

УДК 621. 316.3.048 (075.8)

ЁМКОСТНОЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОПИТКИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Смирнов Геннадий Васильевич¹,
smirnov@main.tusur.ru

Смирнов Дмитрий Геннадьевич¹,
smirnov@main.tusur.ru

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634045, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Актуальность работы обусловлена тем, что основная часть технологических процессов практически во всех отраслях промышленности, в том числе связанных с добычей, транспортировкой, переработкой минерального сырья, не может быть реализована без использования электродвигателей. Высокая надежность работы этих машин обеспечивает безаварийность и является гарантом безопасности людей в указанных отраслях промышленности. Показатели надежности работы электрических машин зависят от состояния изоляции обмоток, которое в значительной мере определяется насыщенностью полостей обмотки пропиточным составом, проникшим в них при пропитке. Совершенствование же технологии пропитки обмоток электрических машин, повышение их качества и надежности изоляции, невозможно реализовать без надлежащих методов контроля качества пропитки.

Цель работы: исследование применимости электрической ёмкости обмоток относительно корпуса для контроля качества пропитки обмоток электрических машин.

Методы исследования: электрические измерения ёмкостных характеристик обмоток электрических машин; измерения геометрических параметров компонент изоляции обмоток; метрологические методы оценки погрешностей косвенных измерений.

Результаты. Доказана возможность определения коэффициентов пропитки путем измерения ёмкостных характеристик обмотки относительно ее корпуса. Проведено обоснование критериев для оценки качества пропитки и получены формулы для их расчета. Достоверность результатов подтверждена экспериментально. Осуществлён подробный анализ метрологических характеристик предлагаемого способа. Реальные примеры показывают, что использование предлагаемого способа позволяет обеспечить высокую точность определения коэффициента пропитки обмоток статоров электрических машин. Результирующая косвенная ошибка определения коэффициентов пропитки не превышает 3,8 %.

Ключевые слова:

Пропитка, компаунд, электрическая ёмкость, диэлектрическая проницаемость, магнитный сердечник, конденсатор, статистические смеси.

Введение

Самым ненадежным узлом электрической машины является изоляция обмоток электрических машин [1, 2]. При этом убытки обусловлены не только большими затратами на ремонт или замену отказавших электродвигателей, но и простоем оборудования, в котором была задействована отказавшая электрическая машина. Надёжность изоляции обмоток электрических машин во многом зависит от качества изоляции обмоточного провода, от вида и состояния намоточного оборудования и технологии пропитки [3–6]. Именно в процессе пропитки обмоток пленкой пропиточного состава скрываются дефекты в витковой, межфазной и корпусной изоляции. В результате пропитки улучшаются не только электроизоляционные свойства обмоток, но возрастает и их теплопроводность, влагостойкость, монолитность и другие характеристики, повышающие надежность изоляции обмоток.

Содержание влаги в воздухе, высокие и низкие температуры воздуха оказывают неблагоприятное воздействие на изоляцию обмоток электроприводов, ускоряя процесс изнашивания полимерных материалов, снижая их электрическую прочность [7, 8]. Процесс проникновения влаги в обмотки

электрических машин усугубляется при их плохой пропитке, когда степень заполненности межвитковых и прикорпусных полостей пропиточным составом низка. При этом в изоляции обмоток образуются многочисленные поры и капилляры, в которые проникает и адсорбируется влага, что приводит к ускоренному старению изоляции обмоток и значительному повышению вероятности их отказа [9].

Большую опасность представляет недопустимый нагрев обмоток электрических машин [8], вызываемый длительными перегрузками, ухудшением условий охлаждения электрооборудования, обрывом одной из фаз сети и работой электрооборудования в неполнофазном режиме, отклонениями напряжения выше допустимых пределов, частыми или затянувшимися пусками электродвигателей, а также их опрокидыванием и заклиниванием ротора и др. Важное значение для обеспечения надежности и безопасности работы имеет периодический контроль сопротивления изоляции обмоток, величина и скорость изменения которого при эксплуатации помимо прочих факторов зависит также и от качества пропитки обмоток.

Перед монтажом электродвигателя в промышленные установки его необходимо тщательно ос-

мотреть, при помощи мегомметра проверить сопротивление изоляции между фазами и между фазами и корпусом. Для проверки изоляции электродвигателей с рабочим напряжением обмоток 380/660 В рекомендуется пользоваться мегомметром на напряжение 1 кВ. Измеренное сопротивление изоляции между корпусом и обмоткой электродвигателя должно быть не менее 1,5 МОм. Однако высокое исходное сопротивление изоляции обмоток еще не является гарантией её высокой надежности. Это обусловлено тем, что при низкой степени заполнения межвитковых и прикорпусных полостей обмоток пропиточным составом в воздушных полостях незаполненной пропиточным составом изоляции обмотки может конденсироваться влага, пыль, различные химические вещества, что вызовет ускоренное снижение сопротивления изоляции.

Кроме приведенных выше причин снижения качества изоляции обмоток, существуют еще так называемое естественной старение и износ изоляции, заключающийся в ухудшении состояния из-за воздействия окружающей среды и выделяемого обмоткой тепла, которое зависит от теплопроводности пропиточного состава и качества пропитки [10]. Вследствие нарушения изоляции происходит витковое замыкание. Если это замыкание произошло в обмотке якоря машины, то при вращении его в магнитном поле в замкнутых накоротко витках якоря, вследствие их малого сопротивления, возникнут большие токи и через несколько десятков секунд короткого замыкания изоляция обуглится. Кроме виткового замыкания, часто происходит замыкание между секциями обмотки. Такое замыкание может возникнуть на коллекторных пластинах вследствие их деформации, заполнения промежутков между пластинами проводящей влагой или проводящей пылью.

Пропитка обмоток приводит к повышению их монолитности, механической прочности, влагостойкости и теплопроводности, что в значительной мере приводит к повышению надежности, безотказности и безаварийности работы [11].

Совершенствование технологии пропитки, оперативное устранение технологических причин, приводящих к некачественной пропитке, невозможно реализовать без разработки и внедрения неразрушающих методов контроля качества указанной технологической операции.

Теоретическая часть

Попытки найти простой и достоверный способ контроля пропитки предпринимались относительно давно. В частности, в работе [12] был предложен ёмкостной метод контроля качества пропитки обмоток электрических машин, который заключался в измерении ёмкости обмотки относительно магнитного сердечника до пропитки $C_{ид}$ и ёмкости относительно магнитного сердечника после пропитки и сушки обмотки $C_{ин}$. Качество пропитки было

предложено оценивать по коэффициенту пропитки $K_{пр}$, определяемому из выражения

$$K_{пр} = \frac{C_{ин}}{C_{ид}}. \quad (1)$$

Недостатком этого способа является низкая точность контроля, так как величины $C_{ид}$ и $C_{ин}$ зависят от расположения витков в обмотке, а также от того, как распределится состав по корпусным полостям обмотки. При попадании одинакового количества (массы) пропиточного состава в две разные однотипные обмотки одной партии $K_{пр}$, определяемый по формуле (1), может давать существенно отличающиеся друг от друга значения. Поэтому формула (1) не позволяет объективно судить о насыщенности полостей обмотки пропиточным составом. Кроме того, коэффициент пропитки, определяемый выражением (1), не дает представления о степени заполненности объема пор и капилляров в обмотке пропиточным составом.

В работе [13] для оценки наполненности обмотки пропиточным составом использовался метод, основанный на измерении ёмкости специально вставленного в обмотку центрального проводника относительно магнитного корпуса (магнитного сердечника) статора до и после пропитки. Необходимым условием использования данного метода является наличие центрального проводника, изолированного от остальных проводников обмотки, который в реальных обмотках электрических машин отсутствует. Поэтому применение данного метода требует изменения конструкции контролируемого изделия или подготовки имитационных макетов. Кроме того, метод обладает низкой точностью, поскольку измеряемая величина ёмкости проводника относительно корпуса, как до пропитки, так и после неё, мала и составляет лишь десятки пикофарад. Малое значение указанной ёмкости предъявляет высокие требования к точности используемых средств измерения и приводит к большим погрешностям.

Рассмотрим вопрос о возможности использования ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника в качестве информационного фактора, с помощью которого можно определить степень заполненности (насыщенности) пропиточным составом полостей обмотки.

Основываясь на представлении ёмкости обмотки относительно корпуса изделия в виде слоистой системы (см. рисунок) и постоянстве отношения ёмкостей обмотки после погружения ее в диэлектрическую жидкость к ёмкости этой же обмотки до погружения, покажем, каким образом можно найти $K_{пр}$ [14, 15].

На рисунке *a* представлено сечение обмотки в одном из пазов. Оно состоит из проводов 1, покрытых слоем эмали 2, корпусной изоляции 3, поверхности паза 4, воздушных полостей между поверхностью обмотки и корпусной изоляцией 5 и воздушных полостей между корпусной изоляцией и

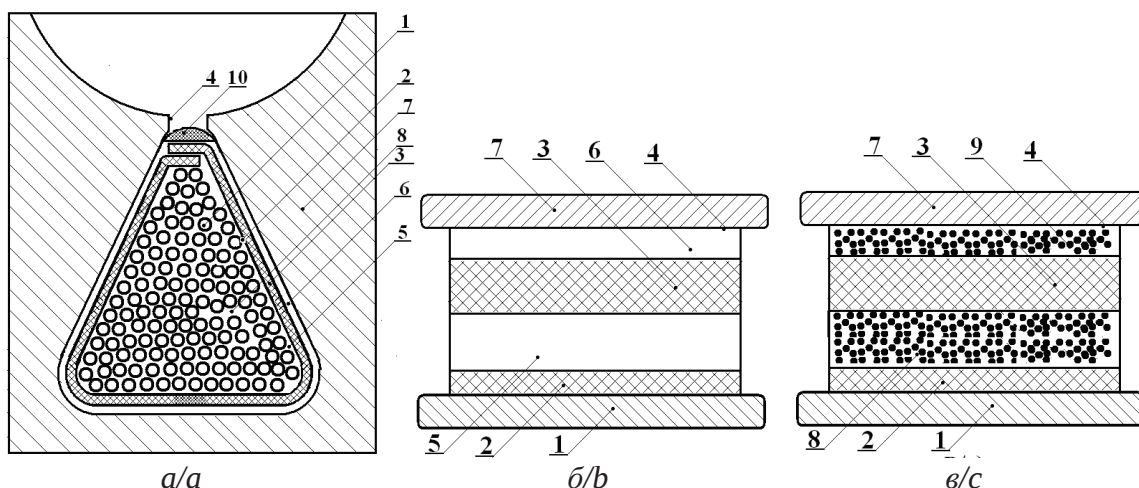


Рисунок. Сечение обмотки в одном из пазов (а) и представление её корпусных полостей в виде слоистого конденсатора до пропитки (б) и после неё (в). 1 – провод; 2 – эмалевая изоляция; 3 – диэлектрическая пленка (корпусная изоляция); 4 – поверхность паза; 5 – воздушные полости между поверхностью обмотки и изоляционной диэлектрической пленкой; 6 – воздушные полости между изоляционной диэлектрической пленкой и поверхностью паза; 7 – магнитный сердечник (корпус); 8, 9 – полости обмотки 5, 6 после пропитки и сушки; 10 – клин

Figure. Cross section of the winding in the groove (a) and its presentation in the form of multilayer capacitors before (b) and after (c) impregnation. 1 is the wire; 2 is the enamel insulation; 3 is the dielectric insulating film; 4 is the groove surface; 5 is the air cavities between the coil surface and the insulating dielectric film; 6 is the air cavity between the insulating dielectric film and the surface of the groove; 7 is the magnetic core (body); 8, 9 are the windings 5, 6 hollows after impregnation and drying; 10 is the wedge

поверхностью паза 6, а также из магнитного сердечника (корпуса) 7.

Ёмкость обмотки относительно корпуса, которым является магнитный сердечник статора электрической машины, можно представить в виде слоистого плоского конденсатора до пропитки (рисунок, б) и после неё (рисунок, в). На рисунке б и в введены те же обозначения, что и на сечении обмотки, только на рисунке в вместо позиций 5 и 6 введены позиции 8 и 9, так как воздушные полости обмотки 5 и 6 после пропитки и сушки частично заполняются пропиточным составом. В связи с этим позициями 8 и 9 обозначены те же полости 5 и 6, но заполненные статистически распределенными по этим полостям частицами пропиточного состава. На рисунке, изображающем сечение обмотки в одном из пазов, цифрой 10 обозначен клин обмотки. Ёмкость непропитанной обмотки относительно корпуса изделия состоит из последовательно соединенных слоев (рисунок, б): эмалевой изоляции провода 2, корпусной изоляции 3, воздушной прослойки 5 между поверхностью обмотки и корпусной изоляцией, воздушной прослойки 6 между корпусной изоляцией и поверхностью паза изделия. Обозначим емкости слоев, соответственно, C_1, C_2, C_3, C_4 . С учетом того, что слои 2, 3, 5, 6 соединены последовательно, емкость любой i -й непропитанной обмотки можно представить в виде выражения

$$\frac{1}{C_{ид}} = \frac{1}{C_{i1}} + \frac{1}{C_{i2}} + \frac{1}{C_{i3}} + \frac{1}{C_{i4}}. \quad (2)$$

Формулу (2) можно преобразовать к виду

$$\frac{1}{C_{идп}} = \frac{1}{C_{iэк}} + \frac{1}{C_{iв}}, \quad (3)$$

где $C_{iэк} = \frac{C_{i1}C_{i3}}{C_{i1} + C_{i3}}$ – эквивалентная емкость последовательно соединенных слоев эмалевой 2 и корпусной 3 изоляции;

$C_{iв} = \frac{C_{i2}C_{i4}}{C_{i2} + C_{i4}}$ – эквивалентная емкость воздушных прослоек 5 и 6.

Эквивалентную емкость воздушных прослоек $C_{iв}$ можно представить в виде произведения геометрического фактора g_i на диэлектрическую проницаемость воздуха ϵ_v :

$$C_{iв} = g_i \epsilon_v. \quad (4)$$

С учетом введенных обозначений формулу (3) можно представить в виде

$$\frac{1}{C_{идп}} = \frac{1}{C_{iэк}} + \frac{1}{g_i \epsilon_v}. \quad (5)$$

При пропитке обмотки величины $C_{iэк}$ и g_i остаются неизвестными, а изменяется только величина $C_{iв}$ в результате замещения воздуха в полостях обмотки пропиточным составом (рисунок, в, слои 7 и 8).

Если представить пропиточный состав, оставшийся в обмотке после пропитки, в виде статистической смеси, состоящей из пропиточного состава объёмом $V_{ин}$ и пузырьков воздуха в нем, то емкость обмотки относительно корпуса изделия после пропитки можно представить в виде

$$\frac{1}{C_{ин}} = \frac{1}{C_{iэк}} + \frac{1}{g_i \varepsilon_i^*}, \quad (6)$$

где ε_i^* – эквивалентная диэлектрическая проницаемость статистической смеси [16–19].

Значение ε_i^* можно определить из формулы Лихтенекера–Ротера [20]:

$$\ln \varepsilon_i^* = \frac{V_{ин}}{V} \ln \varepsilon_{л} - \frac{V - V_{ин}}{V} \ln \varepsilon_{в}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{л}$ – диэлектрическая проницаемость пропиточного состава.

Учитывая, что диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_{в}=1$, получим:

$$\ln \varepsilon_i^* = \frac{V_{ин}}{V} \ln \varepsilon_{л} = K_{пр} \ln \varepsilon_{л}, \quad (8)$$

где V – суммарный объем прикорпусных воздушных полостей 5 и 6 до пропитки.

Из формулы (8) следует, что

$$K_{пр} = \frac{1}{\ln \varepsilon_{л}} \ln \varepsilon_i^*. \quad (9)$$

Из уравнения (6) получаем:

$$\varepsilon_i^* = \frac{C_{ин} C_{iэк}}{g_i (C_{iэк} - C_{ин})}. \quad (10)$$

Однако в выражении (10) неизвестными величинами являются $C_{iэк}$ и g_i . Эти величины можно найти в каждой из i -й контролируемых обмоток, воспользовавшись примечательным свойством, которое заключается в следующем. Ёмкости непропитанных обмоток относительно магнитного сердечника имеют большой разброс. Однако, несмотря на это, если осуществить имитацию 100%-й пропитки путем погружения изделий в диэлектрическую невязкую жидкость с известной диэлектрической проницаемостью ε_1 , то отношение ёмкостей обмоток относительно корпуса после имитации в них 100%-й пропитки к ёмкостям тех же обмоток до пропитки является постоянной величиной $A = \frac{C_{i,100\%}}{C_{ид}} = \text{const}$, значение которой зависит

только от величины ε_1 .

Поскольку величина A не зависит от первоначального значения емкостей обмотки относительно корпуса и одинакова для всех однотипных изделий при погружении их в диэлектрическую жидкость с проницаемостью ε_1 , то для нахождения величины A достаточно измерить емкости относительно корпуса до погружения в жидкость и после погружения в нее только у одной из контролируемых обмоток.

Подставив значение величины A в выражения (5), (6) и учитывая, что для любой из контролируемых обмоток величина емкости относительно корпуса, измеренная после погружения обмотки в калибровочную диэлектрическую жидкость $C_{i,100\%}$, связана с емкостью этой же обмотки до погружения в жидкость $C_{ид}$ соотношением $C_{i,100\%} = AC_{ид}$, получим:

$$g_i = \frac{C_{ид} A (\varepsilon_1 - 1)}{(A - 1) \varepsilon_1}; \quad (11)$$

$$C_{iэк} = \frac{C_{ид} A (\varepsilon_1 - 1)}{(\varepsilon_1 - A)}. \quad (12)$$

Подставив уравнения (11) и (12) в (9), получим:

$$K_{имп} = \frac{1}{\ln \varepsilon_{л}} \ln \frac{C_{ин} \varepsilon_1 (A - 1)}{AC_{ид} (\varepsilon_1 - 1) - C_{ин} (\varepsilon_1 - A)}. \quad (13)$$

Расчет методических погрешностей контроля

Оценим погрешности в определении коэффициентов пропитки прикорпусных полостей обмотки $K_{имп}$.

В соответствии с выражением (13) погрешность в определении можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{\Delta K_{имп}}{K_{имп}} = & B_1 \frac{\Delta \varepsilon_{л}}{\varepsilon_{л}} + B_2 \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \\ & + B_3 \frac{\Delta C_{ин}}{C_{ин}} + B_4 \frac{\Delta C_{ид}}{C_{ид}} + B_5 \frac{\Delta A}{A}, \end{aligned} \quad (14)$$

где B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 – коэффициенты влияния на погрешность составляющих $\varepsilon_{л}, \varepsilon_1, C_{ин}, C_{ид}, A$ соответственно. Значения коэффициентов влияния, в соответствии с [21, 22], определяются по формуле

$$B_i = \left| \frac{\partial K_{имп}}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{K_{имп}} \right|, \quad (15)$$

где x_i – параметры, соответственно, $\varepsilon_{л}, \varepsilon_1, C_{ин}, C_{ид}, A$; $i=1, 2, 3, 4, 5$.

С учетом выражений (13) и (15) получим:

$$B_1 = \left| \frac{-1}{\ln \varepsilon_{л}} \right|; \quad (16)$$

$$B_2 = \left| \frac{A(C_{ин} - C_{ид})}{\left([AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \ln \frac{\varepsilon_1 C_{ин} (A - 1)}{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)} \right) \right|; \quad (17)$$

$$B_3 = \left| \frac{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1)}{\left([AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \ln \frac{\varepsilon_1 C_{ин} (A - 1)}{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)} \right) \right|; \quad (18)$$

$$B_4 = \left| \frac{-AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1)}{\left([AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \ln \frac{\varepsilon_1 C_{ин} (A - 1)}{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)} \right) \right|; \quad (19)$$

$$B_5 = \left| \frac{A(C_{ид} - C_{ин})(\varepsilon_1 - 1)}{\left((A - 1)[AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \ln \frac{\varepsilon_1 C_{ин} (A - 1)}{AC_{ид}(\varepsilon_1 - 1) - C_{ин}(\varepsilon_1 - A)} \right) \right|. \quad (20)$$

Для определения численных значений коэффициентов влияния B_1, B_2, B_3, B_4 и B_5 необходимо задаться численными значениями входящих в формулу (14) параметров. Диэлектрическая проницаемость ε_d компаунда КП-34 в отвержденном состоянии равна 3,3. Диэлектрическая проницаемость керосина ε_1 , использованного нами для имитации 100%-й пропитки равна 2,074. Эти величины были измерены по методике, рекомендованной ГОСТ 64334–71. Для двигателей 4АИР112М4 номинальные значения $C_{ид}$ и $C_{ин}$ определялись по статистическим данным, набранным для этих электродвигателей на заводе ПО «Сибэлектромотор». Номинальные среднестатистические значения $C_{ид}$ и $C_{ин}$ были равны, соответственно, 2957 пФ и 4192 пФ. Величина A определялась по результатам статистических исследований и была равна 1,553.

Подставив численные значения параметров в формулы (16)–(20), определяющие коэффициенты влияния, получим: $B_1=0,838, B_2=1,124, B_3=4,995, B_4=4,995, B_5=2,464$.

Оценим величины $\frac{\Delta\varepsilon_d}{\varepsilon_d}, \frac{\Delta\varepsilon_1}{\varepsilon_1}, \frac{\Delta C_{ин}}{C_{ин}}, \frac{\Delta C_{ид}}{C_{ид}}, \frac{\Delta A}{A}$.

Диэлектрическая проницаемость пропиточного состава КП-34 в отвержденном состоянии измерялась по ГОСТ 64334–71 на трехэлектродной зажимной ячейке с помощью цифрового измерителя емкости Е8–4. При подготовке образцов компаунда к измерению диэлектрической проницаемости продолжительность полимеризации в толстом (4–5 мм) слое осуществлялась при температуре $(125 \pm 5)^\circ\text{C}$ не более 3 минут. Диэлектрическая проницаемость определялась по формуле

$$\varepsilon_d = \frac{C_{яп}}{C_{я}}, \quad (21)$$

где $C_{я}, C_{яп}$ – емкости ячейки соответственно без образца пропиточного состава и с ним. В соответствии с выражением (14) можно записать:

$$\frac{\Delta\varepsilon_d}{\varepsilon_d} = B_6 \frac{\Delta C_{я}}{C_{я}} + B_7 \frac{\Delta C_{яп}}{C_{яп}}, \quad (22)$$

где B_6 и B_7 – коэффициенты влияния, определяемые по формуле (15).

В соответствии с выражением (15) $B_6=B_7=1$.

Величины $C_{я}$ и $C_{яп}$ были равны, соответственно, 31,46 и 103,82 пФ.

В соответствии с паспортными данными на измеритель емкости Е8–4 погрешность S определяется по формуле

$$\Delta C = (0,001C + 0,02 \text{ пФ} + 1 \text{ ед. счета}), \quad (23)$$

где C – измеренная величина емкости.

Подставив в формулу (23) значения емкостей $C_{я}$ и $C_{яп}$, получим:

$$\Delta C_{я} = 6,145 \cdot 10^{-2} \text{ пФ};$$

$$\Delta C_{яп} = 2,24 \cdot 10^{-1} \text{ пФ}.$$

Следовательно, величина относительной погрешности в измерении ε_d , в соответствии с (22), равна:

$$\frac{\Delta\varepsilon_d}{\varepsilon_d} = \frac{6,145 \cdot 10^{-2}}{31,46} + \frac{2,24 \cdot 10^{-2}}{103,82} = 0,00216.$$

Величина относительной погрешности измерения диэлектрической проницаемости калибровочной жидкости (керосина) находится по аналогичной формуле:

$$\frac{\Delta\varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \frac{6,145 \cdot 10^{-2}}{31,46} + \frac{9,5277 \cdot 10^{-2}}{65,27} = 0,00341.$$

Абсолютные погрешности в измерении емкостей обмотки $C_{ид}$ и $C_{ин}$ определяются из соотношения (23) и равны, соответственно, 3,977 и 5,212 пФ. Относительные погрешности в измерении емкостей $C_{ид}$ и $C_{ин}$ равны:

$$\frac{\Delta C_{ид}}{C_{ид}} = 2,3 \cdot 10^{-3}; \quad \frac{\Delta C_{ин}}{C_{ин}} = 2,4 \cdot 10^{-3}.$$

Оценим погрешность, вносимую в измерения коэффициента пропитки $K_{инп}$, величиной A . Ёмкости, входящие в соотношение (2), можно представить в виде выражений:

$$C_{ис} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_a p S_{п}}{d_a}; \quad (24)$$

$$C_{и1} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_a p S_{п}}{d_1}; \quad (25)$$

$$C_{и2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n p S_{п}}{d_n}; \quad (26)$$

$$C_{и2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n p S_{п}}{d_2}, \quad (27)$$

где ε_0 – коэффициент размерности; $\varepsilon_a, \varepsilon_n, \varepsilon_s$ – диэлектрические проницаемости соответственно воздушной прослойки, корпусной изоляции, эмали провода; $S_{п}$ – площадь поверхности паза; p – количество пазов статора; d_a, d_1, d_n, d_2 – эквивалентные толщины эмали провода, воздушной прослойки между корпусом изделия и корпусной изоляцией, корпусной изоляции и воздушной прослойки между корпусной изоляцией и обмоткой соответственно.

Из выражения (2), с учетом выражений (24)–(27), ёмкость $C_{ид}$ будет равна:

$$C_{ид} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_a \varepsilon_n \varepsilon_s p S_{п}}{d_a \varepsilon_s \varepsilon_n + (d_n \varepsilon_a + d_s \varepsilon_n) \varepsilon_b}, \quad (28)$$

где $d_s = d_1 + d_2$; $\varepsilon_b = 1$.

С учетом того, что диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_a = 1$, выражение (28) можно записать в виде

$$C_{ид} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n p S_{п}}{d_a \varepsilon_s \varepsilon_n + (d_n \varepsilon_s + d_s \varepsilon_n) \varepsilon_b}. \quad (29)$$

У погруженного в диэлектрическую жидкость изделия выражение для расчета электрической емкости $C_{100\%}$ между корпусом изделия и проводом обмотки, с учетом выражения (29), имеет вид:

$$C_{100\%} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_n p S_{п}}{d_a \varepsilon_s \varepsilon_n + (d_n \varepsilon_s + d_s \varepsilon_n) \varepsilon_1}. \quad (30)$$

Величину A , с учетом выражений (29) и (30), можно записать в виде

$$A = \frac{C_{100\%}}{C_{ид}} = \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n \varepsilon_n + (d_n \varepsilon_n + d_n \varepsilon_n)}{d_n \varepsilon_n \varepsilon_n + (d_n \varepsilon_n + d_n \varepsilon_n) \varepsilon_1}. \quad (31)$$

Для статоров электродвигателей 4А112М4 число пазов $p=36$, $S_n=4536 \text{ мм}^2$, $\varepsilon_n=2,1$; $\varepsilon_n=2,2$; $d_n=0,25 \text{ мм}$, $d_n=0,04 \text{ мм}$.

Величина электрической ёмкости эмалевого слоя и корпусной изоляции, в соответствии с выражениями (24), (25), будет равна:

$$C_{iy} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n p S_n}{d_n} = \frac{8,85 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 36 \cdot 4536}{0,04} = 79484,33 \text{ пФ};$$

$$C_{ie} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n p S_n}{d_n} = \frac{8,85 \cdot 10^{-3} \cdot 2,17 \cdot 36 \cdot 4536}{0,25} = 2752,704 \text{ пФ}.$$

Среднестатистическое значение емкости непровитанной обмотки относительно корпуса равно: $C_{ид}=2957 \text{ пФ}$. Используя эту величину, определим из выражения (29) численное значение эквивалентного воздушного зазора d_n :

$$d_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n \varepsilon_n S_n p - C_{ид} (d_n \varepsilon_n + d_n \varepsilon_n)}{C_{ид} \varepsilon_n \varepsilon_n} = \frac{[8,85 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 2,1 \cdot 36 \cdot 4536 - 2957(0,25 \cdot 2,2 + 0,04 \cdot 3,1)]}{2957 \cdot 2,2 \cdot 2,1} = 0,351 \text{ мм}.$$

Эксперименты показали, что емкости непровитанных обмоток относительно корпуса могут отличаться друг относительно друга на 15–20 %. Этот разброс емкостей может быть обусловлен рядом причин: нестабильностью толщины эмалевого покрытия провода d_n ; нестабильностью толщины корпусной изоляции d_n ; нестабильностью эквивалентного воздушного зазора d_n . Оценим, насколько приемлемо допущение постоянства величины A для всех однотипных обмоток. Для этой цели найдем, в каком диапазоне значений изменяется величина A , если емкости непровитанных обмоток имеют разброс $\pm 20 \%$.

Пусть толщина эмалевого покрытия и корпусной изоляции от обмотки к обмотке изменяется на $\pm 30 \%$, а толщина эквивалентного воздушного зазора – на $\pm 40 \%$. Тогда минимальные и максимальные значения толщины эмали, корпусной изоляции и воздушного зазора будут равны:

$$d_{amin}=0,028 \text{ мм}, d_{amax}=0,052 \text{ мм};$$

$$d_{imin}=0,175 \text{ мм}, d_{imax}=0,325 \text{ мм};$$

$$d_{amin}=0,2106 \text{ мм}, d_{amax}=0,4914 \text{ мм}.$$

В соответствии с формулой (31) при наихудших сочетаниях эквивалентных толщин слоев расчетная величина A будет иметь значение:

$$A_{\min}=1,589, A_{\max}=1,613.$$

При наихудших сочетаниях эквивалентных толщин слоев величина $C_{ид}$, в соответствии с формулой (29), будет иметь значения:

$$C_{ид\max}=4712,6 \text{ пФ}, C_{ид\min}=1677,7 \text{ пФ}.$$

Разброс емкостей непровитанных обмоток относительно среднестатистического значения емкости составит:

$$\delta C_{ид\max} = \frac{4712,6 - 2957}{2957} \cdot 100 \% = +59 \%;$$

$$\delta C_{ид\min} = \frac{1677,7 - 2957}{2957} \cdot 100 \% = -43,3 \%.$$

Разброс A относительно среднего теоретического составит:

$$\delta A_{\min} = \frac{1,589 - 1,593}{1,593} \cdot 100 \% = -2,51 \%;$$

$$\delta A_{\max} = \frac{1,613 - 1,593}{1,593} \cdot 100 \% = +1,26 \%.$$

Таким образом, варьирование толщины корпусной изоляции и эмали провода в пределах $\pm 30 \%$, а толщины эквивалентного воздушного промежутка в пределах $\pm 40 \%$ приводит к максимальной погрешности, вызванной непостоянством значения величины A , не более чем на 2,51 %, в то время как величина емкостей непровитанных обмоток при указанных вариациях изменяется на величину $\pm 59,37 \%$, что можно считать теоретическим подтверждением постоянства величины. Эксперименты, проведенные на 50 обмотках электродвигателей серии 4АИР112М4 путем имитации в них 100%-й пропитки погружением их в керосин, показали что при среднем значении $A_0=1,553$ абсолютная погрешность в измерении $\Delta A=\pm 0,021$, а относитель-

$$\text{ная погрешность } \frac{\Delta A_0}{A_0} = \frac{\pm 0,021}{1,553} = \pm 0,0135.$$

Ошибки, составляющие результирующую погрешность, не коррелируют между собой, так как их источником являются разные причины. С учетом полученных численных значений коэффициентов влияния и погрешностей величин, входящих в формулу (3.91), величина максимальной результирующей относительной погрешности определения коэффициента пропитки прикорпусных полостей обмоток равна:

$$\frac{\Delta K_{пр}}{K_{пр}} = \sqrt{\left[\left(B_1 \frac{\Delta \varepsilon_n}{\varepsilon_n} \right)^2 + \left(B_2 \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \right)^2 + \left(B_3 \frac{\Delta C_{ин}}{C_{ин}} \right)^2 + \left(B_4 \frac{\Delta C_{ид}}{C_{ид}} \right)^2 + \left(B_5 \frac{\Delta A}{A} \right)^2 \right]} = \sqrt{\left[3,28 \cdot 10^{-6} + 1,47 \cdot 10^{-5} + 1,44 \cdot 10^{-4} + 1,32 \cdot 10^{-4} + 1,11 \cdot 10^{-3} \right]} = 3,75 \cdot 10^{-2}.$$

Таким образом, результирующая погрешность изменения $K_{\text{пр}}$ по двум измерениям ёмкости обмотки относительно магнитного сердечника статора до и после пропитки.

Закключение

В работе проведено обоснование ёмкостного способа контроля качества пропитки. Обоснован выбор критериев для оценки качества пропитки. Приведены формулы для определения коэффициента пропитки прикорпусных полостей обмотки, показывающие, что степень заполненности указанных по-

лостей пропиточным составом можно определить по изменению в процессе пропитки ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника. Проведена оценка погрешностей предлагаемого способа контроля на примере реальных двигателей серии АИР. Показано, что результирующая погрешность контроля качества пропитки не превышает 3,75 %.

Предлагаемый способ имеет достаточно высокую точность, не требует изготовления дорогостоящих оригинальных средств контроля, а позволяет использовать обычные, широко распространенные на практике измерители ёмкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. Применение магнитодиэлектрического композита на основе ультрадисперсного порошка никель-цинковых частиц для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, З.Г. Бикбаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 106–117.
3. A new generation of aluminum enameled winding wires / B. Smyrak, T. Knych, A. Mamala, P. Uliasz, M. Jabłoński // Wire Journal International. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 55–61.
4. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage / K. Kimura, S. Ushirone, T. Koyanagi, M. Hikita // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins. – Chicago, June 2007. – V. 14. – № 3. – P. 744–750.
5. ГОСТ ИЕС 60851–5–2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
6. IEC 60851–5:1996 Methods of test winding wires. Part 5: Electrical properties. URL: <http://www.cntd.ru/assets/files/upload/240713/60851-5-2011.pdf> (дата обращения: 08.02.2016).
7. Похолков Ю.П., Бесперстов П.П., Пыхтин В.В. Исследование влияния технологического процесса изготовления обмоток на дефектность витковой изоляции асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 222. – С. 52–65.
8. Борисенко А.И., Костилов О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
9. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
10. Тепловые свойства магнитодиэлектрических композиционных составов на основе компаунда КП-34 и ультрадисперсного никель-цинкового порошка / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, М.С. Петюкевич, С.А. Понамарева // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6/2. – С. 291–296.
11. Кондратюк А.А., Матренин С.В., Недосекова О.Ю. Исследование влияния количества наполнителя на механические характеристики композиционных полимеров // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 57. – № 9/3. – С. 98–102.
12. Кондратьева Н.Г., Кузнецов Н.А. Сравнительная оценка коэффициентов заполнения паза пропиточным составом, определенных различными методами // Технология электротехнического производства. – 1981. – № 12. – С. 14–16.
13. Дудкин А.Н. Разработка методов оценки технологического процесса пропитки обмоток асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Томск, 1980. – 163 с.
14. Способ определения коэффициента пропитки обмоток электрических машин: авт. свид. СССР № 1241361; заявл. 24.06.83; опубл. 30.06.86. Бюл. № 24. – 4 с.
15. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2521439; заявл. 25.10.12; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 22 с.
16. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study // Physica. – 2007. – V. 396. – P. 132–137.
17. Measurement of bubble sizes in fluidised beds using electrical capacitance tomography / T.C. Chandrasekera, Y. Li, D. Moody, M.A. Schnellmann, J.S. Dennis, D.J. Holland // Chemical Engineering Science. – 2015. – V. 126. – P. 679–687.
18. Dielectric Materials for Pulse Power Energy Storage / Barber P., Balasubramanian S., Y. Anguchamy, Gong S., Wibowo A., Gao H., Ploehn H., Loye H. // Materials. – 2009. – V. 2. – P. 1697–1733.
19. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1973. – 328 с.
20. Kanuta Musataka, Hakamada Taheschi, Kana Ikusi. Function tests for induction motor insulation // Hitachi Review. – 1975. – V. 21. – № 11. – P. 436–443.
21. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.
22. The new concepts of measurement error theory / Xiaoming Ye, Xuebin Xiao, Junbo Shi, Mo Ling // Measurement. – 2016. – V. 83. – P. 96–105.

Поступила 13.02.2016 г.

Информация об авторах

Смирнов Г.В., доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Смирнов Д.Г., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и систем связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 621.316.3.048 (075.8)

CAPACITIVE METHOD FOR CONTROLLING THE QUALITY OF WINDING IMPREGNATION IN ELECTRIC MOTOR FOR GENERAL INDUSTRIAL USE

Gennadiy V. Smirnov¹,

smirnov@main.tusur.ru

Dmitriy G. Smirnov¹,

smirnov@main.tusur.ru

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia.

The relevance of the work is caused by the fact that the majority of technological processes almost in all industries, including those related to extraction, transportation, processing of mineral raw materials, cannot be implemented without the use of electric motors. High reliability of these machines provides trouble-free operation and guarantees human safety in these industries. The reliability indices of electrical machine operation depend on insulation condition of the windings, which is largely determined by the quality of impregnation. It is impossible to improve winding impregnation, increase the quality and reliability of isolation, without certain methods for controlling the impregnation quality.

The main aim of the research is to study the applicability of winding electrical capacitance relative to the housing to control the quality of winding impregnation in electrical machines.

Research methods: measurement of electrical capacitive characteristics of the windings of electrical machines; measurement of geometric parameters of winding components; metrological methods to estimate errors of indirect measurements.

Results. The authors have proved the possibility of determining the impregnation coefficients by measuring the capacitive characteristics of the winding relative to its body; substantiated the criteria to evaluate the quality of impregnation and formulas for their calculation. The reliability of the results is confirmed experimentally. The paper introduces the detailed analysis and evaluation of metrological characteristics of the proposed method. Real examples show that use of the proposed method allows ensuring high accuracy in determining the winding impregnation coefficient in stators of electric machines. Indirect error of determining the impregnation coefficients does not exceed 3,8 %.

Key words:

Impregnation, compound, electrical capacitance, dielectric constant, magnetic core, capacitor, statistical mixture.

REFERENCES

- Kurbatov O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornogo oborudovaniya* [Installation and repairing of mining machinery and electrical equipment.] Vladivostok, Publ. house of DVG TU, 2004. 286 p.
- Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadov V.I., Petukovich M.S., Bikbaeva Z.G. Application of magneto-electric composite based on ultrafine powder of Nickel-zinc particles for resource-saving technology of impregnation of windings of electrical machines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 106–117. In Rus.
- Knych T., Mamala A., Uliasz P., Jablonski M. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
- Kimura K., Ushirone S., Koyanagi T., Hikita M. PDIV characteristics of twisted-pair of magnet wires with repetitive impulse voltage. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Ins.* Chicago, June 2007. Vol. 14, no. 3, pp. 744–750.
- GOST IEC 60851–5:2011. *Provoda obmotochnye. Metody ispytaniy. Ch. 5. Elektricheskie svoystva* [Magnet wires. Test methods. P. 5. The electrical properties]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
- IEC 60851–5:1996 *Methods of test winding wires. P. 5: Electrical properties*. Available at: <http://www.cntd.ru/assets/files/upload/240713/60851-5-2011.pdf> (accessed 08 February 2016).
- Pokholkov Yu.P., Besperstov P.P., Pykhtin V.V. *Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya obmotok na defektnost vikhovoy izolyatsii asinkhronnykh dvigateley* [Study of the influence of technological process of manufacturing the windings on the deficiency of turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 222, pp. 52–65.
- Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh ustanovok* [Cooling of industrial electric machines.] Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
- Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Reliability of winding insulation in electrical products]. Tomsk, Tomsk State University Press, 1990. 192 p.
- Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadov V.I., Petukovich M.S., Ponamarev S.A. Thermal properties magnetodielectrics composition based on the compound KP-34, and ultrafine Nickel-zinc powder. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2015, vol. 58, no. 6/2, pp. 291–296. In Rus.
- Kondratyuk A.A., Matrenin S.V., Nedosekova A.Yu. Study of the influence of amount of filler on the mechanical characteristics of the composite polymers. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2015, vol. 57, no. 9/3, pp. 98–102. In Rus.
- Kondrateva G.N., Kuznetsov I.N. *Sravnitel'naya otsenka koefitsientov zapolneniya paza propitochnym sostavom, opredelennykh razlichnymi metodami* [Comparative evaluation of the factor of a groove filling with impregnating composition defined by different methods]. *Technology of electrical production*, 1981, no. 12, pp. 14–16.
- Dudkin A.N. *Razrabotka metodov otsenki tekhnologicheskogo protsessa propitki obmotok asinkhronnykh dvigateley*. Dis. Kand. Nauk [Development of methods for evaluating winding impregnation of in induction motors. Cand. Diss.]. Tomsk, 1980. 163 p.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koefitsienta propitki obmotok elektricheskikh mashin* [Method for determining

- the coefficient of impregnation of windings of electrical machines]. Author certificate, the USSR, no. 1241361, 1986.
15. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhdaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the coefficient of winding impregnation with curable polymer composition in electrical machines]. Patent RF, no. 2521439, 2014.
 16. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study. *Physica*, 2007, vol. 396, pp. 132–137.
 17. Chandrasekera T.C., Li Y., Moody D., Schnellmann M.A., Dennis J.S., Holland D.J. Measurement of bubble sizes in fluidised beds using electrical capacitance tomography. *Chemical Engineering Science*, 2015, vol. 126, pp. 679–687.
 18. Barber P., Balasubramanian S., Anguchamy Y., Gong S., Wibowo A., Gao H., Ploehn H., Loye H. Dielectric Materials for Pulse Power Energy Storage. *Materials*, 2009, vol. 2, pp. 1697–1733.
 19. Tareev B.M. *Fizika dielektricheskikh materialov* [Physics of dielectrics]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 328 p.
 20. Kanuta Musataka, Hakamada Taheschi, Kana Ikusi. Function tests for induction motor insulation. *Hitachi Review*, 1975, vol. 21, no. 11, pp. 436–443.
 21. Novitskiy P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereniy* [Estimation of errors of measurement results]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p.
 22. Xiaoming Ye, Xuebin Xiao, Junbo Shi, Mo Ling. The new concepts of measurement error theory. *Measurement*, 2016, vol. 83, pp. 96–105.

Received: 13 February 2016.

Information about the authors

Gennadiy V. Smirnov, Dr. Sc., professor, director, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.
Dmitriy G. Smirnov, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.