ВЫВОДЫ

1. Преобразователь постоянного тока как объект системы автоматического управления имеет ярко выраженные резонансные свойства. Для преобразователя повышающего типа частота резонанса зависит от скважности управляющих сигналов.

2. Применение внутренней обратной связи по току индуктивности и обратной связи по выходному напряжению с ПИ-регулятором позволяет получить приемлемые показатели качества переходных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехнический справочник: В 3 т. – Т. 3: В 2 кн. – Кн. 2: Использование электрической энергии / Под общ. ред. проф. И. Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 616 с.

2. Чети П. Проектирование ключевых источников электропитания: – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.

3. Middlebrook R. S., Cuk S. A general unified approach to modeling switching-converter power stages, in Proc // IEEE Power Electron. Specialist Conf., 1976, P. 18–34.

4. Mohan N. et al. Power Electronics Converters, Applications and Design. – New York: Wiley, 1989.

5. Tumerski R., VorperIan V., LeeF. C. Y., Baumann W. T. Nonlinear Modeling of the PWM Switch // IEEE Trans. On Power Electronics. – Vol. 4, № 2. – April 1989. – P. 225–233.

6. Мелешин В. И. Получение непрерывной линейной модели силовой части импульсного преобразователя как начальный этап проектирования его динамических свойств // Электричество. – 2002. – № 10. – С. 39–43.

7. Абдул Мажид Аль-Хатиб, Эль-Саббаг Маруан И., Петренко Ю. Н. Микропроцессорная система обеспечения максимальной выходной мощности солнечной батареи // Моделирование интеллектуальных процессов проектирования, производства и управления: Сб. науч. тр. / Под ред. В. И. Махнача, Е. В. Владимирова. – Мн.: Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, 2003. – 234 с.

Представлена кафедрой
электропривода и автоматизации
промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 20.01.2005

УДК 621.318.38

ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ В ОДНОЙ СХЕМЕ, УСКОРЯЮЩЕЙ СРАБАТЫВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

СТОЯНОВА С. С.

Университет «Проф., д-р Асен Златаров» (Болгария)

Известно [1, 2], что срабатывание электромагнита может быть ускорено посредством схемы, изображенной на рис. 1. Анализ свидетельствует о том, что теоретически при одновременном повышении величины питающего напряжения U, сопротивления R и емкости C ускорение может нарастать неограниченно без возникновения проблем с нагревом обмотки. Однако ограничение возникает из-за недопустимого нарастания конечной скорости, с которой подвижная часть электромагнита достигает ограничителя. Увеличенная конечная скорость резко повышает кинетическую энергию удара в ограничитель, что приводит к изнашиванию всей конструкции. Применение эластичных ограничителей может снизить это вредное воздействие, но связано с другими недостатками, например с нарастанием времени для возврата электромагнита. Такая схема может найти применение в релейных защитах.

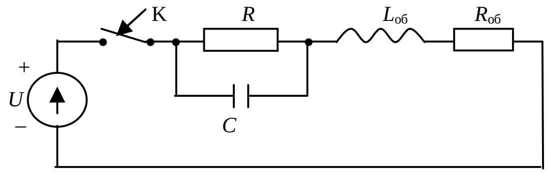

Рис. 1. Схема для ускорения срабатывания электромагнита

В настоящей статье ставится задача определить такие величины U, R и C для данного электромагнита, чтобы конечная скорость $v_{кр}$ якоря не превосходила заданную допустимую скорость $v_{кр.д}$, и при этом время срабатывания электромагнита было бы минимально.

Поставленная задача – по существу вариационна. Во-первых, необходимо определить закон изменения электромагнитной силы F, действующей на якорь во времени так, чтобы удовлетворить заданным требованиям. Во-вторых, следует найти такие величины искомых параметров, чтобы реальная электромагнитная сила, изменяясь во времени, максимально приближалась к установленному оптимальному закону.

Решение первой части задачи весьма актуально. Оно показывает, что оптимальный закон изменения F во времени отвечает не абсолютному, а граничному максимуму, который получается в том случае, когда сила F имеет импульсный характер: $F = J\delta(t)$, где $\delta(t)$ – функция Дирака, а

$$J = \int_0^{\Delta t} F(t)dt = \int_0^{\infty} F(t)dt = Mv_{кр.д}\,, \tag{1}$$

где M – масса подвижной части, приведенной к точке приложения электромагнитной силы $F(t)$; $v_{кр.д} = v_{max}$ – максимальная скорость якоря электромагнита, полученная в конце интервала времени действия силового импульса. Под воздействием этой скорости якорь продолжает двигаться по инерции, постепенно замедляясь силой противодействия $F_c = F_{c0} + k_c x$. Здесь x – перемещение якоря от начального состояния. Скорость v_{max} должна быть такой, чтобы при $x = x_{max}$, т. е. при конечном состоянии якоря, скорость $v(x_{max}) = v_{кр.д}$.

Так как принято, что движение происходит без потерь, связь между v_{max} и $v_{кр.д}$ определяется законом сохранения энергии

$$Mv^2_{max} = 2[F_{c0} + k_c x_{max}]x_{max} + Mv^2_{кр.д}.$$

Приведенные зависимости получены в предположении, что можно пренебречь всеми механическими потерями при движении подвижной части, силами электромагнитного трения, потерями из-за токов Фуко и гистерезиса, а также что сила противодействия меняется по линейному закону

$$F_c = F_{c0} + kx,$$

и сила электромагнита, полученная установившимся током $I_{\min\ ср} = \dfrac{U}{R + R_{об}} =$

$= I_{\min ср}$, несколько больше для каждого x.

График зависимости идеальной электромагнитной силы от времени показан на рис. 2.

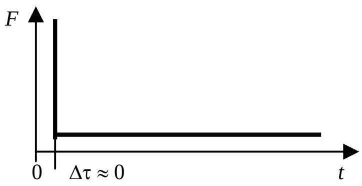

Рис. 2. Зависимость идеальной электромагнитной силы от времени $F = f(t)$

Реальная электромагнитная сила должна изменяться по закону, максимально близкому к идеальному (рис. 2). Основные требования таковы: ток, проходивший через обмотку электромагнита, должен иметь по возможности максимальную величину и как можно меньшую продолжительность. Минимальная продолжительность дает возможность упростить анализ, так как можно предположить, что при протекании электрического переходного процесса якорь проходит незначительную часть Δx перемещения $x_{\max}$; $\Delta x \approx 0$.

Упомянутые обстоятельства показывают, что при определении параметров U, R и C можно рассматривать классический переходный процесс с участием постоянной индуктивности обмотки электромагнита $L_{об}$ [3]. Применяется схема (рис. 1) при пренебрежении токов Фуко и гистерезиса. Так как в течение электрического переходного процесса якорь остается почти неподвижным, можно с достаточной точностью принять, что электромагнитная сила F пропорциональна квадрату тока

$$F = 0{,}5\left(\frac{dL}{dx}\right)_{x=0} i^2(t) = k_f i^2(t)\,,$$

где $k_f = \text{const}$.

Здесь L – часть индуктивности обмотки электромагнита $L_{об}$, связанная с магнитным потоком, который создает электромагнитную силу $L_{эм} = L + L_s$. Чтобы соответствие между идеальным и реальным случаями было более полным, необходимо импульс реальной силы вычислять на интервале времени, где электромагнитная сила больше силы противодействия $F_{c0} = k_f I^2_{\min ср}$. Интервал $\Delta t = t_2 - t_1$ находится в границах между двумя выравниваниями тока с током срабатывания якоря $I_{ср}$.

Отметим, что момент t_2 определяется с большой погрешностью, так как ток $i(t)$ очень плавно стремится к $I_{\min.ср}$. Однако эта погрешность компенсируется при учете импульса силы противодействия $J_c = F_{c0}(t_2 - t_1)$, который в дальнейшем вычитается из импульса электромагнитной силы (рис. 3).

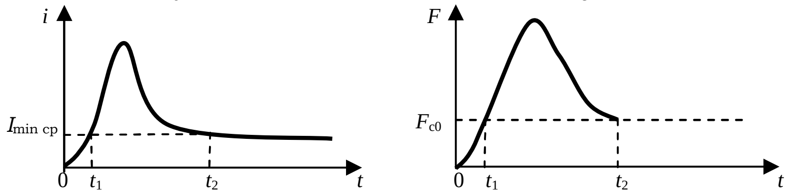

Рис. 3. а – $i = f(t)$; б – $F = f(t)$

В рассматриваемом случае формула (1) приобретает вид

$$\int_{t_1}^{t_2} k_f i^2(t)dt - F_{\text{с}0}(t_2 - t_1) = Mv_{\text{кр.д}} .$$

Для схемы на рис. 1 составляется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} i = \dfrac{q}{C}\dfrac{1}{R} + \dfrac{dq}{dt}; \\ U = \dfrac{q}{C} + R_{\text{об}}i + L_{\text{об}}\dfrac{di}{dt}, \end{cases} \tag{A}$$

где q – заряд конденсатора.

Ток $i(t)$ и его производная определяются из первого уравнения (А) и замещаются во втором

$$U = L_{\text{об}}\frac{d^2q}{dt^2} + (R_{\text{об}} + \frac{L_{\text{об}}}{RC})\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C}\left(1 + \frac{R_{\text{об}}}{R}\right).$$

Начальные условия: $q(0) = 0$ и $i(0) = 0$, что трансформируется в $\left(\dfrac{dq}{dt}\right)_{t=0} = 0.$

Условие критичного апериодичного режима

$$\left(R_{\text{об}} + \frac{L_{\text{об}}}{RC}\right)^2 = \frac{4L_{\text{об}}}{RC}(R + R_{\text{об}}) \cdot \tag{2}$$

Двукратный корень δ характеристического уравнения определяется двумя способами:

непосредственно из уравнения

$$\delta = \frac{R_{\text{об}} + \dfrac{L_{\text{об}}}{RC}}{2L_{\text{об}}}; \tag{3}$$

и с помощью (2)

$$\delta = \frac{\sqrt{\dfrac{4L_{\text{об}}}{RC}(R + R_{\text{об}})}}{2L_{\text{об}}} = \sqrt{\frac{R + R_{\text{об}}}{RCL_{\text{об}}}} . \tag{4}$$

Можно легко проверить, что решением дифференциального уравнения будет:

$$q = \frac{URC}{R + R_{\text{об}}}[1 - \text{e}^{-\delta t} - \delta t e^{-\delta t}].$$

С помощью первого уравнения системы (А) определяется ток в элекромагните

$$i = \frac{U}{R + R_{\text{об}}}[1 - \text{e}^{-\delta t} - \delta t e^{-\delta t}(1 - RC\delta)].$$

Вводятся безразмерные величины $x = \delta t$ и $\alpha = RC\delta$. Для $x < 1$ экспоненты разлагаются в степенной ряд, имея в виду только члены до x^2 включительно. С небольшой погрешностью получается

$$i = \frac{U}{R + R_{\text{об}}}[\alpha x - x^2(\alpha - 0{,}5)].$$

Величины для $x = x_1$ и $x = x_2$, при которых ток равен минимальному току срабатывания $\dfrac{U}{R + R_{\text{об}}}$, определяются как корни уравнения $\alpha x -$ $- (\alpha - 0{,}5)x^2 = 1$:

$$x_1 = x = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4\alpha + 2}}{2\alpha - 1}; \quad x_2 = x = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\alpha + 2}}{2\alpha - 1}.$$

Импульс электромагнитной силы определяется следующим образом:

$$J_f = \int_{t_1}^{t_2} k_f i^2(t)dt = \frac{k_f}{\delta}\int_{x_1}^{x_2} \frac{U^2}{(R + R_{об})^2}[x^2(\alpha - x\alpha + 0{,}5x)^2]dx =$$
$$= \frac{k_f I^2_{\min\,ср}}{\delta}\int_{x_1}^{x_2} x^2[\alpha - x(\alpha - 0{,}5)]^2 dx; \qquad (5)$$

$$J_f = k_f \frac{I^2_{\min\,ср}}{\delta}\bar{J};$$

$$\bar{J} = \int_{x_1}^{x_2} x^2[\alpha - x(\alpha - 0{,}5)]^2 dx.$$

Для упрощения вычислений формула (5) используется для α = 4…20 (рис. 4). По ординате (рис. 4а) отмечены величины $\bar{J}$ интеграла из последнего ряда, которые тоже безразмерны. При тех же α (4…20) по ординате (рис. 4б) отмечены величины $(x_1 - x_2)$.

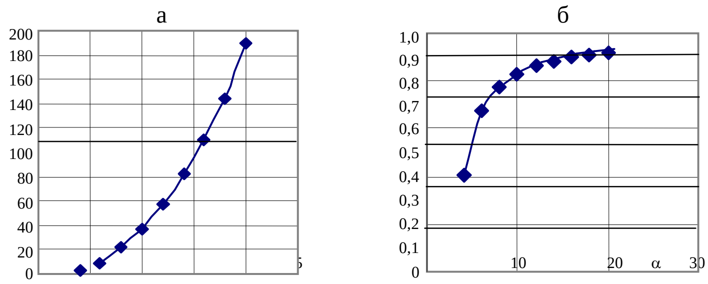

Рис. 4. а – $\bar{J} = f(\alpha)$; б – $(x_2 - x_1) = f(\alpha)$

Если известны все параметры электромагнита, то вычисления проводятся следующим способом.

Задаются разные величины постоянной времени $T = RC$. С помощью (4) вычисляется δ для каждого значения RC. Определяются $\alpha = \delta RC$. Для каждого значения α из рис. 4а учитывается соответствующая величина для $\bar{J}$. Находится импульс электромагнитной силы

$$J_f = k_f \frac{I^2_{\min\,ср}}{\delta}\bar{J}.$$

Затем из рис. 4б для каждого значения α определяется величина $(x_2 - x_1)$. Импульс силы противодействия в исходном состоянии

$$J_с = F_{с0}\frac{x_2 - x_1}{\delta}.$$

Так строится график $J_f - J_с = f(RC)$. Определяется величина RC, для которой $J_f - J_с = Mv_{\max}$ (рис. 1). При соответствующих величинах RC и δ из (4) вычисляются R и C.

Пример. Электромагнит действует на клапан с помощью системы рычагов. Исходные данные: постоянное напряжение U = 42 В; минимальный ток срабатывания $I_{\min ср}$ = 0,34 А; приведенная масса приводного механизма M = 13,9 кг; минимальная сила противодействия $F_{с\min}$ = 3,13 Н; максимальная сила противодействия $F_{с\max}$ = 23,2 Н; максимальное перемещение якоря $x_{\max}$ = 6,4 мм; время срабатывания $t_{ср}$ = 400 мс при номинальном токе; активное сопротивление обмотки $R_{об}$ = 120 Ом; индуктивность обмотки при максимальном воздушном зазоре $L_{об}$ = 1 Гн.

Если принять, что движение якоря равноускоренное, для максимальной скорости, с которой достигается конечное состояние якоря, получается

$$v_{кр.\max} = 2v_{ср} = 2\frac{x_{\max}}{t_{ср}} = 32 \text{ мм/с}.$$

Используя описанную процедуру, получаются следующие результаты: RC = 0,095 с; δ = 65,3 с$^{-1}$; α = 6,2; $\overline{J}$ = 10,6; J_f = 0,51 Н·с, продолжительность силового импульса равна ≈12 мс.

Из формулы (5) определяются: R = 385 Ом; C ≈ 250 мкФ; $U_{закр}$ =140 В. Графики движения без ускоряющей схемы 1 и с ускоряющей схемой 2 показаны на рис. 5.

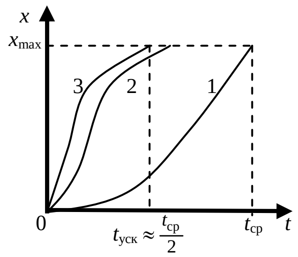

Рис. 5. Графики движения: 1 – без ускоряющей схемы; 2 – с ускоряющей схемой; 3 – идеальная схема

$$x_{\max} = \frac{1}{2}at^2_{ср}; \;\; v_{кр} = at_{ср};$$

$$t_{уск} \approx \frac{x_{\max}}{v_{кр}} = \frac{\frac{1}{2}at^2_{ср}}{at_{ср}} = \frac{1}{2}t_{ср}\,.$$

Видно, что при применении ускоряющей схемы время достижения конечного состояния уменьшается приблизительно в два раза.

ВЫВОДЫ

1. Предложена инженерная методика расчета ускорительных элементов схемы включения электромагнита с ограничением максимальной скорости якоря при минимальном времени срабатывания.

2. Результаты расчетов показывают, что применение данной схемы позволяет уменьшить время достижения конечного положения якоря электромагнита приблизительно в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. А л е к с а н д р о в А. К. Электрические аппараты. – Ч. I: Электромагнитные и тепловые проблемы. – София: ХЕРОН ПРЕС ООД, 2002. – С. 258–268.

2. А л е к с а н д р о в А. К. Электрические аппараты. – София: Изд-во технического ун-та, 1999. – С. 192–199.

3. Н и к и т е н к о А. Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. – М.: Высш. шк., 1983. – С. 62–91.

Поступила 25.06.2004