускает снижение требований к рабочей температуре магнитных материалов и потерь, связанных с вихревыми токами, однако требуют повышенных перемещений якоря.

Для повышения быстродействия ЭМП на завершающей стадии недостаточно применяемого зануления управляющего тока, а целесообразно полное размагничивание магнитопровода.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Liu P., Fan L., Xu D., et al. Multi-objective optimization of high-speed solenoid valve based on response surface and genetic algorithm. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015-01-1350. DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1350>
- [2] Филиппов Е. Нелинейная электротехника. М., Энергия, 1976.
- [3] Лохов С.Л., Сивкова А.П. Распределенная модель гистерезиса с вихревыми токами. *ЮУрГУ. Сер. Энергетика*, 2007, № 20, с. 27–31.
- [4] Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1986, no. 61, no. 1-2, pp. 48–60. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-8853\(86\)90066-1](http://dx.doi.org/10.1016/0304-8853(86)90066-1)
- [5] Azzaoui S., Srairi K., Benbouzi M.E.H. Non linear magnetic hysteresis modelling by finite volume method for Jiles — Atherton model optimizing by a genetic algorithm. *J. Electromagn. Anal. Appl.*, 2011, vol. 3, no. 6, pp. 191–198. DOI: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2011.36032>
- [6] Jaafar M.F. Magnetic hysteresis modeling and numerical simulation for ferromagnetic materials. *CoDIT*, 2013, pp. 516–523. DOI: <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2013.6689598>
- [7] Li H., Li Q., Xu X.B., et al. A modified method for Jiles — Atherton hysteresis model and its application in numerical simulation of devices involving magnetic materials. *IEEE Trans. Magn.*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 1094–1097. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2072493>
- [8] Grekhov L., Zhao J., Ma X. Fast-response solenoid actuator computational dimulation for engine fuel systems. *ICIEAM*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076413>
- [9] Kartigeyan J., Ramaswamy M. Effect of material properties on core loss in switched reluctance motor using non-oriented electrical steels. *J. Magn.*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 93–99. DOI: <https://doi.org/10.4283/JMAG.2017.22.1.093>
- [10] Guerrier P., Nielsen K.K., Hattel J.H. Temperature dependence and magnetic properties of injection molding tool materials used in induction heating. *IEEE Trans. Magn.*, 2015, vol. 51, no. 9, art. 6000507. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2428215>
- [11] Li S., Wu P., Cao L., et al. CFD simulation of dynamic characteristics of a solenoid valve for exhaust gas turbocharger system. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, vol. 110, pp. 213–222. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.155>
- [12] Guerrier P., Tosello G., Nielsen K.K., et al. Three-dimensional numerical modeling of an induction heated injection molding tool with flow visualization. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016, vol. 85, no. 1-4, pp. 643–660. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7955-8>
- [13] Bai Y., Fan L.Y., Ma X.Z., et al. Effect of injector parameters on the injection quantity of common rail injection system for diesel engines. *Int. J. Automot. Technol.*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 567–579. DOI: <https://doi.org/10.1007/s1q2239-016-0057-2>

- [14] Кадочников А.И. Динамическое перемагничивание магнитопроводов из электротехнической стали под воздействием напряжения различной формы. *Электричество*, 2003, № 9, с. 62–66.
- [15] Zhao J., Grekhov L.V., Fan L., et al. Description of operation of fast-response solenoid actuator in diesel fuel system model. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 327, no. 5, art. 052015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052015>
- [16] Kuleshov A.S., Grekhov L.V. Multidimensional optimization of DI diesel engine process using multi-zone fuel spray combustion model and detailed chemistry NO<sub>x</sub> formation model. *SAE Tech. Pap.*, 2013, no. 2013–01–0882. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-0882>
- [17] Грехов Л.В., Габитов И.И., Неговора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей. М., Легион-Автодата, 2013.
- [18] Кадочников А.И. Динамические петли магнитного гистерезиса. Екатеринбург, РАН УО, 2007.
- [19] Zhao J., Lu X., Grekhov L. Experimental study on the fuel heating at the nozzle of the high pressure common-rail injector. *Fuel*, 2021, vol. 283, art. 119281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119281>
- [20] Zhao J., Grekhov L. Effect of fuel temperature on operation of high-speed electromagnetic actuator common rail injector. *ICIEAM*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743073>

**Грехов Леонид Вадимович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Онищенко Дмитрий Олегович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Фурман Виктор Владимирович** — д-р техн. наук, директор ООО «ППП «Дизельавтоматика» (Российская Федерация, 410017, г. Саратов, ул. Чернышевского, д. 109).

**Черезов Игорь Александрович** — ведущий конструктор проекта, ООО «ППП «Дизельавтоматика» (Российская Федерация, 410017, г. Саратов, ул. Чернышевского, д. 109).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Грехов Л.В., Онищенко Д.О., Фурман В.В. и др. Расчет и проектирование быстродействующих электромагнитных приводов топливных систем двигателей с электронным управлением. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 4 (147), с. 106–123.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-4-106-123>

## CALCULATION AND DESIGN OF HIGH-SPEED ELECTROMAGNETIC DRIVES FOR THE ENGINE FUEL SYSTEMS WITH ELECTRONIC CONTROL

L.V. Grekhov<sup>1</sup>

grekhov@bmstu.ru

D.O. Onishchenko<sup>1</sup>

doctor@baumanracing.ru

V.V. Furman<sup>2</sup>

dizavt@overta.ru

I.A. Cherezov<sup>2</sup>

rw4cvz@mail.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC "PPP "Dieselavtomatika", Saratov, Russian Federation

---

### Abstract

The purpose of the proposed model for calculating the high-speed electromagnetic drives is their integration into a complex model and calculation program for conjugated hydromechanical, thermophysical and electromagnetic processes used in design and optimization of the high-pressure fuel supply equipment of the modern gasoline, diesel and gas engines. The paper considers features of the high-speed electromagnetic drives functioning, and approaches used to describe the processes occurring in them are analyzed. Mathematical models of the non-stationary electrical processes powered by a booster source and of magnetization of the soft magnetic materials taking into account static and dynamic hysteresis are presented. A drive model is formulated for the conjugated problem of processes in the high-pressure fuel systems. The results obtained using models for calculating the electromagnetic drive as part of the fuel system complex mathematical model are compared with experimental data and 3D simulation in the ANSOFT Maxwell environment. This comparison confirms reliability of the proposed model. Design of a control valve drive for the high-pressure fuel pump of a medium-speed engine is described. Features of calculation and design of the high-speed drives are considered, including the influence of elevated temperature, dynamic hysteresis and complete demagnetization at the end of the process. A conclusion is made about the proposed model efficiency in tasks of analyzing and creating the high-speed drives with the response time of 0.1 ms for fuel systems of the electronically controlled engines

### Keywords

*Diesel engine, fuel supply equipment, fuel injection, mathematical simulation, electromagnetic drive, performance*

Received 21.10.2022

Accepted 03.02.2023

© Author(s), 2023

---

*This work was supported by the RSF project no. 21-49-00012 and was carried out using the equipment of the UNC "Beam-M" of the Bauman Moscow State Technical University*

## REFERENCES

- [1] Liu P., Fan L., Xu D., et al. Multi-objective optimization of high-speed solenoid valve based on response surface and genetic algorithm. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015-01-1350. DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1350>
- [2] Filippov E. *Nelineynaya elektrotehnika [Nonlinear electrical engineering]*. Moscow, Energiya Publ., 1976.
- [3] Lokhov S.L., Sivkova A.P. Distributed hysteresis model with eddy currents. *YuUrGU. Ser. Energetika [Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering]*, 2007, no. 20, pp. 27–31 (in Russ.).
- [4] Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1986, no. 61, no. 1-2, pp. 48–60. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-8853\(86\)90066-1](http://dx.doi.org/10.1016/0304-8853(86)90066-1)
- [5] Azzaoui S., Srairi K., Benbouzi M.E.H. Non linear magnetic hysteresis modelling by finite volume method for Jiles — Atherton model optimizing by a genetic algorithm. *J. Electromagn. Anal. Appl.*, 2011, vol. 3, no. 6, pp. 191–198. DOI: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2011.36032>
- [6] Jaafar M.F. Magnetic hysteresis modeling and numerical simulation for ferromagnetic materials. *CoDIT*, 2013, pp. 516–523. DOI: <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2013.6689598>
- [7] Li H., Li Q., Xu X.B., et al. A modified method for Jiles — Atherton hysteresis model and its application in numerical simulation of devices involving magnetic materials. *IEEE Trans. Magn.*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 1094–1097. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2072493>
- [8] Grekhov L., Zhao J., Ma X. Fast-response solenoid actuator computational dimulation for engine fuel systems. *ICIEAM*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076413>
- [9] Kartigeyan J., Ramaswamy M. Effect of material properties on core loss in switched reluctance motor using non-oriented electrical steels. *J. Magn.*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 93–99. DOI: <https://doi.org/10.4283/JMAG.2017.22.1.093>
- [10] Guerrier P., Nielsen K.K., Hattel J.H. Temperature dependence and magnetic properties of injection molding tool materials used in induction heating. *IEEE Trans. Magn.*, 2015, vol. 51, no. 9, art. 6000507. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2428215>
- [11] Li S., Wu P., Cao L., et al. CFD simulation of dynamic characteristics of a solenoid valve for exhaust gas turbocharger system. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, vol. 110, pp. 213–222. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.155>
- [12] Guerrier P., Tosello G., Nielsen K.K., et al. Three-dimensional numerical modeling of an induction heated injection molding tool with flow visualization. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016, vol. 85, no. 1-4, pp. 643–660. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7955-8>

- [13] Bai Y., Fan L.Y., Ma X.Z., et al. Effect of injector parameters on the injection quantity of common rail injection system for diesel engines. *Int. J. Automot. Technol.*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 567–579. DOI: <https://doi.org/10.1007/s1q2239-016-0057-2>
- [14] Kadochnikov A.I. Dynamic remagnetization of magnetic circuits made of electrical steel under the effect of different waveforms voltage. *Elektrichestvo*, 2003, no. 9, pp. 62–66 (in Russ.).
- [15] Zhao J., Grekhov L.V., Fan L., et al. Description of operation of fast-response solenoid actuator in diesel fuel system model. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 327, no. 5, art. 052015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052015>
- [16] Kuleshov A.S., Grekhov L.V. Multidimensional optimization of DI diesel engine process using multi-zone fuel spray combustion model and detailed chemistry NO<sub>x</sub> formation model. *SAE Tech. Pap.*, 2013, no. 2013–01–0882. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-0882>
- [17] Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negovora A.V. Konstruktsiya, raschet i tekhnicheskii servis toplivopodayushchikh sistem dizeley [Design, calculation and technical service of fuel supply systems of diesel engines]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2013.
- [18] Kadochnikov A.I. Dinamicheskie petli magnitnogo gisterezisa [Dynamic magnetic hysteresis loops]. Ekaterinburg, RAN UO Publ., 2007.
- [19] Zhao J., Lu X., Grekhov L. Experimental study on the fuel heating at the nozzle of the high pressure common-rail injector. *Fuel*, 2021, vol. 283, art. 119281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119281>
- [20] Zhao J., Grekhov L. Effect of fuel temperature on operation of high-speed electromagnetic actuator common rail injector. *ICIEAM*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743073>

**Grekhov L.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Onishchenko D.O.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Furman V.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Director, LLC “PPP “Dieselavtomatika” (Chernyshevskogo ul. 109, 410017 Russian Federation).

**Cherezov I.A.** — Lead Project Designer, LLC “PPP “Dieselavtomatika” (Chernyshevskogo ul. 109, 410017 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Grekhov L.V., Onishchenko D.O., Furman V.V., et al. Calculation and design of high-speed electromagnetic drives for the engine fuel systems with electronic control. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 4 (147), pp. 106–123 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-4-106-123>