

Михаил Митин, Дмитрий Соснин (г. Москва)

## Расчет тяговой силы электромагнита газораспределительного клапана ДВС

Чтобы определить тяговую силу  $F_T$  электромагнита, работающего в качестве приводного механизма в газораспределительном клапане поршневого двигателя, составим энергетический баланс для выбранной конструктивной модели электромагнитного клапана (рис. 1).

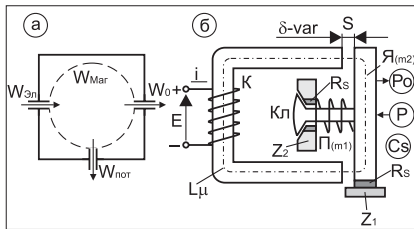


Рис. 1. Каноническая (а) и конструктивная (б) модель ЭМ-привода:

$W_{эл}$  — входная электрическая энергия;  $W_0$  — выходная полезная механическая энергия;  $W_{пот}$  — обобщенная энергия потерь;  $W_{маг}$  — магнитная энергия связи в электромагнито-механическом преобразователе;  $S$  — величина хода клапана (рабочий воздушный зазор  $\delta_0$ );  $\Pi$  — возвратная запорная пружина;  $K$  — намагничивающая катушка;  $i$  — ток в катушке  $K$ ;  $Kл$  — газораспределительный клапан;  $F_T$  — тяговая сила электромагнита;  $L_m$  — магнитопровод;  $Я$  — ярлык;  $Z_1$  — опора 1 (направляющая втулка клапана);  $Z_2$  — опора 2 (фаска посадочного седла клапана);  $R_s$  — сопротивление вязкого трения;  $C_s$  — эластичность пружины  $\Pi$ ;  $P_0$  — внешние статические силы

Энергетический баланс приводного устройства отображает закон сохранения энергии и в общем виде может быть записан как  $W_{вх} = W_{вых} + W_{пот}$ .

В случае электромагнитного привода (ЭМ-привода) входная энергия  $W_{вх}$  — это полная электрическая энергия  $W_{эл}$ , потребляемая ЭМ-приводом из бортовой сети автомобиля, а выходная энергия  $W_{вых}$  — это выходная механическая энергия  $W_0$ , затраченная на полезное перемещение (открытие) газораспределительного клапана (ГР-клапана). Потери энергии  $W_{пот}$  в ЭМ-приводе складываются из активных потерь в омических сопротивлениях  $W_R$ ,

потерь в магнитопроводе  $W_\mu$ , механических потерь на трение и демпфирование в подвижных частях  $W_d$ , потерь, связанных с накоплением электрической энергии в электростатическом поле системы  $W_c$ , а также из реактивных затрат энергии на образование магнитного поля токопроводящей катушки  $W_L$ , и реактивных затрат на преобразование потенциальной энергии подвижных масс привода в кинетическую энергию их движения  $W_m$ . Тогда энергетический баланс ЭМ-привода можно представить так:

$$W_{эл} = W_0 + W_R + W_\mu + W_d + W_c + W_L + W_C + W_m. \quad (1)$$

На основании формулы (1) построена диаграмма (рис. 2) для ЭМ-клапана, которая наглядно показывает распределение энергетических потоков в ЭМ-приводе для ГР-клапана с возвратной (запорной) пружиной.

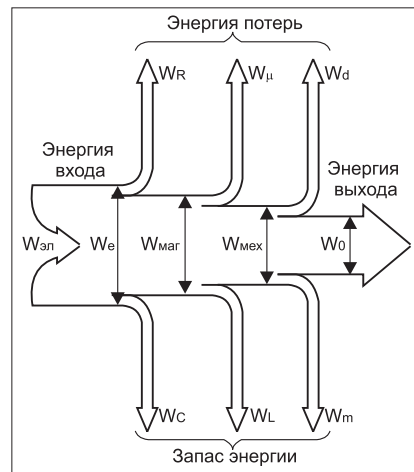


Рис. 2. Диаграмма энергетического баланса ЭМ-клапана

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

$$W_e = W_L + W_{мех}. \quad (2)$$

Для случая движения якоря электромагнита величина  $W_e$  может быть найдена как [2]:

$$W_e = \int_0^t e i dt = \int_0^t \frac{d\psi}{dt} \cdot i dt = \int_0^\psi i(\psi, S) d\psi. \quad (3)$$

Здесь  $e = \frac{d\psi}{dt}$  — разность потенциалов, компенсирующая противо-

ЭДС, наводимую в обмотке намагничивающей катушки при изменении потокоцепления  $\psi$ ;  $i = i(\psi, \delta)$  — ток в катушке, определяемый потокоцеплением  $\psi$  и переменным воздушным зазором  $\delta = S$  в магнитопроводе.

Выражение (3) описывает количество полезной электрической энергии, забираемой из бортовой сети автомобиля при перемещении газораспределительного клапана от  $S = \delta_0$  до  $S = 0$ .

С использованием энергетического баланса в электромагнитном приводе можно выполнить расчет электромагнитной тяговой силы  $F_T$ , обеспечивающей требуемое перемещение якоря следующим образом.

Если предположить малое перемещение якоря из положения  $S$  на величину  $\Delta S$ , то из (2) вытекает, что:

$$\Delta W_e = \Delta W_L + \Delta W_{мех}. \quad (4)$$

Приращение механической энергии  $\Delta W_{мех}$  можно представить как:

$$\Delta W_{мех} = P_{cp} \cdot \Delta S, \quad (5)$$

где  $P_{cp}$  — средняя механическая сила, обеспечивающая перемещение якоря на малом пути  $\Delta S$ .

Тогда из (4) с учетом (5) следует:

$$P_{cp} = \frac{\Delta W_{мех}}{\Delta S} = \frac{\Delta W_e}{\Delta S} - \frac{\Delta W_L}{\Delta S}. \quad (6)$$

Если  $\Delta S$  стремится к нулю ( $\Delta S \rightarrow 0$ ), то  $P_{cp}$  стремится к силе  $P$ , соответствующей положению якоря в текущей точке на пути  $S$  ( $P_{cp} \rightarrow P$ ) и справедливы следующие уравнения:

$$P = P_{cp} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta W_{mex}}{\Delta S} = \frac{dW_{mex}}{dS} \text{ и } P = \frac{dW_e}{dS} - \frac{dW_L}{dS}. \quad (7)$$

Выберем в качестве независимых переменных потокосцепление  $\psi(t)$  и путь  $S(t)$ . Тогда, согласно (3)

$$dW_e = i(\psi, S) d\psi, \quad (8)$$

а частная производная

$$dW_L = \frac{\partial W_L}{\partial \psi} d\psi + \frac{\partial W_L}{\partial S} dS. \quad (9)$$

Подставив (9) и (8) в (7), после преобразования получим:

$$\left[ P + \frac{\partial W_L}{\partial S} \right] \frac{dS}{dt} = \left[ i(\psi, S) - \frac{\partial W_L}{\partial \psi} \right] \frac{d\psi}{dt}. \quad (10)$$

Так как переменные  $\psi$  и  $S$  независимые, то уравнение (10) выполнимо только при следующих условиях:

$$i = + \frac{\partial W_L(\psi, S)}{\partial \psi}, \quad P = - \frac{\partial W_L(\psi, S)}{\partial S}. \quad (11)$$

В формуле (11) величина  $W_L$  — это силовая функция энергии, запасенной в магнитном поле системы (в основном в токопроводящей катушке), которая согласно [4] равна:

$$W_L = \int_0^\psi i(\psi, S) d\psi. \quad (12)$$

Тогда в соответствии с (11) и (12) имеем:

$$P = - \int_0^\psi \frac{\partial i(\psi, S)}{\partial S} d\psi. \quad (13)$$

Выражение (13) определяет механическую силу, которую надо приложить к якорю, чтобы переместить его на расстояние  $\partial S$ . В рассматриваемом электромагнитном клапане противоположно действующая тяговая сила электромагнита  $F_T$  должна быть не менее механической силы перемещения  $P$ . И тогда можно принять, что

$$F_T = \int_0^\psi \frac{\partial i(\psi, S)}{\partial S} d\psi. \quad (14)$$

Уравнение (14) получено с учетом энергетических закономерностей, имеющих место в одноконтурных энергопроводящих цепях ЭМ-клапана. При расчете сложных (многоконтурных) цепей тяговая сила электромагнита может быть определена с применением принципов вариационного исчисления [1]. Разработанная частная теория вариационного исчисления [2, 3], ориентированная на анализ и оптимальное проектирование устройств, работающих на тяговых смыкающихся электромагнитах, позволяет составлять универсальные обобщающие уравнения, которые описывают взаимосвязь электрических, магнитных и размерных параметров таких устройств. Согласно [3] для расчета тяговой силы  $F_T$  в двухконтурной цепи клапанного электромагнита, конструк-

тивная модель которого описана в [5], составляется схема-аналог (рис. 3).

В электрической цепи схемы-аналога (рис. 3,а) в качестве независимых переменных  $q_k$  и  $\dot{q}_k$  приняты электрический заряд  $q_1$  и его производная  $\dot{q}_1 = i_1$  — ток в намагничивающей катушке. В механической цепи схемы (рис. 3,б) в качестве независимых переменных  $S_1$  якоря и сжатие  $S_2$  клапанной пружины. Тогда контурные токи в выходной цепи схемы-аналога можно представить как скорости  $\dot{S}_1$  и  $\dot{S}_2$ .

Условие равновесия для исследуемой системы в общем виде можно представить уравнением движения Эйлера [1]:

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

где  $L(z)$  — силовая функция Лагранжа, которая для неконсервативной системы (системы с предысторией и потерями) определяется как [2]:

$$L(z) = (T^* + T_D^*) - (V + V_0).$$

При описании схемы-аналога силовой функцией Лагранжа, ее слагаемые это:

– обобщенная консервативная кинетическая коэнергия\*

$$T^* = T_e^* + T_m^* = \int_0^{i_1} \psi_1(i_1, S_1) di + \frac{1}{2} m_1 \dot{S}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{S}_2^2;$$

– обобщенная неконсервативная кинетическая коэнергия

$$T_D^* = T_{De}^* + T_{Dm}^* = \frac{1}{2} R_{e1} \int_0^t i_1^2(t) dt + \frac{1}{2} R_{s1} \int_0^t \dot{S}_1^2(t) dt + \frac{1}{2} R_{s2} \int_0^t \dot{S}_2^2(t) dt;$$

– обобщенная консервативная потенциальная энергия

\* Коэнергия — фиктивная кинетическая энергия, условно равная энергии статического магнитного поля [2].

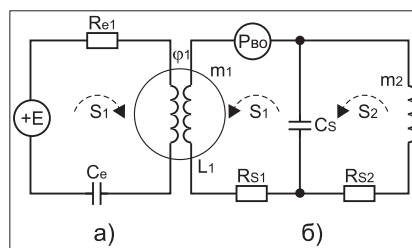


Рис.3. Расчетная схема-аналог ЭМ-клапана:

а — электрическое звено с потерями; б — механическое звено с потерями;  $R_{e1}$  — омическое сопротивление катушки и источника  $E$ ;  $E$  — внешняя э.д.с.;  $L_1$  — индуктивность катушки;  $C_s$  — междувитковая емкость катушки;  $m_1$  — приведенная масса подвижных частей;  $m_2$  — приведенная масса клапанной пружины;  $C_s$  — эластичность клапанной пружины;  $P_{в0}$  — сила внешнего воздействия;  $R_{s1}, R_{s2}$  — коэффициенты вязкого трения;  $\psi_1$  — потокосцепление, отображающее связь электрической и механической инерционностей

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

– обобщенная неконсервативная потенциальная энергия

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

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

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

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

$$\int_0^{i_1} \frac{\partial \psi_1}{\partial S_1} di_1 = \frac{S_1 - S_2}{C_s} + P_{bo} + m_1 \ddot{S}_1 + R_{S1} \dot{S}_1. \quad (15)$$

Правая часть уравнения (15) представляет собой сумму внешних сил  $P_0$ , которую должна преодолевать тяговая сила  $F_T$  электромагнита, тогда

$$F_T = P_0 = \int_0^{i_1} \frac{\partial \psi}{\partial S_1} di = \int_0^{\psi} \frac{\partial i}{\partial S_1} d\psi. \quad (16)$$

Выражение (16) для тяговой силы электромагнита, выведенное с применением уравнения Эйлера и функции Лагранжа, идентично выражению (13), полученному из энергетического баланса электро-

магнитного привода ГР-клапана. Если теперь допустить, что индуктивность системы  $L(S)$  (катушки и подвижного звена  $m1$ ) не зависит от тока  $i1$  и пренебречь насыщением стали, то формулу (16) для расчета тяговой силы ФТ электромагнита можно выразить через намагничивающую силу  $f = iw$  тоководящей катушки, что крайне важно для практических расчетов:

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

В формуле (17)  $iL(S) = \psi$ , ( $i = i_1$ ,  $S = S_1$ ), где  $L(S) = \omega^2 \cdot G(S)$  — индуктивность системы,  $\omega$  — число витков катушки,  $G(S)$  — приведенная проводимость системы.

В общем случае, когда в реальной электромагнитной системе имеется несколько воздушных зазоров, тяговая сила электромагнита ФТ с достаточной точностью может быть определена как сумма сил, проявляющих себя за счет изменения проводимостей в  $n$ -переменных воздушных зазорах

$$F_T = \sum_{k=1}^n F_{Tk} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n f_k^2 \frac{dG_k}{dS_k}. \quad (18)$$

Для дальнейших расчетов переменный рабочий воздушный зазор  $\delta_0$  выделим как основной, а тяго-

вую силу  $F_{TP}$  в нем примем за базисную; установившееся значение намагничивающей силы электромагнита обозначим как  $F$ , а в основном воздушном зазоре как  $F_p$ . Для учета падения намагничивающей силы в нерабочих воздушных зазорах  $\delta_{np}$  введем корректирующую функцию  $\varphi \leq 1$ , тогда  $F_p = \varphi \cdot F$ . После соответствующих подстановок в формулу (18) получено выражение для тяговой силы электромагнита в рабочем воздушном зазоре

$$F_{TP} = \frac{1}{2} F_p^2 \left| \frac{dG_0}{d\delta_0} \right| = \frac{1}{2} \varphi^2 F^2 \left| \frac{dG_0}{d\delta_0} \right|,$$

где  $G_0$  — полная магнитная проводимость рабочего воздушного зазора  $\delta_0$ .

### Литература

1. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1969, 296 с.
2. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974, 392 с.
3. Соснин Д.А. Автоматизированный электромагнитный привод газораспределительных клапанов поршневого ДВС. Кандидатская диссертация. МАДИ (ГТУ), 2005.
4. Буль Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М.: Энергия. 1977.
5. Митин М.В., Соснин Д.А. Анализ работы электромагнита с возвратной пружиной по частному циклу перемагничивания. «Ремонт & Сервис», 2007, № 2.