

Авторы:

**д.т.н. Булычев А.В.,
Осипова В.С.,**
ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия,
Грибков М.А.,
ПАО «Россети
Московский регион»,
г. Москва, Россия,
Шалимов А.С.,
ООО НПП «Динамика»,
г. Чебоксары, Россия.

**D.Sc. Bulychev A.V.,
Osipova V.S.,**
«NPP Bresler» LLC,
Cheboksary, Russia,
Gribov M.A.,
PJSC «Rosseti Moscow
Region»,
Moscow, Russia,
Shalimov A.S.,
SPE «Dynamics»,
Cheboksary, Russia.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ: ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА

DYNAMIC PROPERTIES OF RELAY PROTECTION DEVICES: ELECTROMECHANICAL ELEMENT BASE

Аннотация: предложена методика оценки динамических свойств электромеханических измерительных реле для релейной защиты. Методика основана на представлении реле в виде сложного динамического звена при стандартизованном входном воздействии. Показано, что заданная идеальная функциональная связь между входом и выходом реле во времени искажается и возникает динамическая погрешность. Интегральное значение этой погрешности уменьшается по мере увеличения времени наблюдения за сигналом. При времени срабатывания защиты менее 0,1 секунды динамическая погрешность может достигать 15-20%, что в большинстве случаев не приемлемо.

Ключевые слова: динамика, реле, динамическая погрешность, релейная защита, инерционность реле.

Abstract: a method for evaluating the dynamic properties of electromechanical measuring relays for relay protection is proposed. The technique is based on the representation of a relay in the form of a complex dynamic link with a standardized input effect. It is shown that a given ideal functional relationship between the input and output of the relay is distorted in time and a dynamic error occurs. The integral value of this error decreases as the time of observation of the signal increases. When the protection response time is less than 0.1 seconds, the dynamic error can reach 15-20%, which in most cases is not acceptable.

Традиционно (исторически) выбор параметров срабатывания устройств релейной защиты (РЗ) выполняется на основе стационарного подхода по интегральным (действующим) значениям тока и напряжения.

Но, быстродействующие защиты, как правило, должны работать в условиях высокочастотных переходных процессов. При этом трудно обеспечить корректность измерения интегральных значений сигналов. Таким образом, возникает противоречие между свойствами входных сигналов и характеристиками измерительных элементов устройств РЗ. Разрешение этого противоречия возможно с помощью анализа и последующего учета динамических свойств измерительных элементов защит.

В электромеханических защитах наиболее распространенным измерительным элементом является электромагнитное реле серии РТ-40. Входной величиной реле (рис. 1) можно принять функцию $x(t)$ – ток в катушке реле $i_p(t)$, а выходной – $y(t)$ – длина воздушного зазора $\delta(t)$ между неподвижным сердечником электромагнита реле и подвижным якорем.

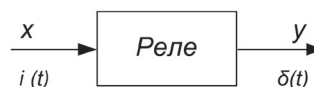


Рис. 1. Функциональная схема электромеханического реле

В общем, смысл измерения в РЗ состоит в том, что поступающая от защищаемого объекта контролируемая входная величина $x(t)$ должна быть по возможности без потерь информации обработана измерительным реле и сопоставлена с порогом срабатывания. При строго стационарном подходе измерительное реле должно обеспечить выделение именно периодической составляющей сигнала с частотой сети, сравнение действующего значения этой составляющей с порогом срабатывания и формирование выходного сигнала (замкнутое или разомкнутое состояние контактов). Заданная функциональная связь входной и выходной величин реле, по возможности, не должна искажаться.

Требование постоянства связи во времени строго не выполняется, т.к. в реле есть электрические элементы, способные запасать энергию (например, индуктивность ка-

тушки реле), есть подвижные конструктивные элементы, обладающие механической инерцией, и противодействующие пружины. Таким образом, возникает динамическая погрешность реле, т.е. отклонение выходной величины в новом режиме от расчетной выходной величины [1]:

$$\varepsilon(t) = y(t) - S \cdot x(t),$$

где S – чувствительность идеального безинерционного реле (масштабирующая величина, обеспечивающая согласование разностей входной и выходной величин).

Динамическую погрешность, в принципе, можно считать методической погрешностью, т.к. она зависит не только от измерительного устройства (реле), но, в большей степени, от соотношений между параметрами сигнала и параметрами реле. По сути, она определяется степенью несоответствия измерительного устройства поставленной задаче измерения сигнала $x(t)$. Таким образом, для определения динамической погрешности измерения необходимо знать характеристики измерительного преобразователя и параметры измеряемого сигнала. В общем виде, если реакция реле $y(t)$ на входной сигнал известна (определена), то динамическая погрешность может быть найдена аналитическим путем. Однако, строго это сделать невозможно, так как входной сигнал аналитически не задан (он измеряется потому, что неизвестен).

Практически, предположив, что входной сигнал реле содержит периодические (гармонические) и однополярные (например, постоянные или экспоненциальные) составляющие можно оценить динамические погрешности реле с помощью стандартизованных сигналов:

$$\varepsilon(t) = y_c(t) - S \cdot x_c(t),$$

где $x_c(t)$ и $y_c(t)$ соответственно, входной стандартизованный сигнал и реакция реле на этот сигнал.

Оценить динамические свойства реле в первом приближении можно по реакции реле на общепринятый стандартизованный сигнал – единичный скачек входного сигнала.

В исходном состоянии воздушный зазор имеет начальное значение δ_H , а после завершения процесса срабатывания – конечное значение δ_K . Начальный воздушный зазор между подвижным якорем и сердеч-

ником реле определен упором исходного положения и действием возвратной пружины, а конечный зазор – упором конечного положения и действием силы тяги электромагнита (рис. 2, а).

Срабатывание реле при появлении тока в катушке, превышающем ток срабатывания (порог срабатывания), происходит в два этапа. На первом интервале времени от момента подачи тока в катушку t_0 до момента начала движения (момента трогания) $t_{ТР}$ подвижного якоря зазор имеет неизменное начальное значение δ_H (рис. 2, б). На втором интервале от момента $t_{ТР}$ происходит движение якоря и зазор уменьшается от начального δ_H до конечного значения δ_K . При этом характер перемещения подвижных элементов реле определяется их механическими инерционными свойствами.

В соответствии с этим подходом схему измерительного тракта электромагнитного реле можно представить в виде двух инерционных элементов каскадно

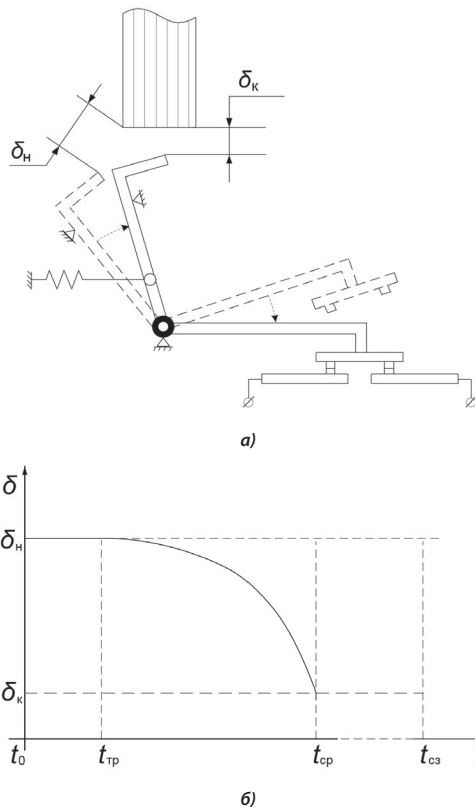


Рис. 2. Схема магнитной системы реле тока (а) и зависимость длины зазора от времени (б)

Keywords: dynamics, relay, dynamic error, relay protection, relay inertia.



Булу́чев

Александр Витальевич

В 1980 г. окончил Вологодский политехнический институт по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», инженер-электрик. В 1984 г. окончил аспирантуру и защитил кандидатскую диссертацию по разработке и исследованию отдельных узлов комплексной (микроэлектронной) системы защиты турбогенераторов. В 1998 г. окончил докторантуру и защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование защит блоков генератор-трансформатор и электродвигателей». Технический директор ООО «НПП Бреслер», профессор.



Осипова Валерия Сергеевна
 В 2020 г. окончила ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Управление в технических системах», бакалавр. Инженер ООО «НПП «Бреслер».



Грибов Максим Александрович
 В 2005 г. окончил Московский энергетический институт (ТУ) по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Директор департамента релейной защиты и режимной автоматики электрических сетей ПАО «Россети Московский регион».

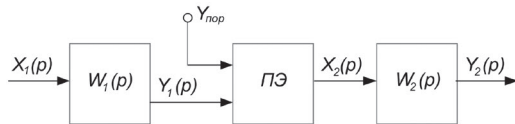


Рис. 3. Структурная схема модели реле

соединенных через пороговый элемент (ПЭ) (рис. 3). Первый из них с передаточной функцией $W_1(p)$ определяет характер изменения тока в катушке реле, а второй с передаточной функцией $W_2(p)$ – процесс перемещения подвижных элементов реле из одного положения в другое. Пороговый (безинерционный) элемент формирует входной сигнал для второго инерционного звена по признаку превышения силы тяги электромагнита реле над противодействующей силой пружины (в соответствующем масштабе $Y_{пор}$).

Передаточные функции этих звеньев в общем виде можно представить так:

$$W_1(p) = \frac{y_1(p)}{x_1(p)}; \quad W_2(p) = \frac{y_2(p)}{x_2(p)}.$$

Здесь $x_1(p)$, $x_2(p)$, $y_1(p)$, $y_2(p)$ – изображения по Лапласу, соответственно, входных и выходных сигналов элементов измерительного тракта реле.

Процесс нарастания тока и, соответственно, силы тяги электромагнита на интервале времени от t_0 до $t_{тр}$ можно представить с помощью инерционного звена первого порядка при стандартизованном единичном воздействии $x_1(p) = 1/p$:

$$y_1(p) = \frac{k_1}{p(T_1 p + 1)}$$

и соответствующей переходной характеристикой (рис. 4) [2]:

$$y_1(t) = k_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right).$$

Здесь k_1 – постоянный коэффициент передачи первого звена в установившемся режиме; T_1 – постоянная времени первого инерционного звена; $T_1 = L/R$, где L и R – эквивалентная индуктивность и активное сопротивление электрических цепей катушки реле, соответственно.

При возникновении тока в катушке реле, в воздушном зазоре между неподвижным сердечником и подвижным якорем

возникает сила тяги F , которая стремится притянуть якорь к сердечнику. Связь тока с силой тяги в общем виде выражает формула Максвелла [3]:

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 q} = \frac{\mu_0 q (wI)^2}{2\delta^2},$$

где Φ – магнитный поток в воздушном электромагнита реле;

q – площадь полюса электромагнита реле;

μ_0 – магнитная постоянная;

w и I – число витков и ток в катушке, соответственно;

δ – средняя длина воздушного зазора.

Как видно, эта зависимость квадратичная, поэтому при любом направлении тока в катушке сила тяги неотрицательна и она направлена в сторону притяжения подвижного якоря к неподвижному сердечнику.

Длительность интервала времени от t_0 до момента начала движения (трогания) $t_{тр}$ определяется, в основном, постоянной времени электрической цепи катушки реле:

$$t_{тр} = T_1 \ln \frac{k}{k - Y_{пор}},$$

где $Y_{пор}$ – порог срабатывания при котором начинается движение подвижных элементов реле.

Учитывая, что в реальных условиях срабатывание электромагнитных реле происходит при токе, приблизительно, 0,7 установившегося значения тока по переходной характеристике (рис. 4), можно принять время трогания якоря реле (интервал времени от t_0 до t_1), примерно, равным постоянной времени [4]:

$$t_{тр} \approx T_1.$$

Для реле РТ-40/6, например, можно принять $T_1 = 3,5$ мс. Это значит, что интервал времени от момента появления тока в катушке до момента трогания подвижного якоря реле составляет, примерно, 3,5 мс.

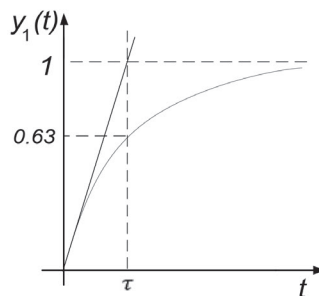


Рис. 4. Процесс нарастания тока в катушке реле

На втором интервале времени от $t_{тр}$ до $t_{ср}$ под действием превышения силы тяги электромагнита над силой противодействия пружины $F_{изб}$ подвижные элементы реле перемещаются из исходного положения δ_H в конечное δ_K .

Принято считать, что движение якоря реле определяется дифференциальным уравнением второго порядка [5]:

$$m \frac{d^2\delta}{dt^2} + n \frac{d\delta}{dt} + b\delta = F_{изб},$$

где m, n, b – постоянные коэффициенты, характеризующие ускорение, сопротивление движению и натяжение возвратной пружины, соответственно.

Следовательно, свойства реле при движении якоря можно представить передаточной функцией второго порядка:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{(T_2p+1)(T_3p+1)},$$

где k_2 – постоянный коэффициент передачи второго звена в установившемся режиме; T_2 и T_3 – постоянные времени второго инерционного звена ($T_2 \neq T_3$).

Изображение выходной величины при движении якоря и соответствующую переходную характеристику при стандартизованном единичном воздействии можно представить так [2]:

$$y_2^*(p) = x_2(p)W_2(p) = \frac{k_2}{p(T_2p+1)(T_3p+1)};$$

$$y_2^*(t) = k_2 \left(1 + \frac{T_2}{(T_3-T_2)} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{T_3}{(T_3-T_2)} e^{-\frac{t}{T_3}} \right).$$

Учитывая, что физической выходной величиной реле является воздушный зазор, который в исходном состоянии имеет наибольшее значение 1, а при срабатывании реле стремится к 0, можно записать:

$$y_2(t) = 1 - y_2^*.$$

При $k_2 = 1$:

$$y_2(t) = \frac{T_3}{(T_3-T_2)} e^{-\frac{t}{T_3}} - \frac{T_2}{(T_3-T_2)} e^{-\frac{t}{T_2}}.$$

Как видно, при $t = 0$ функция $y_2(t) = 1$, а при $t \rightarrow \infty$ функция $y_2(t)$ убывает.

В общем, выражение для динамической погрешности реле содержит две составляющие: первая обусловлена электромагнитным процессом нарастания тока в катушке, а вторая – электромеханическим процессом перемещения подвижного якоря из начального в конечное положение:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t).$$

В общем, измерение тока в защитах производится на интервале от момента возникновения тока на входе реле, превышающего порог срабатывания, до момента срабатывания защиты. В этой связи интегральное значение динамической погрешности можно оценивать применительно к этому интервалу времени.

На первом интервале динамическая погрешность имеет постоянное наибольшее значение: входное воздействие есть, а реакция выхода – нулевая. Интегральное значение погрешности при единичном входном воздействии в этих условиях определяется длительностью первого интервала:

$$\varepsilon_1^*(t) = \int_0^{t_{тр}} 1 dt = 1 \cdot t_{тр}.$$

Динамическая погрешность на втором интервале представляет собой убывающую функцию времени срабатывания защиты. Ее интегральное значение можно представить так:

$$\begin{aligned} \varepsilon_2^*(t) &= \int_{t_{тр}}^{t_{ср}} \left(\frac{T_3}{(T_3-T_2)} e^{-\frac{t}{T_3}} - \frac{T_2}{(T_3-T_2)} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) dt = \\ &= (T_2 - T_3)^{-1} \left(T_2^2 e^{-\frac{t_{ср}}{T_2}} - T_3^2 e^{-\frac{t_{ср}}{T_3}} - T_2^2 e^{-\frac{t_{тр}}{T_2}} + T_3^2 e^{-\frac{t_{тр}}{T_3}} \right). \end{aligned}$$

Чем больше время срабатывания защиты (время наблюдения за процессом $t_{ср}$), тем меньше динамическая погрешность.

Для получения более наглядной зависимости можно принять применительно ко второму интервалу $t_{тр} = 0$. Тогда:

$$\varepsilon_2^*(t) = (T_2 - T_3)^{-1} \left(T_2^2 e^{-\frac{t_{сп}}{T_2}} - T_3^2 e^{-\frac{t_{сп}}{T_3}} - T_2^2 + T_3^2 \right).$$



Шалимов

Александр Станиславович

В 2005 г. окончил электротехнический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова, кафедра электрических и электронных аппаратов. Магистр техники и технологии. Начальник отдела РЗА ООО «НПП «Динамика».

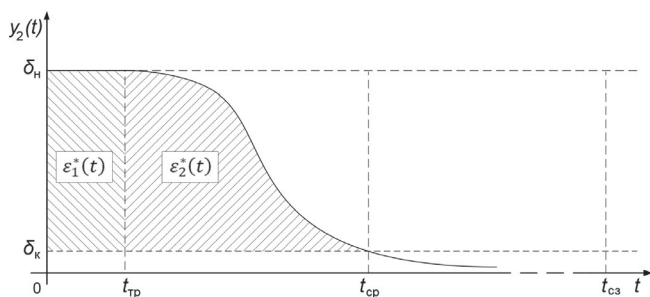


Рис. 5. Динамические погрешности реле

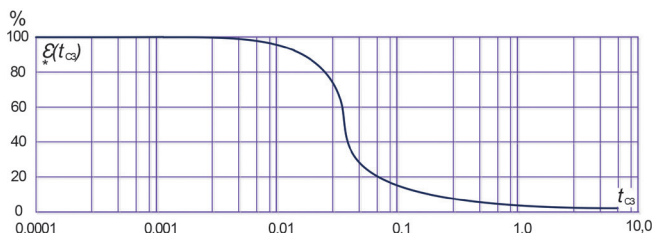


Рис. 6. График изменения интегральных значений динамических погрешностей реле

На рис. 5 в графическом виде показаны обе составляющие динамической погрешности реле.

На рис. 6 показан график изменения интегральных значений динамических погрешностей реле $\varepsilon^*(t_{c3})$ в зависимости от времени срабатывания защиты (времени наблюдения за входным сигналом):

$$\varepsilon^*(t_{c3}) = \frac{\varepsilon_1^*(t) + \varepsilon_2^*(t)}{1 \cdot t_{c3}} 100\%.$$

При этом принято: $T_1 = 0,0035$ с, $T_2 = 0,01$ с, $T_3 = 0,003$ с, что приблизительно соответствует параметрам реле РТ-40/6 при входном токе, превышающем порог срабатывания в 2 раза.

В случае срабатывания защиты в момент срабатывания реле ($t_{c3} = t_{cp}$) интегральное значение динамической погрешности составляет, примерно, 63%. По мере увеличения времени срабатывания защиты относительно времени срабатывания реле интегральное значение динамической погрешности уменьшается. Так, при расчетном времени срабатывания быстродействующих защит 0,1 с интегральное значение динамической погрешности может достигать 15-20%.

Выводы

1. Заданная идеальная функциональная связь между входом и выходом реле во времени искажается, возникает динамическая погрешность (отклонение реальной выходной величины от идеальной). Интегральное значение этой погрешности уменьшается по мере увеличения времени наблюдения за сигналом (например, установкой дополнительных элементов выдержки вре-

мени). При времени срабатывания защиты менее 0,1 с динамическая погрешность может достигать 15-20%, что в большинстве случаев может привести к неправильным действиям при высокочастотных переходных процессах.

2. На первом интервале времени от 0 до t_{tr} динамическая погрешность не изменяется во времени, оставаясь максимальной. При этом, ток на входе реле есть, а изменения выходной величины нет. Снижение интегрального значения этой составляющей динамической погрешности возможно лишь за счет уменьшения времени достижения током уровня тока срабатывания. По сути, для снижения динамической погрешности надо уменьшать постоянную времени электрической цепи катушки реле.

3. На втором интервале от t_{tr} до t_{cp} динамическая погрешность определяется инерционностью подвижных элементов реле, и уменьшается с течением времени. По сути, она зависит от соотношения между продолжительностью механических переходных процессов в элементах реле и продолжительностью наблюдения за входным сигналом. Динамическая погрешность реле очень велика при малых по длительности интервалах наблюдения, когда этот интервал соизмерим с временем срабатывания реле. В этих условиях необходимо специальное исследование поведения реле в защитах ответственных потребителей в высокочастотных переходных процессах для возможной корректировки рекомендаций по выбору параметров их срабатывания.

Литература:

1. Вашны Е. Динамика измерительных цепей. - Л.: Энергия, 1969. - 287 с.
2. Макаров И.И., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. - М.: Машиностроение, 1982. - 504 с.
3. Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория. - М.: Энергия, 1977. - 272.
4. Намитокоев К.К. Испытания аппаратов низкого напряжения. - М.: Энергоавтомиздат, 1985. - 248 с.
5. Ванин В.К., Павлов Г.М. Релейная защита на элементах вычислительной техники. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 336 с.