

А. П. РАЗГОНОВ, А. В. АДРЕЕВСКИХ, Б. М. БОНДАРЕНКО,  
Д. А. БЕЗРУКАВИЙ (ДИИТ)

## К ОЦЕНКЕ СИЛ ТРЕНИЯ В МОМЕНТЫ ТРОГАНИЯ И ОСТАНОВКИ ЯКОРЯ РЕЛЕ

Розглянуто метод визначення величини тягового зусилля, яке виводить систему із стану рівноваги, заснований на використанні властивості механічного резонансу рухомої системи реле, який дозволяє автоматичними засобами визначити момент реакції якоря і відповідні йому струм і силу тертя.

Рассмотрен метод определения величины тягового усилия, которое выводит систему из состояния равновесия, основанный на использовании свойства механического резонанса подвижной системы реле, позволяющий автоматическими средствами определить момент реакции якоря и соответствующие ему ток и силу трения.

The article considers issues of electromagnetic compatibility of traction network with the rail circuits. A mathematical model is elaborated for evaluation of distribution of harmonics of traction current on the length of feeder zone and determination of the value of stray currents. The results of modeling are represented for 50 and 100 Hz harmonics of return traction current.

Проблема обеспечения надежности релейных систем железнодорожной автоматики и телемеханики решается с помощью высокоточного контроля механических параметров электромагнитных реле в ремонтно-технологических участках дистанции сигнализации и связи. Вместе с тем это решение производится с применением устаревшей технологии и измерительной техники (необходимость вскрытия блоков, ручное измерение механических параметров), при этом привлекается большое число квалифицированных специалистов.

Современная технология профилактического ремонта аппаратуры должна включать тестовый контроль особенно механических параметров электромагнитных реле и оптимизацию межремонтного периода. Частично эта проблема решается с применением устройств для измерения перемещения якоря электромагнитного реле [1–9].

Целью исследования является количественная оценка сил трения в подвижной системе реле, с последующим решением задачи автоматизации процесса измерения механических параметров и характеристик реле.

Для определения тяговой силы в момент начала движения якоря электромагнитного реле важно знать величину сил трения, удерживающих систему в начальном положении после подачи тока в обмотку реле.

Уравнение движения подвижной системы реле

$$F_3 = m_1 \frac{dx^2}{dt^2} + f_{тр} \frac{dx}{dt} \pm ax + F_0, \quad (1)$$

где  $m_1$  – приведенная масса движущихся частей реле;  $x$  – перемещение якоря;  $f_{тр}$  – удель-

ная сила сопротивления движению якоря и движущихся частей реле;  $a$  – приведенная жесткость контактных и возвратных пружин;  $F_0$  – начальное значение электромагнитной противодействующей силы, (противо-эдс);  $F_3$  – сила притяжения, действующая на якорь.

Для приближенного решения этого нелинейного уравнения пользуются графо-аналитическим методом последовательных приближений. При этом, как правило, пренебрегают начальной противодействующей силой ( $F_0$ ) и удельной силой сопротивления движению ( $f_{тр}$ ) [10].

На наш взгляд, удельную силу сопротивления движению следует учитывать в расчетах, поскольку по ее величине при функциональном контроле можно оценить состояние подвижной системы реле, в том числе и контактных поверхностей трущихся элементов.

Однако трудно определить существующими техническими средствами относительно малую начальную величину механической реакции якоря на ток в обмотке реле в момент трогания якоря.

Анализ (1) показывает, что реакция якоря на ток в обмотке обусловлена как электромагнитными (ток, напряжение, потоки), так и механическими параметрами реле.

Перед моментом трогания скорость движения якоря нулевая, следовательно, начальным значением противодействующей силы  $F_0$  (противо-эдс) можно пренебречь.

К моменту трогания якоря удельная сила сопротивления движению  $f_{тр}$  обусловлена на-

личием на поверхности подвижных сопряженных элементов сил сцепления (якоря, контактов, регулировочных пружин и др.), за счет трения первого рода (трения скольжения), которое в начальный момент максимально и является трением покоя. Эта величина зависит от качества обработки поверхностей трущихся деталей и от силы их сжатия (нормальной реакции):

$$f_{\text{тр}} = kN, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент трения при скольжении;  $N$  – величина нормальной реакции.

Сила трения покоя равна модулю и направлена против внешней силы, вызывающей скольжение одной детали по другой.

Известно, что коэффициент трения скольжения  $k$  не является постоянной величиной (как в покое), он зависит от свойств и состояния поверхностей деталей.

Из сказанного следует, что состояние поверхностей сопряженных деталей, в том числе и контактов, в значительной степени определяет величину силы трения в подвижной системе.

С началом движения системы коэффициент трения покоя переходит в коэффициент трения скольжения, который несколько меньше коэффициента трения покоя и определяется по формуле (2).

С ростом скорости скольжения и с изменением давления между контактами изменяется и величина коэффициента трения скольжения. Условно диапазон изменения этого коэффициента может быть принят как номинальный для определенных типов реле.

Определив разность между коэффициентами трения покоя и трения скольжения, получаем третью величину, характеризующую состояние поверхностей трения в подвижной системе. Диапазон изменения этой величины также может быть определен как номинальный.

Для оценки коэффициента трения скольжения предложен метод измерения тягового усилия с использованием механического резонанса подвижной системы реле.

Суть метода заключается в том, что система выводится из состояния равновесия (покоя) путем использования свойства механического ре-

зонанса подвижной системы реле. Это позволяет автоматически средствами определить момент трогания и остановки якоря, а также соответствующие им ток и силу трения.

Если решать эту задачу традиционным способом – путем измерения напряжения на обмотке реле при трогании якоря, то необходимо наряду с силами трения покоя дополнительно определять момент инерции якоря. Последний можно определить экспериментальным путем, если расположить якорь на ножевой опоре так, чтобы он качался как физический маятник.

Частота колебаний такого маятника:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgl_{\text{ц}}}{J}}. \quad (3)$$

Отсюда момент инерции якоря

$$J = \frac{mgl_{\text{ц}}}{4\pi^2 f^2}, \quad (4)$$

где  $m$  – инертная масса якоря;  $l_{\text{ц}}$  – расстояние от центра тяжести якоря до оси вращения;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $f$  – число колебания якоря в секунду [10].

При решении задачи с использованием механического резонанса подвижной системы, путем раскачивания ее импульсами тока, моментом инерции якоря можно пренебречь, так как через каждые полпериода собственных колебаний знак момента изменяется на противоположный, при неизменном его модуле. В результате этого вся энергия, подаваемая в систему, будет расходоваться на преодоление сил трения первого рода (скольжения).

Определение частоты собственных колебаний реле из решения уравнений (1)–(4) затруднительно, ввиду того, что сложно найти истинные значения механических параметров (силы трения якоря, контактов, упругости контактных пружин и др.) тем более, что значения некоторых из них случайны, поэтому предложено решить эту задачу экспериментальным путем, используя осциллограммы вибрации якоря при отключении тока в обмотке реле (рис. 1).



Рис. 1. Осциллограмма для определения собственных колебаний подвижной системы реле из вибрации якоря

Импульсы тока резонансной частоты подают в обесточенную обмотку реле, что выводит подвижную систему реле из состояния покоя. Затем, плавно уменьшая амплитуду импульсов, определяют значение тока в обмотке, при котором произойдет полное затухание механических колебаний в системе. За началом и окончанием колебаний якоря осуществляется слежение с помощью оптического канала опто-звуковой камеры [6].

При скважности импульсов тока равной двум, определяется среднее значение тока, при котором происходит полная остановка колебаний системы. Из полученных значений определяют разность токов.

Определяя разницу в значении силы тока, полученной рассмотренным методом и силы тока, полученной при традиционном измерении можно с достаточной степенью точности определить величину силы трения в подвижной системе реле.

Использование свойств механического резонанса подвижной системы реле позволяет измерить токи в обмотке реле, при которых подвижная система начинает перемещение и заканчивает его полной остановкой якоря реле.

Аналогичным методом могут быть получены силы трения в подвижной системе при отпадании якоря реле. По результатам измерений токов можно судить о величине сил трения подвижной системы в состоянии покоя и в состоянии движения (скольжения).

В общем виде сила притяжения (тяги) якоря электромагнита имеет вид:

$$F_T = \frac{(Iw)^2 G_M^2}{2\mu_0 S}, \quad (5)$$

где  $I$  – ток в обмотке реле;  $G_M$  – общая магнитная проводимость реле;  $S$  – площадь полюса сердечника;  $Iw$  – намагничивающая сила, создаваемая обмоткой реле.

К моменту начала движения сила тяги сравнивается с удельной силой сопротивления движению в подвижной системе

$$F_T = f_{тр},$$

причем в этом случае  $f_{тр}$  выражает величину силы трения покоя  $f_{трП}$ , в том числе и для тыловых контактных групп, которая, как видно из (5), определяется значением тока покоя  $I_{П}$  в обмотке реле к моменту трогания.

К моменту остановки подвижной системы реле  $f_{тр}$  выражает величину силы трения движения  $f_{трД}$  с учетом состояния поверхностей тыловых контактных групп. Ток, при котором подвижная система останавливается  $I_{Д}$ , определяется с помощью предложенного метода и отличается от тока к моменту трогания (рис. 2).

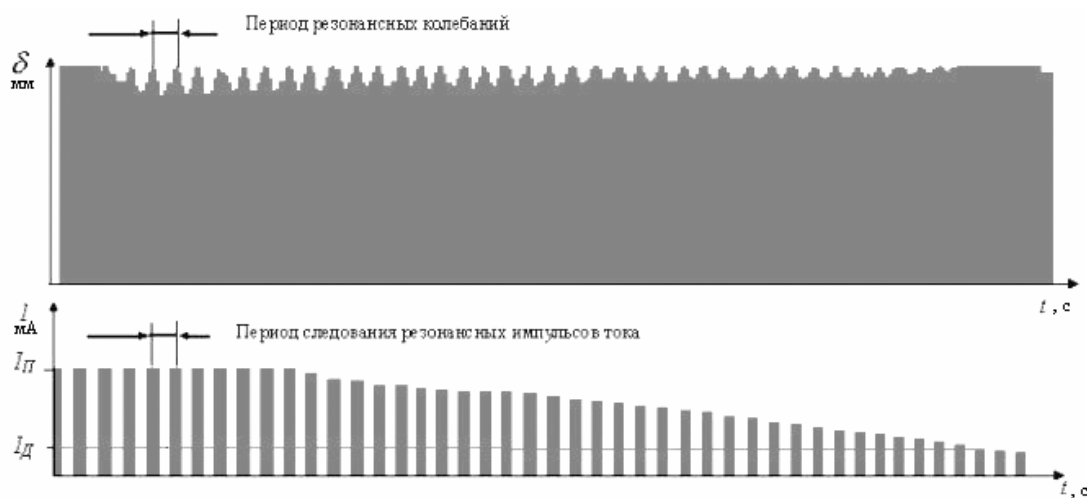


Рис. 2. Экспериментально полученные резонансные колебания якоря реле при подаче в обмотку уменьшающихся по амплитуде импульсов тока с частотой собственных колебаний подвижной системы

В этом случае, к моменту трогания и остановки реле получаем две силы сопротивления движению:

$$f_{трП} = \frac{(I_{П}w)^2 G_M^2}{2\mu_0 S}, \quad (6)$$

$$f_{трД} = \frac{(I_{Д}w)^2 G_M^2}{2\mu_0 S}. \quad (7)$$

Для определения состояния поверхностей фронтных контактных групп предложено увеличить амплитуду резонансных импульсов тока до величины, при которой произойдет соприкосновение подвижных и фронтных контактов. При этом полного притяжения якоря не допускают. В этом случае, колебание подвижной системы происходит с учетом трения в фронтных контактных группах (рис. 3).

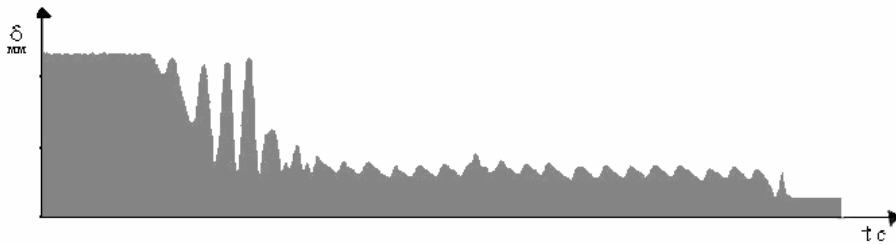


Рис. 3. Экспериментально полученные резонансные колебания якоря реле и фронтовых групп контактов при подаче в обмотку импульсов тока номинальной амплитуды и частоты собственных колебаний подвижной системы

Тогда сила тяги якоря в момент движения описывается известной формулой

$$F_T = -\frac{(Iw)^2 G_M^2}{2G_\delta^2} \cdot \frac{dG_\delta}{d\delta}, \quad (8)$$

где  $2G_\delta^2$  – общая магнитная проводимость физического зазора;  $\delta$  – величина физического зазора [1].

При этом импульсный ток в обмотке может характеризовать номинальную величину  $I_{нф}$ , при которой резонансные колебания происходят с учетом трения в фронтовых контактных группах. Тогда амплитуда изменения физического зазора, при номинальном токе резонансных колебаний будет характеризовать  $f_{тр}$ , уже с учетом трения в фронтовых контактных группах  $f_{тр.ф}$ , которая будет получена из (8) путем подстановки значения  $I_{нф}$ .

Исследования показывают, что изменение сил трения в подвижной системе в диапазоне 14...20 г.с в большей степени связано с изменением качества поверхности контактных групп, чем с изменением трущихся поверхностей в других местах этой подвижной системы (рабочие тяги, ярмо, регулировочные пружины и т. д.).

Это изменение обусловлено более интенсивным износом контактов под воздействием механических, химических или электрических факторов. Образующиеся при этом абразивные частицы, окислы химической коррозии и электрическая эрозия ускоряют деформацию поверхностей скольжения контактов.

Кроме того исследования показывают, что изменение амплитуды и частоты собственных механических колебаний подвижной системы также связано с изменениями сил трения между сопряженными деталями. Эти изменения легко определяется из амплитуды, частоты и количества собственных колебаний системы (периодов вибрации) при отпадании якоря (см. рис. 1).

Таким образом, по изменениям сил трения в подвижной системе, происходящих в процессе эксплуатации, можно судить о качестве контактных поверхностей и об общем состоянии подвижной системе.

Совместно с другими методами функционального контроля механических параметров, определение сил сопротивления движению (трения) подвижной системы реле предложенным методом открывает возможности более глубокой диагностики релейных блоков и автономных реле без снятия защитного кожуха.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разгонов А. П. Стенд для автоматизированной проверки параметров реле // Автоматика, телемеханика и связь. – 1991. – № 2. – С. 25–28.
2. Разгонов А. П. Выбор допусков // Автоматика, телемеханика и связь. – 1988. – № 6. – С. 30–32.
3. Андреевских А. В. Оптимизация контроля механических параметров электромагнитных реле // Автоматика, информатика и связь. – 2003. – № 1. – С. 43–45.
4. Андреевских А. В. Согласование механической и тяговой характеристик нейтрального реле с произвольным контактным набором // Сб. научных трудов КИИТа. – 2003. – С. 60–63.
5. Деклар. пат. Украины № 70568. Пристрій для вимірювання переміщення якоря електромагнітного реле / Разгонов А. П., Андреевских А. В., Бондаренко Б. М. 2004.
6. Деклар. пат. на полезную модель № 7850 от 15.07.2005. Пристрій для вимірювання механічних параметрів електромагнітного реле. Разгонов А. П.
7. Деклар. пат. на полезную модель № 11888 от 16.01.2006. Спосіб визначення механічних параметрів електромагнітного реле / Разгонов А. П., Андреевских А. В., Бондаренко Б. М., Безрукавый Д. А.
8. Декларационный патент на полезную модель № 11179 від 15.12.2005. Спосіб діагностики роботи контактних груп багатоконтактного реле / Разгонов А. П., Андреевский А. В., Бондаренко Б. М., Безрукавый Д. А.
9. Разгонов А. П. Контроль механических параметров электромагнитных реле / А. П. Разгонов, А. В. Андреевский, Б. М. Бондаренко, Д. А. Безрукавый // Зб. наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2005. – Вип. 4. – С. 41–48.
10. Витенберг М. И. Расчет электромагнитных реле. – Л.: Энергия, 1975.

Поступила в редколлегию 25.05.2006.