

Источник: Грехов Л.В., Атаманов В.И., Борисенко Н.Е., Потапов А.И., Малкин А.В., Рогов В.С., Фурман В.В. Расчет быстропротекающего электромагнитного процесса в приводе клапана дизельной системы с электронным управлением // Сб. науч. тр. по матер. Межд. конф. Двигатель-2007, посв. 100-летию школы двигател. МГТУ им. Н.Э. Баумана – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – С. 289-293.

Расчет быстропротекающего электромагнитного процесса в приводе клапана дизельной системы с электронным управлением

Грехов Л.В., Атаманов В.И., Борисенко Н.Е., Потапов А.И., Малкин А.В., Рогов В.С. (МГТУ им. Н.Э.Баумана)
Фурман В.В. (ООО “ППП Дизельавтоматика”)

С широким внедрением электронного управления работой дизелей вопросы проектирования быстродействующих электромагнитных приводов стал более, чем актуальным. Пока они остаются основными во всех новых системах: в насос-форсунках, распределительных, индивидуальных ТНВД, аккумуляторных системах [1].

Классические методы расчета и проектирования, созданные, очевидно, в докомпьютерную эпоху, непригодны ввиду несоответствия рассматриваемых простейших переходных процессов, используемым в практике законам управления [2]. Концепция предлагаемого способа отработки конструкции – оптимизация электромагнитного привода на базе математических моделей, описывающих прямую задачу, а не путем использования многочисленных, но недостоверных методик, созданных для задач синтеза. Такой подход обоснован и по другой важной причине: модель привода встраивается в общий гидродинамический расчет процесса подачи и, с одной стороны, базируется на однотипных уравнениях, удобно решаемых вместе с остальными, а с другой, позволяет, таким образом, решать сопряженную гидромеханическую и электромагнитную задачу о поведении управляющего клапана. Это важно, т.к. раздельное решение гидродинамических и электромагнитных задач приводит к получению не только разных, но полностью противоположных решений (например, уменьшение зазора между якорем и магнитопроводом увеличивает электромагнитную силу, повышая быстродействие привода, но увеличивает вязкое демпфирование растекающегося топлива, уменьшая быстродействие).

Таким образом, предлагаемая методика предлагает отказаться от известных методов, основанных на аналитических (т.е. упрощенных) решениях, а использовать прямое интегрирование с конечным шагом по времени исходных дифференциальных уравнений в составе многочисленных иных уравнений системы граничных условий гидродинамического расчета.

Предложенная методика полностью пригодна для приводов бензиновых систем или иных технических приложений, если в ней возникнет необходимость (при проектировании бензиновых систем используются более простые подходы).

Для проведения расчета электромагнитного привода используются следующие начальные условия:

$$t=0, I=0, dI/dt=0, dL/dt=0, h=0, V=0, F_{\text{сопр}}=0, L = \frac{w^2 S_{\delta} \mu_0}{2(\delta_{\text{min}} + h_{\text{max}})},$$

где t - время, с; I - сила тока, А; δ - величина воздушного (топливного) зазора, м; L - индуктивность, Гн; h - ход клапана, м; V - скорость якоря, м/с; $F_{\text{сопр}}$ - сила гидродинамического сопротивления в зазоре, Н; S_{δ} - площадь сечения магнитопровода (в зазоре), м²; w - число витков.

Будем рассматривать, например, работу популярного привода с торцевым якорем (рис. 1), достаточно общую диаграмму управления электромагнитом в нестационарном процессе, в частности, типовую диаграмму (рис. 2) с 4 характерными участками прикладываемой источниками разности потенциалов E продолжительностью каждого $\tau_1 \dots \tau_4$. Тогда время окончания каждого участка $t_1 = \tau_1$, $t_2 = \tau_2 + t_1$, $t_3 = \tau_3 + t_2$, $t_4 = \tau_4 + t_3$.

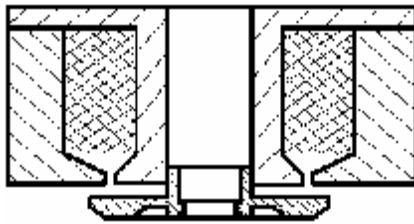
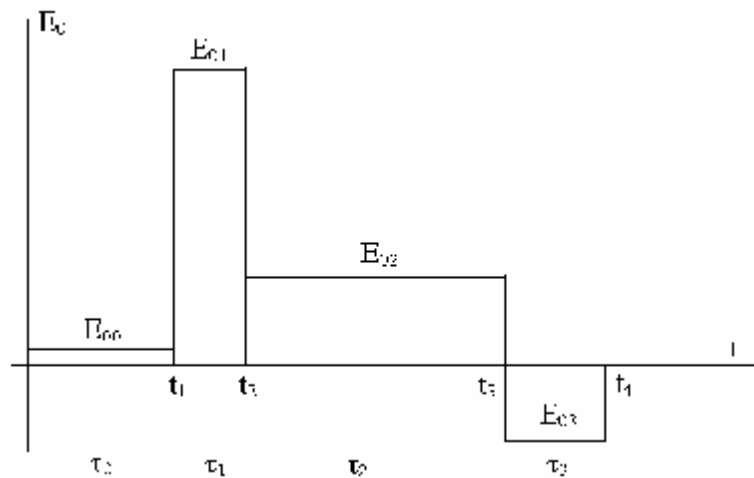


Рис. 1. Эскиз электромагнитного привода

Рис. 2. Типовая диаграмма напряжений питания электромагнита



Так как зазоры одинаковы, площади полюсов для максимальной эффективности привода должны быть также равны друг другу:

$$S_{\delta 1} = S_{\delta 2}, \quad S_{\delta 1} = \frac{\Pi}{4}(d_{\text{cp}}^2 - d_1^2), \quad S_{\delta 2} = \frac{\Pi}{4}(d_{\text{я}}^2 - d_{\text{cp}}^2).$$

Нахождение магнитной индукции в зазоре B_{δ} производится с учетом первой оценки, в качестве которой используется ее значение на предыдущем шаге. В дальнейшем применена итерационная процедура. С учетом двух зазоров, разрывающих магнитопровод, намагничивающая сила равна:

$$B_{\delta} = \frac{I \cdot w}{\frac{2 \cdot \delta}{\mu_0} + k_{\text{ст}} \frac{H_{\text{ст}} \cdot l_{\text{ст}}}{B_{\text{ст}}}}$$

Распространенный прием при расчете электромагнитов – допущение о доминирующем сопротивлении магнитному потоку – позволяет существенно упростить процесс, обойтись без итерационных вычислений и интерполяций свойств материала магнитопровода. В этом упрощенном случае в приведенных формулах будем полагать коэффициент влияния магнитопровода $k_{\text{ст}}=0$. Это означает, что напряженность магнитного поля H локализована в зазоре, но не в стали, т.е. $H=H_{\text{зав}}$. Для этого случая:

$$I \cdot w = 2 \cdot \delta \cdot H_{\text{зав}} + H_{\text{ст}} \cdot l_{\text{ст}} \approx 2 \cdot \delta \cdot H_{\text{зав}} ; \quad B_{\delta} = \frac{I \cdot w \cdot \mu_0}{2 \cdot \delta} .$$

Последний прием нельзя использовать при малых зазорах, длинных узких магнитопроводах и, особенно при магнитном насыщении стали.

Зазор у якоря привода клапана с текущим подъемом h :

$$\delta = \delta_{\text{min}} + (h_{\text{max}} - h) .$$

При проектировании электромагнитов Iw предлагается назначать с запасом 1,7. Магнитная проницаемость диамагнетика – топлива:

$$\mu_{\delta} = \mu_{\text{отн}} \cdot \mu_0 = 0,999992 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Генри}}{\text{М}} = \mu_0 .$$

Сложнее использовать и оценивать характеристику намагничивания материала магнитопровода:

$$\mu_{\text{ст}} = \frac{B_{\text{ст}}}{H_{\text{ст}}} = f(H_{\text{ст}})$$

Индукция в зазоре B_{δ} связана с магнитной индукцией в магнитопроводе $B_{\text{ст}}$ с учетом утечки потока через паразитный зазор $\delta_{\text{пар}}$ и поток рассеяния между сердечником и корпусом (коэффициент рассеяния $S = 1.1$):

$$S_{\text{ст}} = \frac{B_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot \sigma}{B_{\text{ст}}} .$$

Для решения уравнения для силы тока в нестационарном процессе рассчитывается индуктивность привода и его производная. Соответственно в основном варианте расчета ($k_{\text{ст}}=1$) и в упрощенном ($k_{\text{ст}}=0$) имеем:

$$L = \frac{w^2}{\frac{2 \cdot \delta}{S_{\delta} \cdot \mu_0} + k_{\text{ст}} \frac{H_{\text{ст}} \cdot l_{\text{ст}}}{S_{\text{ст}} \cdot B_{\text{ст}}}} ; \quad L = \frac{w^2 S_{\delta} \mu_0}{2(\delta_{\text{min}} + h)} ; \quad \frac{dL}{dt} = - \frac{dL}{d\delta} \cdot V$$

$$\frac{dL}{d\delta} = -\frac{2w^2}{S_\delta \cdot \mu_0} \cdot \frac{1}{\left[\frac{2 \cdot \delta}{S_\delta \cdot \mu_0} + k_{ст} \frac{H_{ст} \cdot l_{ст}}{S_{ст} \cdot B_{ст}} \right]^2}; \quad \frac{dL}{d\delta} = -\frac{w^2}{2} \cdot \frac{S_\delta \cdot \mu_0}{[\delta_{\min} + h]^2}.$$

Определение мгновенной силы тока в сложном нестационарном процессе при управлении клапанами ТПА производится с учетом активного сопротивления цепи:

$$R = R_{\text{внешн}} + R_{\text{катуш}}, \quad R_{\text{катуш}} = 4\rho w D_{\text{средн}} d_{\text{пров}}^{-2}.$$

Для меди: $\rho = 17,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2/\text{м}$, $\rho_t = \rho_t \cdot (1 + \alpha \cdot t)$, $\alpha = 0,004 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$. Объем катушки обычно имеет коэффициент заполнения катушки $K_{зк} = 0.5$.

Интеграл в уравнении тока для оценки разрядки конденсатора:

$$\text{Int} = \frac{1}{C_0} \int_0^t I dt.$$

Тогда численное решение уравнения тока в произвольном нестационарном электромагнитномеханическом процессе:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} \cdot \left[\left(E_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t I dt \right) - R \cdot I - I \cdot \frac{dL}{dt} \right].$$

Уравнение для тока записано с учетом возможности питания от импульсного конденсатора, обычно используемого для форсирующего импульса. Если используется источник постоянного тока, можно считать емкость $C \rightarrow \infty$ или просто изъять интеграл, отражающий разряд конденсатора.

Сила электромагнитного привода, согласно формуле Максвелла,

создаваемая в двух зазорах: $\frac{1}{2} F_{\text{эмн}} = \frac{B_\delta^2 S_\delta}{2\mu_0}$, тогда реально:

$$F_{\text{эмн}} = \frac{B_\delta^2 S_\delta}{\mu_0 \sqrt{k_{\text{вихр}}}},$$

где $k_{\text{вихр}}$ – коэффициент замедления срабатывания привода за счет действия вихревых токов. Для периода страгивания и подъема клапана его для характерных условий ТПА предлагается оценивать равным 1,2 (для участка стабилизации – 1,0).

Определенная сила электромагнитного привода используется в при решении уравнения движения клапана:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m_\Sigma} \cdot [F_{\text{эмн}} - F_{\text{пруж}} - F_{\text{демпф}} - F_{\text{гидродин}}].$$

Гидродинамическая часть задачи о движении клапана рассматривается в другой статье этого сборника.

На основании полученного алгоритма рассчитывается сила электромагнитного привода быстродействующих клапанов. Для упрощенных оценок можно игнорировать магнитное сопротивление магнитопровода.

Некоторые результаты расчетного анализа электромагнита, представленные ниже, относятся к расчету процесса без магнитного насыщения стали применительно к управляющему разгруженному клапану индивидуального ТНВД тепловозного дизеля.

Существует оптимальная индуктивность привода, обеспечивающая наилучшее быстродействие клапана: при ее малом значении мала сила, при большом – медленно растет ток (рис. 3).

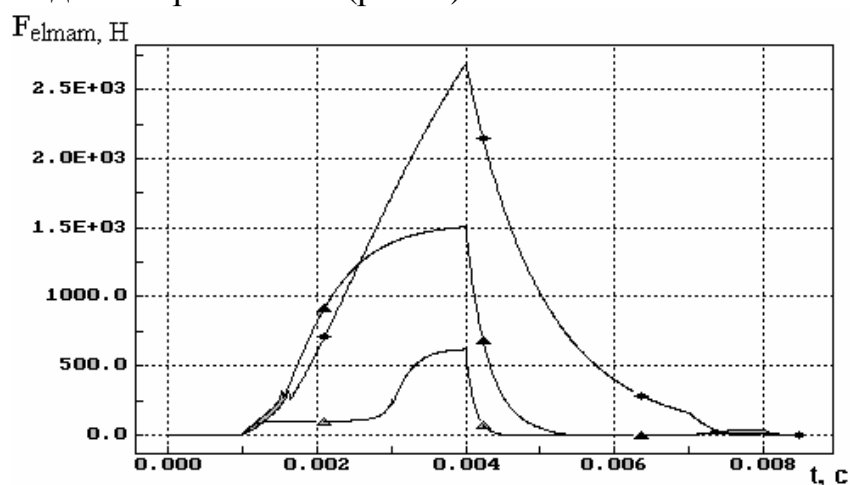


Рис. 3. Электромагнитная сила в функции времени при обмотке катушки с числом витков, равным 30 (\triangle), 50 (\blacktriangle) и 100 (\blackstar).

Омическое сопротивление цепи всегда ухудшает характеристики привода (рис. 4).

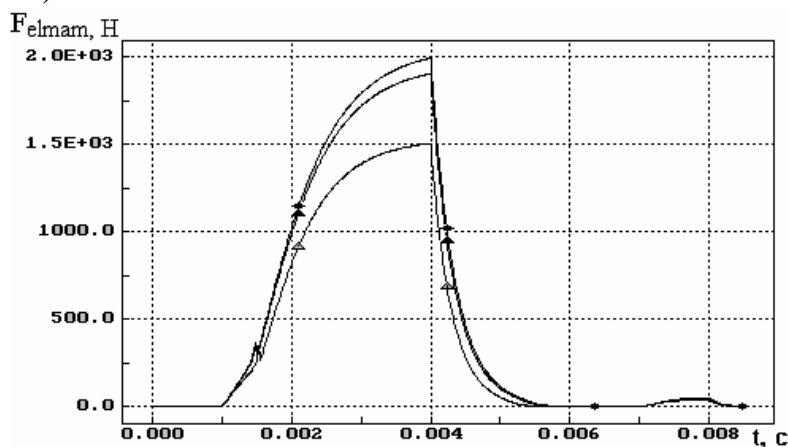


Рис. 4. Электромагнитная сила в функции времени при диаметрах провода катушки 0,5 (\triangle), 1 (\blacktriangle) и 1,5 (\blackstar) мм

Напряжение зарядки импульсного конденсатора для осуществления форсажа всегда увеличивает силу (рис. 5). Этот вывод остается справедливым и при магнитном насыщении стали: не столько за счет увеличения амплитуды тока, сколько за счет увеличения крутизны его нарастания в начале процесса.

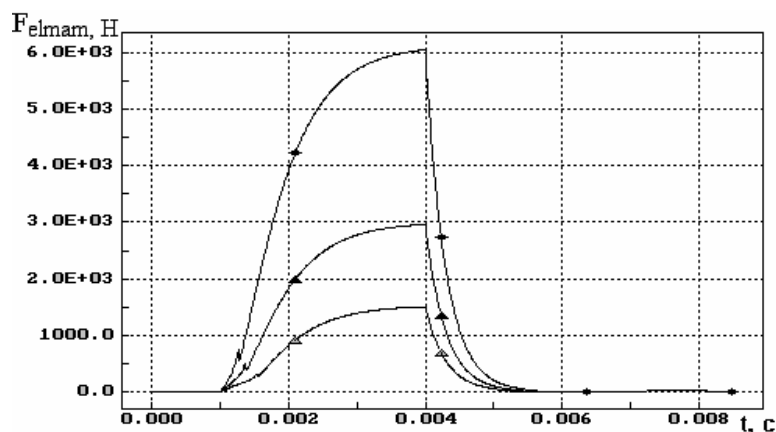


Рис. 5. Зависимость электромагнитной силы от времени при напряжении на форсажном участке 50 (△), 70 (▲) и 100 (✱) В

Как известно, размагничивающий импульс позволяет быстро снизить электромагнитную силу до нуля, но чтобы достигнуть этого результата, он также должен быть оптимизирован. На рис. 6 показано, как излишняя амплитуда (то же - и продолжительность) отрицательного импульса может приводить к обратному эффекту.

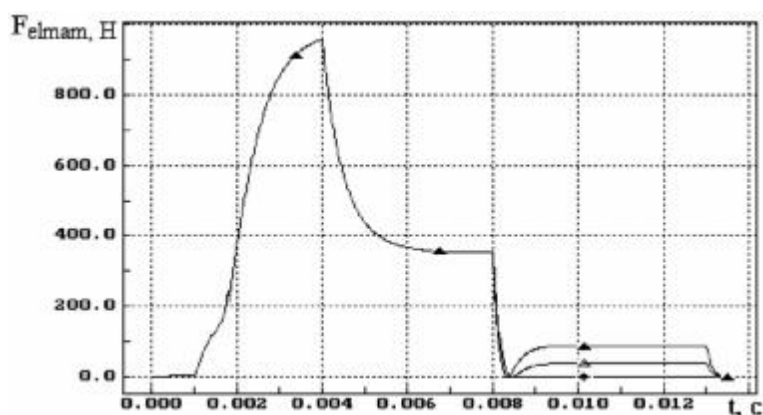


Рис. 6. Величина электромагнитной силы обратной полярности по времени при напряжении на участке размагничивания (▲)-30; (△)-20 и (✱)-10 В

Разработанная программа расчета привода позволяет его оптимизировать, добиваясь максимального быстрогодействия и нужных номинальных параметров. В составе программного комплекса Впрыск имеется возможность оптимизации всей ТПА.

Литература:

1. Грехов Л.В, Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелем: Учебник для вузов.- Москва: Изд-во Легион-Автодата, 2005, илл. – 344 с.

2. Сливинская А.Г., Гордон А.В. Электромагниты постоянного тока, М: Госэнергоиздат, 1978, 340 с.