

УДК 621.317.63

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБМОТОК ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Докт. техн. наук БРАНОВИЦКИЙ И. И.,  
РАЗМЫСЛОВИЧ Г. И., МАЦКЕВИЧ П. Д.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси*

Надежность и долговечность электроэнергетического оборудования в значительной степени определяются состоянием его обмоток, например вероятностью образования в них витковых замыканий. Появление последних обычно связано с развитием внутренних дефектов изоляции благодаря воздействию вибраций, температуры и других факторов, вызванных условиями эксплуатации. Наличие короткозамкнутых контуров (КЗК), сцепленных с основным магнитным потоком в сердечнике, существенно ухудшает технические характеристики электрооборудования и надежность его работы. Из сказанного вытекает практическая необходимость и важность проведения работ по изучению влияния КЗК на электрические процессы в обмотках электрооборудования, разработке и развитию методов и средств их диагностирования.

Известен ряд методов и средств выявления КЗК, в том числе: Z-метод, где контролируемым параметром является комплексное сопротивление обмотки; импульсный метод получения испытательного напряжения – дефектная катушка определяется по наличию ЭДС самоиндукции; векторный метод, где контролируемым параметром является сдвиг фаз между сетевым напряжением и током в измерительной катушке, и другие. Для повышения чувствительности методов к КЗК осуществляют: подбор частоты испытательного импульса, близкой к резонансной частоте испытуемой обмотки [1]; задание оптимального значения тока и частоты в частотно-задающей цепи, что приводит к росту чувствительности измеряемого сигнала к КЗК в фазных обмотках и отстройке от влияния технологического разброса их параметров [2]; компенсацию различия емкостных параметров сравниваемых фазных обмоток через фазовую подстройку колебательного контура [3]; построение импульсной последовательности в моменты перехода колебательного процесса через нуль [4, 5] и т. д.

Однако рассмотренные и другие используемые методы, а также реализующие их средства диагностики обмоток электрооборудования являются,

как правило, системами индикаторного типа, т. е. работают в режиме «да – нет», и требуют повышения информативности и чувствительности к выявляемому дефекту. Это обуславливает необходимость разработки и развития методов и средств для перехода к количественным методам диагностирования, что позволило бы более полно идентифицировать дефекты обмоток, в том числе повысить их выявляемость, оценивать характер витковых замыканий, их местонахождение и т. д. В данной работе изложены методика и результаты исследований, содержащие дополнительную информацию о влиянии КЗК на переходные электрические процессы в обмотках электродвигателей, и приведены сведения о разработанном с учетом этих результатов приборе для выявления витковых замыканий. Указанный прибор функционально позволяет измерять значения основных параметров переходных процессов в обмотках и изменение этих значений, обусловленное КЗК.

Рассмотрим колебательный контур  $C_1L_1R_1C_2L_2R_2$ , где  $L_2$  – испытуемая, например, статорная обмотка электродвигателя;  $R_2$  – токосъемный резистор;  $C_2$  – высоковольтный конденсатор;  $R_1$  – токовый резистор;  $L_1$  – демпфирующая катушка;  $C_1$  – дополнительный конденсатор (рис. 1). Определим переходные значения тока и напряжения в указанной цепи при воздействии на нее напряжения синусоидальной формы при коммутации ключа К из положения 1 в 2. Пусть испытуемая обмотка  $L_2$  содержит КЗК. Это, как известно, приводит к уменьшению ее индуктивности  $L_2$  на некоторую величину  $\Delta L$ . До переключения ключа К из положения 1 в 2 в цепи протекает синусоидальный ток

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (1)$$

Напряжение на обкладках конденсатора  $C_2$  изменяется по закону

$$U_{C_2} = X_{C_2} I_m \sin(\omega t - \varphi - 90^\circ). \quad (2)$$

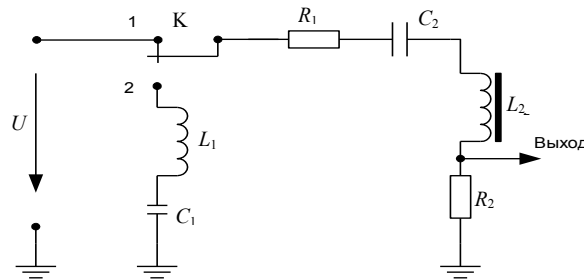


Рис. 1. Схема возбуждения затухающих электрических колебаний

Переходный процесс в контуре  $C_1L_1R_1C_2L_2R_2$  после переключения ключа К в положение 2 можно описать законом Ома в операторной форме. Пусть в момент времени  $t_0$  ток и напряжение переходного процесса соответственно равны  $i_0$  и  $U_{C_2}^0$ . Внешнего источника ЭДС в контуре нет, поэтому внутренние ЭДС запишем в виде

$$E \left( \frac{1}{p} \right) = \left( C_2 - \Delta L \right) \dot{i}_0 - \frac{U_{C_2}^0}{p}. \quad (3)$$

Операторное сопротивление контура

$$Z \stackrel{\sim}{=} R_1 + R_2 + p(L_1 + L_2 - \Delta L) \frac{C_1 + C_2}{pC_1C_2}. \quad (4)$$

Имея в виду, что  $L_2 - \Delta L \gg L_1$ , и вводя обозначения  $R = R_1 + R_2$ ,  $C = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}$ , закон Ома в операторной форме запишем

$$I \stackrel{\sim}{=} \frac{E \stackrel{\sim}{=} U_{C_2}^0 - C p \Delta L i_0}{Z \stackrel{\sim}{=} RCp + C(L_2 - \Delta L)p^2 + 1}. \quad (5)$$

Для нахождения из (5) образа тока  $I \stackrel{\sim}{=}$  применима вторая теорема разложения [6]

$$I \stackrel{\sim}{=} \frac{P \stackrel{\sim}{=} F \stackrel{\sim}{=}}{F \stackrel{\sim}{=} 0} = \sum_{k=1}^2 A_k e^{p_k t}, \quad (6)$$

где  $A_k = \frac{P \stackrel{\sim}{=} F \stackrel{\sim}{=} F' \stackrel{\sim}{=} \frac{dF \stackrel{\sim}{=}}{dp}$ ,  $p_k$  – корни знаменателя в (5). Решая уравнение  $F \stackrel{\sim}{=} 0$  и имея в виду, что параметры колебательного контура подобраны таким образом, что выполняется условие  $(CR)^2 \ll 4CL_2$ , получим комплексные выражения для  $p_1$  и  $p_2$  [7]:

$$p_1 = -\frac{R}{2(L_2 - \Delta L)} + \frac{j}{\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} \quad (7)$$

$$p_2 = -\frac{R}{2(L_2 - \Delta L)} - \frac{j}{\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} \quad (8)$$

где  $j$  – мнимая единица.

Вычисляя  $A_k$  с учетом (7) и (8), получим из (6) выражение для оригинала тока переходного процесса

$$i \stackrel{\sim}{=} \frac{P \stackrel{\sim}{=} F \stackrel{\sim}{=} F' \stackrel{\sim}{=} \frac{dF \stackrel{\sim}{=}}{dp} e^{p_1 t} + \frac{P \stackrel{\sim}{=} F \stackrel{\sim}{=} F' \stackrel{\sim}{=} \frac{dF \stackrel{\sim}{=}}{dp} e^{p_2 t} = e^{-\frac{R}{2(L_2 - \Delta L)} t} \left( i_0 \cos \frac{t}{\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} - \left( \frac{CRi_0}{2\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} + \frac{U_{C_2}^0 C}{\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} \right) \sin \frac{t}{\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} \right). \quad (9)$$

В случае, когда обмотка  $L_2$  не имеет КЗК, выражение (9) упрощается и имеет вид

$$i \stackrel{\sim}{=} e^{-\frac{R}{2L_2} t} \left( i_0 \cos \frac{t}{\sqrt{CL_2}} - \left( \sqrt{\frac{C}{L_2}} \frac{R}{2} i_0 + \sqrt{\frac{C}{L_2}} U_{C_2}^0 \right) \sin \frac{t}{\sqrt{CL_2}} \right). \quad (10)$$

Сравнение (9) и (10) показывает, что КЗК уменьшает характеристическое сопротивление  $\left(\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}\right)$  испытуемой катушки, а значит, и добротность  $\left(Q = \frac{\rho}{R}\right)$  всего колебательного контура. Частота свободных колебаний контура  $\omega = \frac{1}{\sqrt{CL}}$ , как и декремент затухания  $\delta = \frac{R}{2L}$ , увеличивается.

В результате скорость затухания переходного процесса в рассматриваемом колебательном контуре в целом растет.

С учетом изложенного анализа было экспериментально исследовано влияние КЗК на переходные процессы в обмотках статоров трех- и однофазных электродвигателей. В каждый паз статора дополнительно вкладывался отдельный виток, который можно было замыкать и размыкать, создавая разное число КЗК в обмотке. При этом испытуемая обмотка статора индуктивностью  $L_2$  была включена в колебательный контур  $C_1L_1R_1C_2L_2R_2$  (рис. 1), в котором возбуждались свободные колебания. Осциллограммы затухающих колебаний в указанном контуре при различном числе КЗК в обмотке  $L_2$  и при их отсутствии представлены на рис. 2. Программно реализуемые методики, созданные при проведении исследований, обеспечивали нахождение и визуализацию разностного сигнала, получаемого при взаимном вычитании кривых затухающих колебаний в отсутствие и при наличии КЗК. На рис. 3 представлены осциллограммы разностных сигналов при различном числе КЗК в обмотке  $L_2$  статора электродвигателя. Из рис. 3 видно, что кривые разностных сигналов, непосредственно обусловленных влиянием КЗК на затухающие колебания в контуре, имеют максимумы. Это области максимальной чувствительности переходных процессов в колебательном контуре к влиянию КЗК.

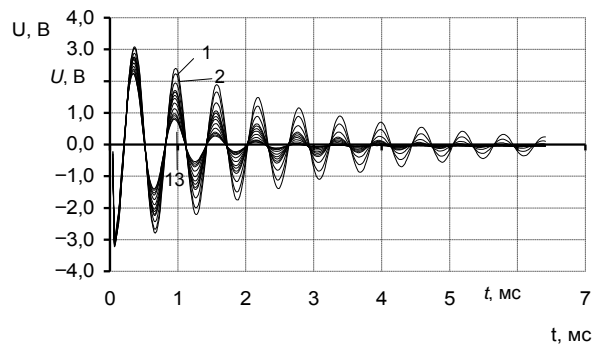


Рис. 2. Затухающие колебания в контуре при:  
1 – отсутствии КЗК; 2 – 1 КЗК; ...; 13 – 12 КЗК

На основе проведенных исследований и анализа их результатов, в том числе представленных выше, была разработана методика диагностирования обмоток одно- и трехфазных электродвигателей, применимая и для диагностирования электрооборудования более широкой номенклатуры. Указанная методика диагностирования реализована на аппаратном и программном уровнях в приборе ДО-1 (рис. 4).

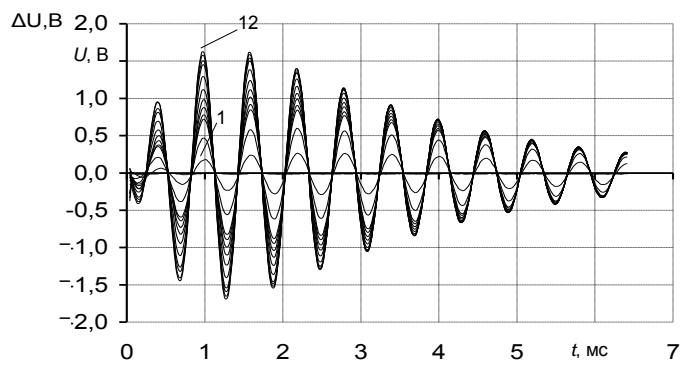


Рис. 3. Разностный сигнал затухающих колебаний в контуре при:  
1 – 1 КЗК; ...; 12 – 12 КЗК



Рис. 4. Прибор для диагностики обмоток электрооборудования ДО-1

Прибор имеет встроенный микроконтроллер, который осуществляет управление системой возбуждения переходных процессов, считывания данных с АЦП, обработки первичной информации, ее сохранения в энергонезависимой памяти, вывода результатов диагностирования на ЖКИ, а также обеспечение связью с персональным компьютером. Методически прибор ДО-1 позволяет проводить визуальное сравнение и анализ кривых затухающих колебаний в испытуемых обмотках с эталонными, записанными в память прибора, а также их разностных сигналов. При этом на табло могут отображаться численные значения основных параметров затухающих колебаний и разностного сигнала, в том числе в области максимальной чувствительности переходных процессов к влиянию КЗК. Все это существенно повышает чувствительность и информативность прибора, так как позволяет качественно и количественно анализировать как затухающие колебания в целом, так и разностный сигнал, т. е. их составляющую, непосредственно обусловленную влиянием КЗК.

## ВЫВОДЫ

1. Расчетным путем и экспериментально показано, что наличие короткозамкнутых витков приводит к росту скорости затухания переходных процессов в обмотках электродвигателей. При этом скорость затухания указанных процессов и величина их разностного сигнала, получаемого при взаимном вычитании кривых затухающих колебаний в отсутствие и при

наличии короткозамкнутых витков, растут с увеличением числа последних в испытуемых обмотках. Установлено, что кривые разностного сигнала имеют на временной оси максимумы, являющиеся областями наибольшей чувствительности переходных процессов к влиянию короткозамкнутых витков.

2. На основе результатов проведенных исследований разработана методика диагностирования обмоток одно- и трехфазных электродвигателей, применимая и для диагностирования электрооборудования более широкой номенклатуры. Указанная методика реализована в созданном приборе ДО-1, позволяющем проводить визуальное сравнение и количественный анализ кривых затухающих колебаний в испытуемых обмотках с эталонными, записанными в память прибора, а также их разностных сигналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С п о с о б контроля качества изоляции обмоток: а. с. 1404986 СССР, МКИ G 01R 31/06 / В. К. Горбунов, С. И. Крюков, Н. И. Суворов и В. Г. Тихобаев (СССР). – № 4152227/24-21; заявл. 26.11.86; опубл. 23.06.88 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 23. – С. 203.
2. У с т р о й с т в о для контроля фазных обмоток электрических машин: пат. № 2054687 РФ, МКИ G 01 R 31/06 / А. М. Марков, В. Ф. Лучук, И. С. Шукин (СССР). – № 5033990/07; заявл. 25.03.92; опубл. 20.02.96 // Открытия. Изобрет. – 1996. – № 5. – С. 202.
3. С п о с о б контроля изоляции обмоток статоров трехфазных электрических двигателей и устройство для его осуществления: а. с. 1797082 СССР, МКИ G 01 R 31/06 / О. А. Алекперов, Д. О. Оруджев, Н. Х. Худиев (СССР). – № 4833070/21; заявл. 24.07.91; опубл. 12.04.92 // Открытия. Изобрет. – 1993. – С. 199.
4. С п о с о б контроля витковых замыканий в обмотках электрических машин: а. с. 1592809 СССР, МКИ G 01 R 31/06 / В. Г. Тихобаев, Ю. К. Горбунов, В. И. Гуков, С. И. Крюков, Б. К. Левин, Я. Я. Соколов, Ю. Е. Городецкий (СССР). – № 4296629/24-21; заявл. 19.08.87; опубл. 15.09.90 // Открытия. Изобрет. – 1990. – № 34. – С. 216.
5. С п о с о б обнаружения виткового замыкания в обмотке якоря электрической машины: а. с. 1465829 СССР, МКИ G 01 R 31/06 / В. Д. Шевеленко, Ю. В. Суходолов, А. И. Мельников (СССР). – № 4117600/24-21; заявл. 16.09.86; опубл. 15.03.89 // Открытия. Изобрет. – 1989. – № 10. – С. 203.
6. В о д н е в, В. Т. Основные математические формулы / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, Н. Ф. Наумович. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 256 с.
7. К а м к е, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

Поступила 7.07.2006