

лий Петрович. – К., 1990. – 231 с. 3. Ковбасенко С.В. Покращення показників багатощабрових бензинових двигунів з відключенням групи циліндрів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Ковбасенко Сергій Володимирович. – К., 2000. – 289 с. 4. Сирота О.В. Покращення паливної економічності і екологічних показників багатощабрового бензинового двигуна застосуванням комбінованого методу регулювання потужності: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Сирота Олександр Вадимович. – К., 2011. – 286 с. 5. Говорун А.Г. Конструкція і динаміка двигунів: навчальний посібник / А.Г.Говорун, А.О.Корпач. – К.: НТУ, 2007. – 124 с. 6. Цюман М.П. Поліпшення паливної економічності бензинового двигуна з системою нейтралізації відпрацьованих газів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Цюман Микола Павлович. – К., 2010. – 266 с.

Bibliography (transliterated):

1. Redziuk A.M. Povyshenie toplivnoi ekonomichnosti mnohoshabrovyykh benzinovykh dvigatelei v rezhymakh malyykh nakhuzok i kholostoho khoda: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.04.02 / Redziuk Anatolii Mikhailovich. – K., 1982. – 273 s. 2. Mateichyk V.P. Povyshenie toplivnoi ekonomichnosti mnohoshabrovyykh benzinovykh dvigatelei sovershenstvovaniem sposoba otkliucheniia hruppy tsilindrov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.04.02 / Mateichyk Vasilii Petrovich. – K., 1990. – 231 s. 3. Kovbasenko S.V. Pokrashchennia pokaznykh bahatoshabrovoho benzynovoho dvyhuniv z vidkliuchenniam hrupy tsylindriv: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.03 / Kovbasenko Serhii Volodymyrovych. – K., 2000. – 289 s. 4. Syrota O.V. Pokrashchennia palyvnoi ekonomichnosti i ekolohichnykh pokaznykh bahatoshabrovoho benzynovoho dvyhuna zastosuvanniam kombinovanoho metodu rehuliuвання potuzhnosti: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.03 / Syrota Oleksandr Vadymovych. – K., 2011. – 286 s. 5. Hovorun A.H. Konstruktsiia i dynamika dvyhuniv: navchalnyi posibnyk / A.H.Hovorun, A.O.Korpach. – K.: NTU, 2007. – 124 s. 6. Tsiuman M.P. Polipshennia palyvnoi ekonomichnosti benzynovoho dvyhuna z systemoiu neitralizatsii vidpratsovanykh haziv: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.03 / Tsiuman Mykola Pavlovych. – K., 2010. – 266 s.

УДК 621.436

Н. А. Иващенко, д-р техн. наук, Л.В. Грехов, д-р техн. наук, Чжао Цзяньхуэй, асп.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРИВОДА УПРАВЛЯЮЩЕГО КЛАПАНА ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ

Введение

В настоящее время экономические и экологические показатели являются наиболее важными при совершенствовании двигателей внутреннего сгорания. Применение и развитие топливоподающей аппаратуры (ТПА) с клапанным управлением Common Rail позволяет осуществлять гибкое управление характеристикой впрыскивания топлива, опережением и величиной подачи топлива, и, таким образом, удовлетворить строгим нормам выбросов вредных веществ [1]. Пьезопровод позволяет повысить точность управления топливом, сокращает время срабатывания открытия клапана, но высокая стоимость и трудность замены серийного электромагнитного привода на пьезопровод ограничивают его применение.

Математическая модель БЭМП с высокой адекватностью позволяет более реально описывать процесс его работы, и всесторонне оптимизировать параметры. С этой точки зрения разработка и совершенствование математической модели для расчета нестационарного процесса работы БЭМП является актуальной задачей.

Математическая модель

С учетом магнитного поля в сердечнике общая формула для расчета суммарной магнитной

индукции, отражающая равенство намагничивающей силы сумме магнитных сопротивлений:

$$B = i \cdot w \sqrt{\left(\frac{2\delta}{\mu_T} + \frac{l_{серд}}{\mu_{серд}}\right)}, \quad (1)$$

где i - ток, В; w - количество витков катушки; δ - зазор между сердечником и якорем, мм; $\mu_{серд}$ - магнитная проницаемость в сердечнике, Гн/м; μ_T - магнитная проницаемость топлива, Гн/м; $l_{серд}$ - длина средней линии сердечника, мм.

С учетом переменной L электрическая цепь описывается:

$$E = i \cdot R + \frac{1}{C} \int_0^t idt + \frac{d(i \cdot L)}{dt} \\ = i \cdot R + \frac{1}{C} \int_0^t idt + \frac{di}{dt} \cdot L + \frac{dL}{dt} \cdot i \quad (2)$$

где E - Э.Д.С источника, В; R - активное сопротивление, Ом; L - магнитная индуктивность, Гн; C - ёмкость импульсного конденсатора, ф.

Из формулы (2) получена скорость изменения тока:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left[E - \frac{1}{C} \int_0^t idt - iR - i \frac{dL}{dt} \right]. \quad (3)$$

Активное сопротивление разделяется на две части: внешнее сопротивление и сопротивление в катушке:

$$R = R_{внеш} + R_{катушки} = R_{внеш} + \frac{4\rho w D_{серед}}{d_{пров}^2}, \quad (4)$$

где ρ - плотность проволоки, г/мм³; $d_{пров}$ - диаметр проволоки, мм; $D_{серед}$ - средний диаметр катушки в катушке, мм.

Индуктивность и, соответственно, скорость изменения индуктивности описываются:

$$L = \frac{w^2}{R_{зазор} + R_{серед}} = \frac{w^2}{\frac{2\delta}{S_{зазор} \cdot \mu_0} + \frac{L_{серед}}{S_{серед} \cdot \mu_{серед}}}, \quad (5)$$

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{dL}{d\delta} \cdot U_{кл} = \frac{2w^2}{S_{зазор} \cdot \mu_T} \frac{U_{кл}}{\left(\frac{2\delta}{S_{зазор} \cdot \mu_T} + \frac{l_{серед}}{S_{серед} \cdot \mu_{серед}}\right)^2} \quad (6)$$

где $S_{зазор}$ - площадь сечения зазора, мм²; $S_{серед}$ - площадь сечения сердечника, мм²; $U_{кл}$ - скорость якоря электромагнита, м/с.

Уравнения движения якоря с клапаном описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} m_{сумм} \cdot \frac{dU_{кл}}{dt} &= F_{э} - F_{пруж} - F_{сопр} = \\ &= \frac{B^2 \cdot S_{зазор}}{\mu_T} - (F_{предв} + h \cdot c_{пруж}) - F_{сопр1} - F_{сопр2} \end{aligned} \quad (7)$$

где $F_{предв}$ - предварительное усилие пружины, Н; $c_{пруж}$ - жесткость пружины, Н/м; $m_{сумм}$ - масса движущихся деталей, кг; h - подъем клапана, мм; $F_{сопр1}$, $F_{сопр2}$ - гидравлическое сопротивление, метод определения которого описывается в статье [2].

Для текущего положения клапана рабочий зазор описывается следующим образом:

$$\delta = \delta_{мин} + (h_{макс} - h). \quad (8)$$

С учетом рассеяния магнитного потока между сердечником и корпусом дополняется следующее выражение:

$$S_{серед} \cdot B_{серед} = B_{зазор} \cdot S_{зазор} \cdot \sigma. \quad (9)$$

где σ - коэффициент рассеяния, $\sigma \approx 1,1$.

Соотношение магнитной проницаемости сердечника записывается следующим образом:

$$\mu_{серед} = \frac{B_{серед}}{H_{серед}}. \quad (10)$$

Согласно (1) - (10) можно рассчитывать нестационарный процесс работы БЭМП. В частности, в формуле (10) зависимость $B_{серед}$ от $H_{серед}$ описывает кривую намагничивания. В обычном случае для получения кривой намагничивания используется сплайн или полином [3]. Недостатки сплайна или

полинома заключаются в том, что его использование неудобно, а для его описания необходима эмпирическая информация, которая не является обычной справочной. Кроме того, формулы в виде сплайна и многочленного полинома не имеют возможности применения, ввиду отсутствия в справочной литературе необходимых экспериментальных данных по магнитомягким материалам.

В работе [4] предлагается аппроксимирующая формула в виде гиперболического тангенса для описания кривых намагничивания. Однако подбором единственного коэффициента не удастся добиться хорошего совпадения аппроксимирующей кривой с экспериментальными данными.

Аппроксимирующая формула статического магнитного гистерезиса должна отвечать следующим требованиям: достаточная универсальность для различных магнитомягких материалов; возможность явного вида при прямом и обратном счете; возможность использования при определении коэффициентов по известным справочным данным. Из большого числа исследованных форм аппроксимирующих зависимостей для описания кривых намагничивания (рис.1), в соответствии с перечисленными требованиями, выбрана аппроксимирующая формула следующего вида:

$$B = \frac{1}{a} \cdot \lg^c [H/H_c + 1], \quad (11)$$

где H_c - коэрцитивная сила, А/м; B - магнитная индукция магнитопровода, Тл; H - магнитная напряженность магнитопровода, А/м; a и c - коэффициенты уравнения.

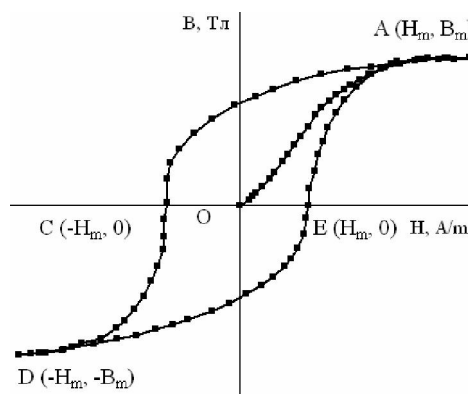


Рис. 1. Типовая петля статического гистерезиса материала

Тогда статический гистерезис описывается для характерных участков петли гистерезиса:

$$B = \begin{cases} \frac{1}{a} \cdot \lg^c [H/H_c + 2] & \text{для А-С} \\ \frac{-1}{a} \cdot \lg^c [-H/H_c] & \text{для С-D} \\ \frac{-1}{a} \cdot \lg^c [-H/H_c] & \text{для D-E} \\ \frac{1}{a} \cdot \lg^c [H/H_c] & \text{для E-A} \end{cases} \quad (12)$$

Возможны два случая различных данных о магнитных свойствах материалов.

1. Если имеются справочные или экспериментальные данные $B_m(H_m)$, H_c , B_r , то коэффициенты определяется:

$$C = \frac{\lg(B_m/B_r)}{\lg \left[\frac{\lg(H_m/H_c + 2)}{\lg 2} \right]}, \quad (13)$$

$$a = \frac{\lg^c(H_m/H_c)}{B_m}, \quad (14)$$

где B_m – индукция насыщения, Тл; H_m – напряженность, соответствующая B_m , А/м; H_c – коэрцитивная сила, А/м.

2. Если имеются следующие справочные или экспериментальные данные о материале: $B_m(H_m)$, H_c , μ_{\max} (максимальная магнитная проницаемость, Гн/м), то используется следующая формула:

$$B_m = \frac{1}{a} \lg^c \left(\frac{H_m}{H_c} \right). \quad (15)$$

Для оценки μ_{\max} вблизи уровня $B \rightarrow 0$, для кривых намагничивания и размагничивания в малом интервале ΔH ($\Delta H = 0,25H_c$) имеем:

$$\mu_{\max} = \frac{dB}{dH} \approx \frac{B}{\Delta H} = \lg^c \left(\frac{\Delta H}{H_c} \right) / (a \cdot \Delta H), \quad (16)$$

где: ΔH – искусственная малая величина.

Тогда из формул (15) и (16) окончательно получаем C и a :

$$C = \lg \left(\frac{B_m}{\mu_{\max} \cdot \Delta H} \right) / \lg \left(\frac{\lg(H_m/H_c)}{\lg(\frac{\Delta H}{H_c})} \right), \quad (17)$$

$$a = \frac{(\lg(H_m/H_c))^C}{B_m}. \quad (18)$$

Два варианта заданных справочных величин по каждому материалу могут быть приняты для нахождения коэффициентов C и a : при известных $B_m(H_m)$, H_c , B_r используются формулы (13) и (14), при заданных $B_m(H_m)$, H_c , μ_{\max} , используются формулы (17) и (18).

На рис.2 и 3 иллюстрировано, что расчет по предложенной формуле дает удовлетворяющее совпадение с экспериментальными данными.

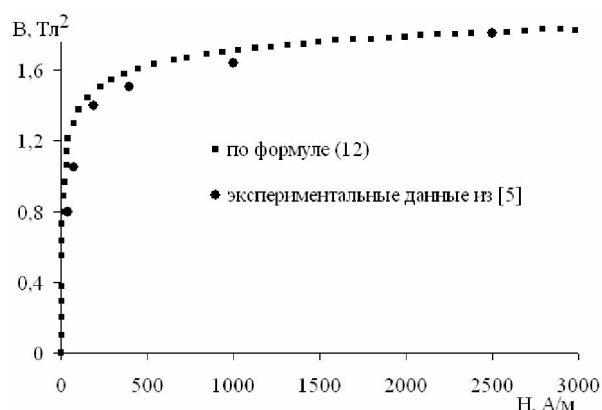


Рис. 2. Индукция B в функции напряженности H для стали 3423

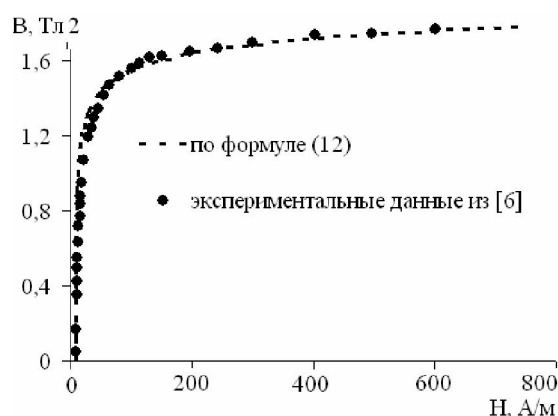


Рис. 3. Индукция B в функции напряженности H для стали 3414

Динамический гистерезис отличается от статического гистерезиса наличием эффектов, возникающих при быстром перемагничивании. Динамический гистерезис учитывает влияние на процесс намагничивания и потерь с магнитной вязкостью и с вихревыми токами. Простое и адекватное полупырическое описание важнейших нестационарных эффектов при перемагничивании дает А. И. Кадочников [6, 7]:

$$H(t) = H_{cm}(B) + \frac{1}{r} \exp\left(\alpha \frac{B^2}{B_m^2}\right) \frac{dB}{dt} + \frac{1}{3} \gamma_{eg} \delta_{mol}^2 \frac{dB}{dt}, \quad (19)$$

где $H_{cm}(B)$ – статический гистерезис, А/м; δ_{mol} – половина толщины ленты, мм; γ_{eg} – удельная электропроводность материала, 1/(Ом.м); r – коэффициент магнитной вязкости, характеризующий процесс динамического взаимодействия стенок доменов с препятствиями при перемагничивании; α – параметр в уравнении магнитной вязкости, зависящий от состава и технологии изготовления.

Вышеприведенные формулы встроены в программу «Впрыск» для расчета топливоподачи в

двигателях внутреннего сгорания, описывающую комплекс актуальных гидравлических, тепловых, механических и электромагнитных процессов [8].

Анализ полученных результатов

На рис.4 и 5 представлены схема электромагнитного привода и диаграмма управления напряжением питания для исследования. Выбрана электротехническая сталь 3414 в качестве материала сердечника. Из расчетов нестационарного процесса топливоподачи с электромагнитным приводом видно, что полученная зависимость индукции от напряженности по статическому и динамическому гистерезису заметно отличаются (рис. 6, 7).

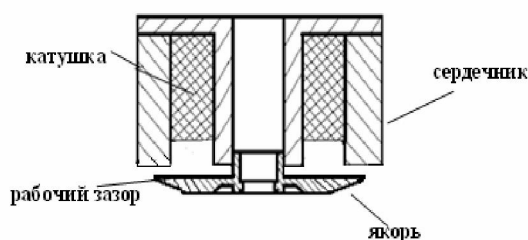


Рис.4. Схема электромагнитного привода

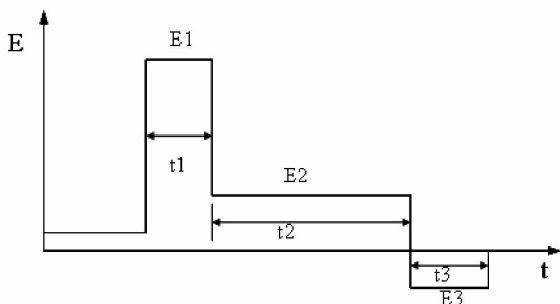


Рис.5. Диаграмма управления напряжением питания

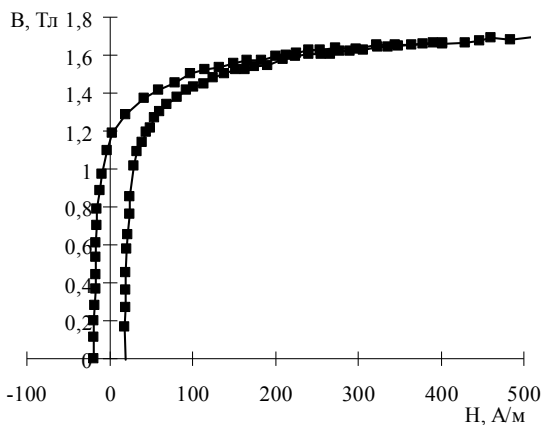


Рис.6. Индукция B в функции напряженности H по статическому гистерезису

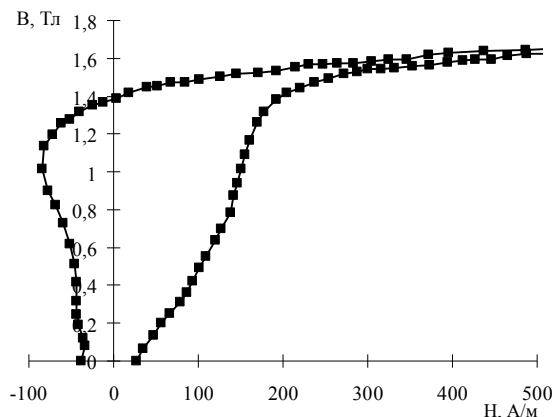


Рис.7. Индукция B в функции напряженности H по динамическому гистерезису

Это доказывает, что гистерезисные явления в быстротекающем процессе срабатывания управляющих клапанов с эквивалентной частотой порядка 1кГц, обусловлены не столько свойствами петли статического гистерезиса (свойствами материала), сколько специфичным нестационарным электромагнитным процессом. К сожалению, при использовании нешихтованных сердечников это значение еще более существенно из-за развития вихревых токов.

На рис. 8 и 9 иллюстрируется, что с учетом динамического гистерезиса в своем начале процесс развивается по-иному.

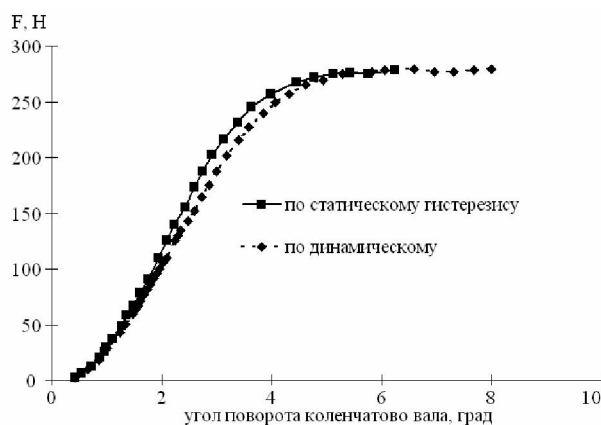


Рис.8. Электромагнитная сила в функции угла поворота кулачкового вала

В зависимости от сочетания действующих факторов предвидеть конечный результат трудно, в этом случае может быть полезной расчетная оптимизация процесса топливоподачи как сопряженной задачи о гидравлических механических электромагнитных процессах с использованием описанной методики.

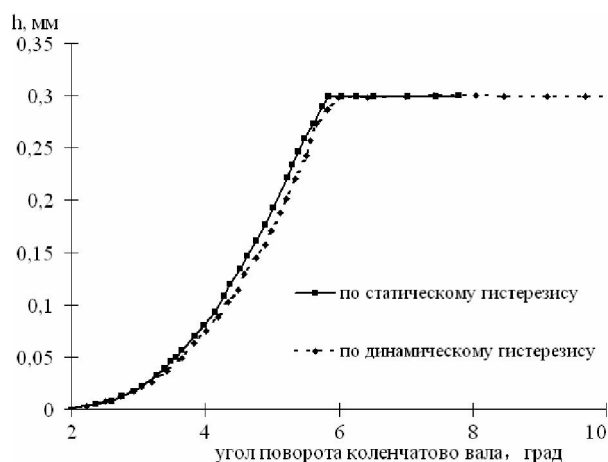


Рис.9. Подъем электромагнита в функции угла поворота кулачкового вала

Заключение

Предложенная формула описания петель статического гистерезиса обладает достаточной универсальностью для различных магнитомягких материалов, удобством использования при прямом и обратном счете, допускает определение только с помощью трех известных справочных характеристик статического гистерезиса.

Для популярных электротехнических сталей важным является не столько учет статического гистерезиса, сколько факта и параметров магнитного насыщения.

В условиях топливоподающей аппаратуры с быстродействующим электромагнитным приводом с учетом применения магнитомягких материалов магнитопровода целесообразен учет динамического гистерезиса, отражающего специфику нестационарных электромагнитных процессов: сопротивление перемагничиванию и вихревые токи.

Список литературы:

1. Иващенко Н.А. Моделирование процессов топливоподачи и проектирование топливной аппаратуры дизелей: учеб пособие / Н.А. Иващенко, В.А. Вагнер, Л.В. Грехов; АлГТУ, Барнаул–Москва., 2002.– 165с. 2. Грехов, Л.В. Расчет и проектирование гидравлически разгруженного

клапана дизельных топливных систем с электронным управлением / Л. В. Грехов, Н. Е. Борисенко, А. А. Меднов // Международная конференция «Двигатель –2007», посвященной 100– летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана : сб. науч. Тр. – 2007. –С279 –283. 3. Кадочников А.И. Нестандартный сплайн для аппроксимации кривых намагничивания и перемагничивания / А.И. Кадочников, Е. Б. Хан, Н.Б. Лобанова // Дефектоскопия. – 1992. –№11. –С. 75–81. 4. Врублевский А.Н. Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС / А.Н. Врублевский, А.Л. Григорьев, А.М. Бовда // Автомобильный транспорт. – 2006. – №19. –С. 138–143. 5. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы/ А.А. Преображенский/ –М., 1976. –334с. 6. Кадочников А.И. Динамические петли магнитного гистерезиса/ А.И. Кадочников/ – РФ, Екатеринбург, 2007. – 283с. 7. Кадочников А.И. Динамическое перемагничивание магнитопроводов из электро-технической стали под воздействием напряжения различной формы / А.И. Кадочников // Электричество. – 2003. –№9, – С. 62–66. 8. Грехов Л.В. Программный комплекс ВПРЫСК четвертого поколения / Л.В. Грехов, А.С. Кулешов, Ю.М. Фадеев, А.А. Кулешов // Межд. конф. Двигатель–2010, посвященной 180–летию МГТУ им. Н.Э. Баумана: сб. науч. тр. / РФ. Москва, 2010. – С. 319–322.

Bibliography (transliterated):

1. Ivawenko N.A. Modelirovanie processov toplivopodachi i projektirovanie toplivnoj apparatury dizelej: ucheb posobie / N.A. Ivawenko, V.A. Vagner, L.V. Grehov; AlGTU, Barnaul–Moskva.; 2002.– 165s. 2. Grehov, L.V. Raschet i projektirovanie gidravlicheski razgruzhennogo klapana dizel'nyh toplivnyh sistem s jelektronnym upravleniem / L. V. Grehov, N. E. Borisenko, A. A. Mednov // Mezhdunarodnaja konferencija «Dvigatel' –2007», po-svjawennoj 100– letiju shkoly dvigatelestroenija MGTU im. N.Je. Baumana : sb. nauch. Tr. – 2007. –S279 –283. 3. Kadochnikov A.I. Nestandartnyj splajn dlja approksimacii krivyh namagnichivanija i peremagnichivanija / A.I. Kadochnikov, E. B. Han, N.B. Lobanova // Defektoskopija. – 1992. –№11. –С. 75–81. 4. Vrublevskij A.N. Matema-tičeskaja model' bystrodejstvjuwego jelektromagnita dlja toplivnoj sistemy DVS / A.N. Vrublevskij, A.L. Grigor'ev, A.M. Bovda // Avtomobil'nyj transport. – 2006. – №19. –С. 138–143. 5. Preobrazhenskij A.A. Mag-nitnye materialy i jelementy/ A.A. Preobrazhenskij/ –М., 1976. –334s. 6. Kadochnikov A.I. Dinamicheskie pet-li magnitnogo gisterezisa/ A.I. Kadochnikov/ – RF, Ekaterinburg, 2007. – 283s. 7. Kadochnikov A.I. Dinamičeskoe peremagnichivanie magnitoprovodov iz jelektro-tehnicheskoj stali pod vozdejstviem naprjazhenija raz-lichnoj formy / A.I. Kadochnikov // Jelektrichestvo. –2003. –№9, – S. 62–66. 8. Grehov L.V. Pro-grammnyj kom-pleks VPRYSK četvertogo pokolenija / L.V. Grehov, A.S. Kulešov, Ju.M. Fadeev, A.A. Kulešov // Mezhd. konf. Dvigatel'–2010, posvjawennoj 180–letiju MGTU im. N.Je. Baumana: sb. nauch. tr. / RF. Moskva, 2010. – S. 319–322.