

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МАГНИТНЫХ, КОНТАКТНОПОДВИЖНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСИСТЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ

Ю. Т. ГУЗ

В статье описана возможность, которая позволяет не снимая корпуса реле и не нарушая герметичности электромагнитных изделий аналитически описать упругие свойства контактных элементов и возвратной пружины. Алгоритм решения базируется на анализе динамических свойств переходного процесса тока в обмотке исследуемого объекта.

Уравнение динамики электромагнитов клапанного типа (с поворотным якорем) в общем случае могут быть записаны так:

$$u = iR + d\psi/dt, \quad (1) \quad \psi = f(i, \phi), \quad (2)$$

$$J \frac{d^2\phi}{dt^2} + Q(i, \phi) \frac{d\phi}{dt} + M_{пр}(\phi) = M_s, \quad (3)$$

где u — мгновенное значение напряжения; R — полное омическое (активное) сопротивление всей цепи; J — момент инерции якоря; $Q(i, \phi)$ — коэффициент линейного (скоростного) трения, пропорциональный первой степени скорости. Этот коэффициент является в общем случае функцией двух переменных, а именно i и ϕ ; $M_{пр}(\phi)$ — противодействующий момент, являющийся функцией ϕ . Этот момент зависит от упругих свойств контактных пружин и возвратной пружины; t — текущее время.

Решение уравнений динамики электромагнитов обычно сводится к определению функций $i(t)$, $\psi(t)$ и $\phi(t)$ при заданном напряжении $u(t)$.

Задачу определения состояния контактной, подвижной, электрической и магнитной систем в условиях эксплуатации и ремонта целесообразно решать так, чтобы не нарушать герметичности пространства внутри корпуса реле. При таких условиях доступными для регистрации параметрами (без доработки конструкции реле специальными датчиками и измерительными устройствами) протекающих в реле динамических процессов, являются:

- ток в обмотке возбуждения;
- переходные сопротивления контактов;
- виброударные процессы при включении и выключении реле.

Рассмотрим задачу об определении параметров противодействующего момента $M_{пр}(\phi)$. Здесь важно рассмотреть два практически значимых случая.

Первый случай линейной электромагнитной системы, т.е. такой, когда реле работает на линейном участке первоначальной кривой намагничивания стали сердечника. В этом случае $Q(i, \phi) = \text{const}$ и уравнения динамики электромагнита записываются следующим образом:

$$u(t) = iR + d\psi/dt, \quad (4) \quad \psi(t) = C i/\phi_0 - \phi, \quad (5)$$

$$J \frac{d^2\phi}{dt^2} + Q \frac{d\phi}{dt} + M_{пр}(\phi) = \frac{\Psi^2}{2C}, \quad (6)$$

где C — конструктивный коэффициент электромагнита, который поддается расчету или экспериментальному определению по подлежащей разработке методике.

Решим уравнение (4) относительно магнитного потока сцепления ψ , допустив $u = \text{const}$,

$$d\psi = (u - iR)dt,$$

откуда

$$\psi = \int (u - iR)dt. \quad (7)$$

Подставив в (5) выражение для ψ из (7) и решив (5) относительно ϕ , получим

$$\phi = \phi_0 - \frac{Ci}{\int (u - iR)dt}. \quad (8)$$

Определим первую и вторую производные по времени от угла поворота якоря

$$\frac{d\phi}{dt} = -C \frac{\frac{di}{dt} \int (u - iR)dt - i(u - iR)}{\left[\int (u - iR)dt \right]^2}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -C \frac{\left\{ \frac{d^2i}{dt^2} \int (u - iR)dt + \frac{di}{dt} (u - iR) \frac{di}{dt} (u - iR) + iR \frac{di}{dt} \right\}}{\left[\int (u - iR)dt \right]^4} \dots$$

$$\dots \frac{\left[\int (u - iR)dt \right]^2 - \left\{ \frac{di}{dt} \int (u - iR)dt - i(u - iR) \right\}}{\left[\int (u - iR)dt \right]^4} \dots$$

$$\dots \frac{2 \int (u - iR)dt (u - iR)}{\left[\int (u - iR)dt \right]^4} =$$

$$= C \frac{2 \left[\int (u - iR)dt \right]^2 (u - iR) \frac{di}{dt} - (u - iR)^2 i \int (u - iR)dt - \left\{ \frac{di}{dt} \left[\int (u - iR)dt \right]^3 + iR \frac{di}{dt} \left[\int (u - iR)dt \right]^2 \right\}}{\left[\int (u - iR)dt \right]^4} \dots$$

Из уравнения (6) выразим $M_{пр}(t)$ с учетом $d\phi/dt$ и $d^2\phi/dt^2$ из вновь полученного выражения для электромагнитного момента

$$M_s = \frac{\left[\int (u - iR)dt \right]^2}{2C}, \quad (11)$$

$$M_{пр}(t) = \frac{\Psi^2}{2C} - J \frac{d^2\phi}{dt^2} - Q \frac{d\phi}{dt}, \quad (12)$$

$$M_{пр}(t) = \frac{\left[\int (u - iR)dt \right]^2}{2C} + QC \frac{\frac{di}{dt} \left(\int (u - iR)dt - i(u - iR) \right)}{\left[\int (u - iR)dt \right]^2} -$$

$$- 2JC \frac{\left\{ \left[\int (u - iR)dt \right]^2 (u - iR) \frac{di}{dt} - (u - iR) i \int (u - iR)dt \right\}}{\left[\int (u - iR)dt \right]^2} -$$

$$-\frac{\left\{ \frac{d^2 i}{dt^2} \left[\int (u - iR) dt \right]^2 + iR \frac{di}{dt} \left[\int (u - iR) dt \right]^2 \right\}}{\left[\int (u - iR) dt \right]^2} \quad (13)$$

Таким образом, зная J, Q закон изменения тока $i(t)$ в обмотке электромагнита, например, в период движения якоря, т.е. в период времени $\Delta t = t_{уд} - t_{тр}$ по уравнению (13) можно построить зависимость противодействующего движению момента от времени.

Воспользовавшись уравнением (8), можно построить зависимость изменения угла поворота якоря φ от времени $\varphi(t)$.

Поскольку нас интересует зависимость противодействующего момента от координаты якоря $\varphi - M_{пр}(\varphi)$, можно воспользоваться следующим приемом:

в полученных зависимостях $M_{пр}(t)$ и $\varphi(t)$ при их совместной обработке можно исключить время t и в результате получить искомую зависимость $M_{пр}(\varphi)$. Аналогичным приемом можно получить зависимости $i(\varphi), \psi(\varphi)$.

Зависимость тока в обмотке возбуждения от времени $i(t)$ может быть получена экспериментально при включении либо выключении реле постоянного тока. Если эта зависимость (график) может быть аппроксимирован аналитическим выражением, например, степенным рядом

$$i(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n,$$

то можно определить первую

$$\frac{di(t)}{dt} = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + \dots + na_n t^{n-1}$$

и вторую производные тока по времени

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} = 2a_2 + 6a_3 t + \dots + n(n-1)a_n t^{n-2}.$$

Подставляя полученное выражение для производных в (13) и помня о том, что при включении $u = \text{const}$, можно получить аналитическую зависимость $M_{пр}(t)$.

Ввиду сложности аналитического выражения для тока представляется целесообразным практически решить уравнение (13) численными методами (дифференцирования и интегрирования). Теперь в (13) неопределенные интегралы $\int (u - iR) dt$ следует заменить

на определенные вида $\int_{t_{уд}}^{t_m} (u - iR) dt (u - iR) dt$, где $t_{уд}$ — время трогания якоря; $t_{уд}$ — время удара якоря о носик сердечника.

Для исследования электромагнитных процессов при шунтировании обмотки возбуждения электромагнита уравнение (1) приводится к виду

$$d\psi/dt = -iR, \quad (14)$$

а выражение для электромагнитного момента принимает вид

$$M_{\varphi}^0(t) = \left[\int iR dt \right]^2 / 2C. \quad (15)$$

Таким образом, получены выражения для динамического электромагнитного момента в период движения при включении и выключении, а также момента противодействующих сил в зависимости от времени. Зная зависимости $\varphi(t)$ и $M_{пр}(t)$, $M_{\varphi}^B(t)$, $M_{\varphi}^0(t)$ можно,

исключая время как параметр получить зависимости $M_{\varphi}^B(\varphi)$, $M_{\varphi}^0(\varphi)$ и $M_{пр}(\varphi)$.

Безусловно верно то, что для нормально работающего реле между характеристиками

$$M_{\varphi}^B(\varphi), M_{пр}(\varphi), M_{\varphi}^0(\varphi) \text{ и } M_{пр}(\varphi)$$

должны выполняться определенные соотношения, например, типа неравенств:

$$\left[M_{\varphi}^B(\varphi) - M_{пр}(\varphi) \right]_{\varphi = \varphi_1 \dots \varphi_n} \geq 0, \quad (16)$$

$$\left[M_{пр}(\varphi) - M_{\varphi}^0(\varphi) \right]_{\varphi = \varphi_1 \dots \varphi_n} \geq 0. \quad (17)$$

Исследование выполнения неравенств типа (16) и (17), по нашему мнению, целесообразно проводить на автоматизированном комплексе. В случае нелинейной электромагнитной системы для определения $M_{пр}$ необходимо решить систему трех нелинейных уравнений (1)–(3). Зависимости тока в обмотке возбуждения, магнитного потокосцепления и угла поворота якоря для периодов трогания, движения и покоя определяются по вышеприведенным выражениям, причем погрешность решения расхождения с экспериментальными результатами не превышает 1,5 %, что для нелинейной электротехники следует считать очень хорошим результатом. Из этих уравнений можно определить первую и вторую производные угла поворота якоря и зависимость $Q(i, \psi)$, а из уравнения (3) получить зависимость

$$M_{пр}(t) = M_{\varphi}(t) - J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - Q(i, \psi) \frac{d\varphi}{dt}. \quad (18)$$

Выражение $M_{\varphi}(t)$ следует получить из уравнения

$$M_{\varphi}(t) = \frac{dW_{\varphi}}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (19)$$

где W_{φ} — полная энергия всей электромагнитной системы.

В свою очередь, полную энергию W_{φ} можно определить по формуле

$$W_{\varphi} = \int_{i_1}^{i_2} id\psi = \int_{t_1}^{t_2} i(u - iR) dt, \quad (20)$$

или же, зная реализацию $i(t)$ и $\psi(t)$, для вычисления можно воспользоваться следующей приближенной формулой

$$\int_{i_1}^{i_2} id\psi \approx \sum_{k=1}^n i_{cp,k} \Delta\psi_k. \quad (21)$$

Здесь $i_{cp,k}$ — среднее значение тока в k -м интервале $\Delta\psi_k$. Тогда уравнение (18) принимает вид

$$M_{пр}(t) = \frac{i}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} - J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - Q(i, \psi) \frac{d\varphi}{dt}. \quad (22)$$

Здесь, как и ранее в линейном случае, зная $M_{пр}(t)$ и $\varphi(t)$, можно построить зависимости $M_{\varphi}^B(\varphi)$ и $M_{\varphi}^0(\varphi)$, и, сравнивая их с $M_{пр}(\varphi)$, прийти к заключению о состоянии электромагнитного реле в некоторой части характеризующих его параметров.

1. Ройзен В. З. Электромагнитные малогабаритные реле. — Л.: Энергоатомиздат, — 1986. — 252 с.
2. Азароняц Р. А. Электромагнитные элементы технической кибернетики. — М., Наука, 1972. — 277 с.