

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЯКОРЯ ПО ЗНАЧЕНИЮ ИНДУКТИВНОСТИ ОБМОТКИ РЕЛЕ

В даній статті запропоновано метод визначення положення якоря реле за значенням індуктивності обмотки реле. Метод ґрунтується на тому, що при переміщенні якоря під час вмикання реле зменшується робочий повітряний зазор, що приводить до збільшення значення індуктивності обмотки, яке практично не залежить від струму й визначається величиною повітряного зазору між якорем і сердечником. Даний метод дозволяє автоматизувати вимірювання механічних параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики без зняття кожуха відповідно до експлуатаційно-технічних вимог.

В данной статье предложен метод определения положения якоря реле по значению индуктивности обмотки реле. Метод основан на том, что при движении якоря во время включения реле уменьшается рабочий воздушный зазор, что приводит к увеличению значения индуктивности обмотки, которое практически не зависит от тока и определяется величиной воздушного зазора между якорем и сердечником. Данный метод позволяет автоматизировать измерения механических параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики без снятия кожуха в соответствии с эксплуатационно-техническими требованиями.

The method of definition of a relay anchor situation on inductance of a winding of the relay is offered in the given paper. The method is based, that the working air backlash decrees at the switching on a relay. It follows to the increase of winding inductance, which does not depend on a current practically and it determined by size of an air backlash between an anchor and core. It allows us to automation measurements of mechanical parameters of electromagnetic relays of railway automatics without removal of casing in the accordance with the operating-technical requirements.

### Введение и постановка задачи

В настоящее время на железнодорожном транспорте Украины в основном эксплуатируются релейные системы автоматики, основной элементной базой которых являются электромагнитные реле первого класса надежности типа НМШ или РЭЛ. С помощью данных реле обеспечивается безопасность движения поездов и надежность функционирования устройств железнодорожной автоматики, поэтому к их параметрам предъявляются жесткие требования.

Все основные работы по ремонту, регулировке и проверке параметров реле производятся в соответствии с «Инструкцией по техническому обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ)» на ремонтно-технологических участках (РТУ) СЦБ [1]. При проверке реле железнодорожной автоматики измерению подлежат электрические, временные и механические параметры. Наиболее сложным процессом является измерение механических параметров реле: совместного хода контактов, межконтактного зазора в крайних положениях якоря и при перелете контактов, высоты антимагнитного штифта, контактного давления, одновременности замыкания контактов.

Существующая технология проверки механических параметров реле железнодорожной

автоматики отличается низкой точностью и высокой субъективностью, из-за большого количества ручных операций, которые осуществляются различного рода приспособлениями, шаблонами, графмометрами, щупами и т.п. Кроме того, часть механических параметров (неодновременность замыкания контактов и совместный ход контактов), вообще не измеряются, так как в РТУ отсутствуют для этого измерительные средства. Для контроля данных параметров используется довольно субъективный метод визуальной оценки, который не позволяет измерить реальное значение параметра, а только фиксирует, соответствие нормативному значению.

Статистические исследования, проведенные на кафедре «Автоматики, телемеханики и связи» ДИИТа, показали, что при существующей технологии проверки реле железнодорожной автоматики, до 10% из них эксплуатируются с параметрами, которые не соответствуют нормативным значениям [2]. Это связано с тем, что существующая технология проверки параметров реле железнодорожной автоматики отличается невысокой точностью из-за большого количества ручных операций, а также требует значительных затрат времени. Повысить качество проверки реле можно путем разработки и внедрения методов автоматизированного изме-

рения параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики.

Для автоматизированного измерения механических параметров реле необходимо знать положение якоря в любой момент времени. Попытки решения данной задачи осуществлялись и ранее. В работе [3] авторы предлагали способ измерения величины воздушного зазора между якорем и сердечником реле, с помощью токовихревого датчика. Недостатком данного способа является то, что применение внешнего датчика, позволяло создать только полуавтоматический стенд, так как датчик требовал индивидуальной калибровки и настройки для каждого измеряемого реле. К тому же вся обработка информации проводилась в аналоговой форме, что значительно снижало точность получаемых результатов и увеличивало стоимость такого устройства. В работе [4] автор предлагает измерительное устройство, в котором для определения положения якоря используется датчик Холла. Датчик размещается на неподвижном сердечнике и при перемещении якоря с него снимается напряжение, пропорциональное координате якоря электромагнитного реле. К недостаткам данного метода можно отнести необходимость снятия кожуха реле для крепления датчика Холла, а также то, что не у всех типов реле есть место на сердечнике для размещения датчика, а крепление датчика на якоре приводит к изменению параметров самого измеряемого реле.

Целью работы является разработка метода определения положения якоря реле по значению индуктивности обмотки реле для автоматизированного измерения механических параметров реле железнодорожной автоматики типов НМШ и РЭЛ. Данный метод реализован программно на языке C++ и используется совместно с автоматизированным измерительным комплексом для проверки параметров реле железнодорожной автоматики, который был разработан на кафедре «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

### Описание метода

При движении якоря во время включения реле уменьшается рабочий воздушный зазор, что приводит к увеличению значения индуктивности обмотки. Экспериментальные исследования реле железнодорожной автоматики типов НМШ и РЭЛ показали, что на участке движения якоря, индуктивность обмотки реле

практически не зависит от тока и определяется величиной воздушного зазора между якорем и сердечником. На рис. 1 представлена зависимость индуктивности от тока в обмотке на участке движения якоря для реле типа РЭЛ1-1600. Из данной зависимости видно, что при фиксированном положении якоря и изменении тока в обмотке реле от 5 до 11 мА (диапазон изменения тока при движении якоря реле), индуктивность обмотки реле изменяется не более чем на 5...10%. Наибольшее влияние значения тока на изменение индуктивности наблюдается при минимальном зазоре между якорем и сердечником, так как в этом случае магнитная цепь реле начинает входить в режим насыщения. В нормальнодействующих электромагнитных реле первого класса надежности типов НМШ и РЭЛ индуктивность увеличивается при включении в 1,5...2 раза, что позволяет использовать данное явление для определения величины рабочего воздушного зазора.

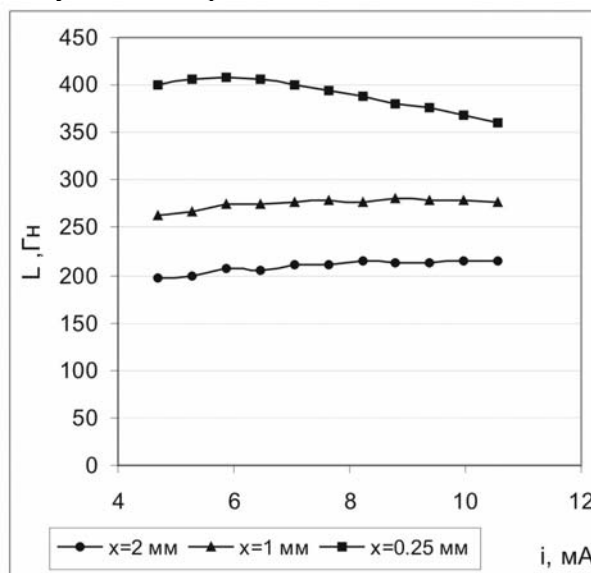


Рис. 1. Зависимость индуктивности от тока в обмотке реле типа РЭЛ1-1600 на участке движения якоря реле для разных координат якоря

Исходными данными для данного метода являются:

- зависимость тока в обмотке от времени  $i(t)$  при включении реле;
- параметры электрической и магнитной цепей реле.

На рис. 4 представлена зависимость  $i(t)$  для реле РЭЛ1-1600 с наложением моментов переключения контактов, а также моментов начала движения и остановки якоря, где  $t_1$  — момент начала движения якоря,  $t_2$  — момент размыкания тыловых контактов,  $t_3$  — момент замыкания фронтальных контактов,  $t_4$  — момент остановки якоря.

Таким образом, переходную зависимость

$i(t)$  можно разбить на три участка:

- 1 участок (0... $t_1$ ) – нарастание тока в обмотке реле от момента подачи напряжения на обмотку реле до момента начала движения якоря;

- 2 участок ( $t_1$ ... $t_4$ ) – изменения тока в обмотке реле во время движения якоря;

- 3 участок – нарастание тока в обмотке реле от момента останова якоря до момента достижения током установившегося значения.

На первом и третьем участках якорь неподвижен и изменения тока в обмотке реле  $i(t)$  описывается следующими выражениями

$$U = i(t)R + \frac{d\Psi}{dt}; \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L_1}t} \right), \quad (2)$$

где  $R$  – сопротивление обмотки реле,  $L_1$  – индуктивность обмотки реле до момента начала движения якоря,  $U$  – напряжение источника питания,  $\Psi$  – потокосцепление обмотки реле.

Согласно выражениям (1) и (2) индуктивность обмотки реле на этих участках будет равна:

$$L(t) = \frac{-Rt}{\ln \left( \frac{i(t) - i_{уст}}{i_{нач} - i_{уст}} \right)}, \quad (3)$$

где  $i_{уст}$  – установившееся значение тока в обмотке реле,  $t_{нач}$  – начальный ток. Для первого участка начальный ток равен нулю, а для третьего участка начальный ток равен значению тока в момент останова якоря.

На втором участке за счет движения якоря, индуктивность является переменной величиной и выражение (1) приобретает следующий вид:

$$U = i(t)R + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}. \quad (4)$$

Для решения уравнения (4) численными методами, необходимо разбить второй участок зависимости  $i(t)$  на  $n$  интервалов, так чтобы на интервале  $[t_{нач}, t]$  производная  $di/dt = const$ . Тогда уравнение (4) превратится в линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$i \frac{dL}{dt} + IL = A, \quad (5)$$

где  $I = \frac{di}{dt} = const$ ,  $A = U - iR$ .

Общее решение неоднородного уравнения (5) будет иметь вид:

$$L = L_1 + L_2, \quad (6)$$

где  $L_1$  – решение соответствующего однородного уравнения (при  $A=0$ ),  $L_2$  – частное решение дифференциального уравнения (при  $dL/dt=0$  в начальный момент времени, так как до начала движения якоря индуктивность обмотки реле является константой). Таким образом, индуктивность обмотки реле на интервале  $[t_{нач}, t]$  во время движения якоря будет определяться следующим выражением:

$$L = c_1 e^{-\frac{t}{I}} + \frac{A}{I}, \quad (7)$$

где  $c_1$  – постоянная интегрирования, которая будет равна:

$$c_1 = \frac{e^{-\frac{t_{нач}}{I}}}{L_{нач} - \frac{A}{I}}, \quad (8)$$

где  $L_{нач}$  – индуктивность обмотки реле в момент времени  $t_{нач}$ . Для первого интервала зависимости  $i(t)$   $L_{нач}$  – это индуктивность обмотки реле до начала движения якоря,  $t_{нач}$  – момент начала движения якоря.

В отличие от второго участка на первом и третьем участках индуктивность является константой, что используется для определения моментов начала движения и останова якоря. Экспериментальные исследования различных типов реле железнодорожной автоматики показали, что до момента начала движения якоря, ток в обмотке изменяется по экспоненциальному закону, независимо от значения напряжения питания. С началом движения якоря, начинает изменяться индуктивность обмотки реле, что приводит к отклонению зависимости  $i(t)$  от экспоненты. Для определения момента начала движения якоря вычисляется начальная индуктивность реле по значению тока  $i(t)$  в обмотке при  $t = 20$  мс (время трогания реле НМШ и РЭЛ составляет 50...70 мс). Затем вычисляется следующее значение тока в обмотке реле и сравнивается с измеренным. Если данная выборка сигнала  $i(t)$  выходит за пределы заданной погрешности (0,1%), то время  $t$  запоминается как момент начала движения якоря. После

этого вычисляется значения тока еще для десяти выборок, и если погрешность не вернулась в заданный интервал, а продолжает расти, следовательно, момент начала движения якоря определен верно.

Момент остановки якоря соответствует наименьшему значению тока в обмотке реле при движении якоря, после чего ток возрастает по экспоненциальному закону до своего установившегося значения.

Индуктивность обмотки реле при движении якоря может быть описана следующим приближенным выражением [5]:

$$L(x) = K_0 w^2, \quad (9)$$

где  $w$  – число витков обмотки реле,  $K_0$  – приведенная магнитная проводимость магнитной цепи реле, определяемая выражением

$$K_0 = \frac{3 + g l_c R_\delta}{3(R_{ж} l_c + q R_\delta)}, \quad (10)$$

где  $l_c$  – длина сердечника,  $R_{ж}$  – сумма магнитных сопротивлений единицы длины (1 м) магнитопровода (сердечника и ярма),  $R_\delta$  – магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора, зависящее от положения якоря,  $g$  – магнитная проводимость потока рассеяния между сердечником и корпусом на единицу длины (1 м) магнитной цепи,  $q$  – коэффициент, который определяется путем расчета магнитной цепи реле по следующей формуле

$$q = \frac{l_c \sqrt{g R_{ж}}}{\text{th} l_c \sqrt{g R_{ж}}}. \quad (11)$$

Таким образом, зависимость положения якоря от времени  $x(t)$  получается из сопоставления двух функций  $L(t)$  и  $L(x)$ . Вычисление зависимости индуктивности обмотки от величины воздушного зазора  $L(x)$  по формуле (9) требует громоздкого и длительного расчета магнитной цепи реле. Поскольку зависимость  $L(x)$  определяется конструкцией реле, то для типовых реле железнодорожной автоматики НМШ и РЭЛ гораздо удобнее пользоваться аппроксимирующей функцией  $L(x)$ , полученной по экспериментальным значениям (рис. 2).

На рис. 3 изображена зависимость  $x(t)$ , которая получена по данному методу для реле железнодорожной автоматики типа РЭЛ1-1600. Из данной зависимости можно определить моменты начала движения и остановки якоря, а

при сопоставлении с моментами размыкания и замыкания контактов можно вычислить такие механические параметры реле, как физический зазор между якорем и сердечником, совместный ход контактов, межконтактный зазор в момент перелета контактов и в крайних положениях якоря, высоту антимагнитного штифта, неодновременность замыкания контактов. Кроме того, зависимость  $x(t)$  может использоваться в качестве исходных данных для определения контактного давления и электромагнитной силы притяжения якоря реле.

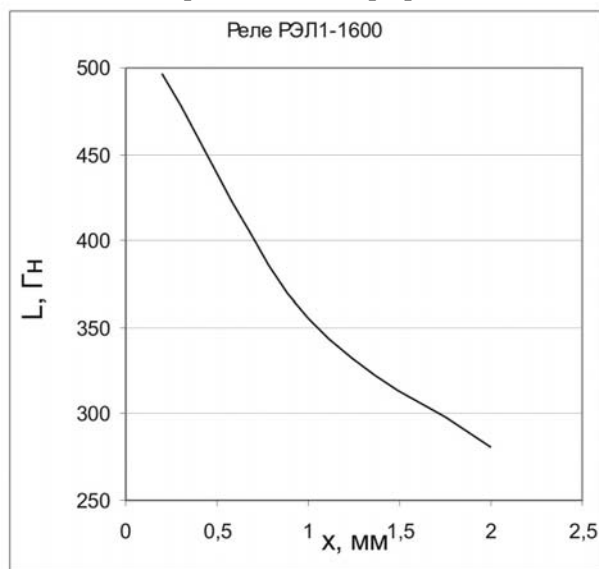


Рис. 2. Зависимость индуктивности обмотки от величины воздушного зазора для реле РЭЛ1-1600

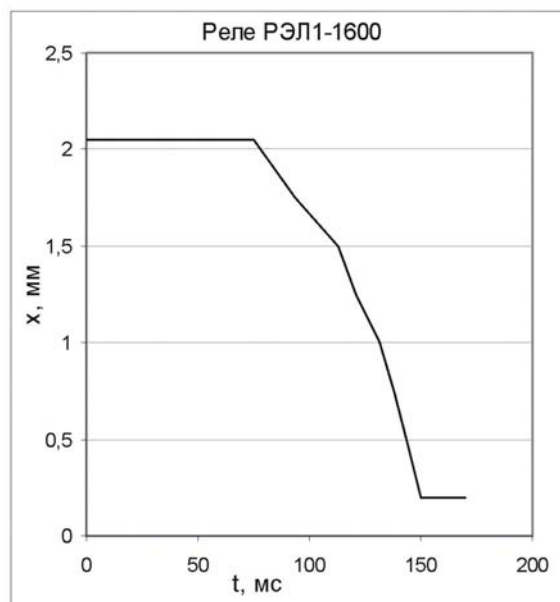


Рис. 3. Зависимость положения якоря реле от времени для РЭЛ1-1600

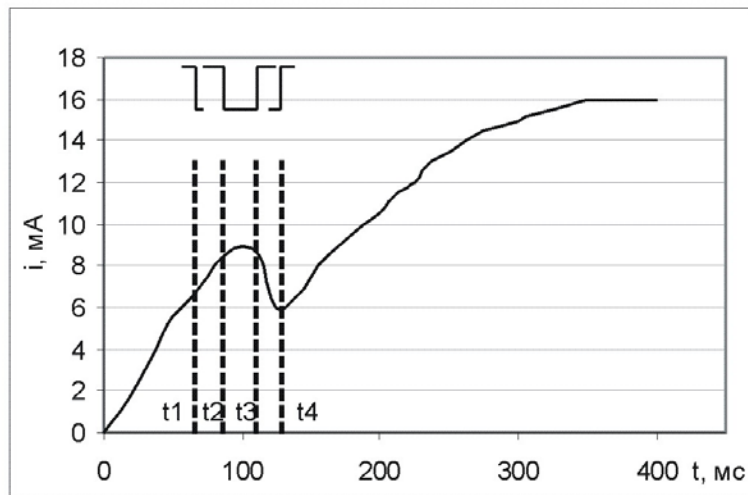


Рис. 4. Переходная зависимость  $i(t)$  для реле типа РЭЛ1-1600 при включении реле

### Выводы

Предлагаемый метод определения положения якоря по значению индуктивности обмотки реле позволяет решить задачу автоматизации измерения механических параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики типов НМШ и РЭЛ без снятия кожуха в соответствии с эксплуатационно-техническими требованиями к реле первого класса надежности.

Лабораторные испытания автоматизированного измерительного комплекса для проверки параметров реле железнодорожной автоматики показали, что погрешность определения положения якоря с помощью данного метода не превышает 7 % для реле типа НМШ и 5 % для реле типа РЭЛ. Наибольшая погрешность наблюдается в начале движения якоря, что объясняется нелинейной зависимостью функции  $L(x)$ , когда изменение положения якоря не вызывает существенного изменения индуктивности обмотки реле.

Такая погрешность вычисления механических параметров реле позволяет использовать метод на практике вместо существующей технологии проверки реле.

К достоинствам данного метода измерения механических параметров реле можно также отнести увеличение точности и уменьшение субъективности получаемых результатов, а также уменьшение времени на измерение, за счет того, что отпадает необходимость проводить измерения для каждого контакта отдельно и снимать кожух реле.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦШЕОТ/0012: Затв. Гол. упр. зв'язку, енергетики та обчислювальної техніки М-ва транспорту України 05.10.1998. – К., 1998. – 72 с.
2. Стенд для проверки реле СЦБ. Разработка предложений по созданию стенда на базе КТС-ЛИУС-2. Отчет по НИР / ДИИТ. – № 353/3803. – Д., 1983. – 54 с.
3. Разгонов А. П. Полуавтоматический стенд для контроля и измерения параметров реле // Межвузовский сборник научных трудов. Днепропетр. ин. инж. трансп. – Д.: Транспорт. – 1985. – С. 11 – 20.
4. Устройство для снятия динамической электромагнитной характеристики электромагнитных элементов постоянного тока при срабатывании: А.С. 789970 СССР, МКИ G05 B23/02/Р. А. Агаронянц. – № 2671891/24-07; Заявлено 03.10.78. Опубл. 23.12.80, Бюл. № 47. – 4 с.
5. Витенберг М. В. Расчет электромагнитных реле. – М.: Энергия, 1975. – 416 с.

Поступила в редакцию 05.11.2007.