УДК 621.313.045:621.315.61

КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОСЛЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРОПИТКИ И СУШКИ

Смирнов Геннадий Васильевич[1],
smirnov@main.tusur.ru

Смирнов Дмитрий Геннадьевич[1],
smirnov@main.tusur.ru

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

Актуальность работы *обусловлена тем, что электрические машины являются одним из самых распространенных видов продукции электротехнической промышленности и применяются в разнообразных отраслях промышленности. Отказ электрической машины приводит к аварийным ситуациям, к простою оборудования и, как следствие, к высоким экономическим затратам на ликвидацию результатов отказа машины. Особенно ощутимы результаты отказа электрических машин при разведке, добыче и транспортировке георесурсов в нефтедобывающей, горнорудной, угольной, химической и других отраслях промышленности, так как эти отрасли в настоящее время являются основой формирования бюджета страны. Надежность и безотказность работы этих машин в значительной степени определяется операциями пропитки и сушки обмоток, так как на этих операциях формируются важнейшие качественные характеристики обмоток: электроизоляционные, тепловые, влагостойкие и механические. Все эти свойства зависят от степени заполнения межвитковых и прикорпусных полостей обмотки пропиточным составом и от степени его полимеризации (отверждения). В случае недостаточной высушенности (завершенности процесса отверждения компаунда; процессов полимеризации и т. п.) обмоток после пропитки возможно появление дефектов в межвитковой изоляции в период хранения и транспортировки оборудования к месту эксплуатации, что неизбежно приводит к снижению надежности изоляции обмоток. Совершенствование указанных операций невозможно реализовать без надлежащих способов неразрушающего контроля качества проведения этих операций. Поэтому разработка методов контроля качества пропитки и степени отвержения пропиточного состав в обмотках является весьма злободневным.*
Цель работы *показать возможность контроля распределенности пропиточного состава по обмотке и степени его отверждения по результатам измерения ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника на двух частотах электромагнитного поля.*
Методы исследования: *электромагнитные, для исследования зависимости диэлектрической проницаемости пропиточного состава от частоты электромагнитного поля и степени его отверждения.*
Результаты. *Рассмотрен ёмкостной способ контроля степени отверждения пропиточного состава в изоляции обмоток электротехнических изделий. Приведены полученные экспериментальным путем графики зависимости диэлектрической проницаемости компаунда КП-34 от частоты электромагнитного поля, снятые при различных степенях высушенности компаунда. Обоснованы физические основы контроля качества пропитки и сушки, и приведен вывод основных критериев оценки качества указанных технологических операций. Приведена схема прибора контроля, и рассмотрен принцип его работы.*

Ключевые слова:
*Обмотка, пропиточный состав, степень отверждения, частотная зависимость,
диэлектрическая проницаемость, ёмкость, усилитель, синхронный детектор, вычислительный блок.*

Введение

Электрические машины – это один из самых распространенных видов продукции электротехнической промышленности, применяемый во многих сферах деятельности человека. Поэтому надежность этого вида продукции является чрезвычайно важным показателем, так как отказ двигателя приводит к аварийным и часто к опасным для здоровья и жизни людей факторам. Особенно опасны отказы электродвигателей в производствах горнодобывающей, нефтяной, газовой и других производствах сырьевой промышленности [1]. Именно в этой отрасли промышленности электрические машины широко используют в качестве электроприводов буровых установок [2], шахтных вентиляционных устройств [3], в погружных электроцентробежных насосах при добыче нефти [4], в лебедках и других транспортных средствах [5], где их отказ может привести к возникновению чрезвычайных ситуаций и даже к гибели людей. Самым ненадежным узлом электрической машины является изоляция обмоток электрических машин [1, 6]. Низкая надежность изоляции обмоток электрических машин во многом зависит от качества изоляции обмоточного провода, от намоточного оборудования и технологии пропитки и сушки обмоток [7–12]. Именно в процессе пропитки обмоток пленкой пропиточного состава скрываются дефекты в витковой, межфазной и корпусной изоляции. При этом качество изоляции пропитанных обмоток зависит не только от того, какое количество пропиточного состава проникло в полости обмоток, и как он распределился по указанным полостям, но также и от того, до какой степени проникший в обмотку пропиточный состав компаундировался. При недосушенной изоляции часть пропиточного состава находится в не отвержденном состоянии, что приводит к повышенной разрушаемости изоляции обмоток при эксплуатации. Если же пересушить пропиточный состав в обмотке, то в изоляции обмоток возникает множество дефектов в виде микротрещин, пор и капилляров, что также приводит к повышению вероятности отказа обмоток при их эксплуатации. Если же пропитка и сушка проведены в оптимальных режимах, то в результате этих операций повышаются не только электроизоляционные свойства обмоток, но и их теплопроводность, влагостойкость, монолитность и другие характеристики, повышающие надежность изоляции обмоток.

Высокие и низкие температуры воздуха оказывают неблагоприятное воздействие на изоляцию обмоток электроприводов, вызывая их старение. Солнечная радиация, воздействуя на машину, ускоряет процесс естественного старения изоляции обмоток электрических машин. Материалы становятся более ломкими, в них образуются трещины, поэтому снижается механическая прочность и электрическое сопротивление изоляции. Содержание влаги в воздухе ускоряет процесс изнашивания полимерных материалов, снижает электрическую прочность (пробивное напряжение) изоляции обмоток [1]. Процесс проникновения влаги и пыли в обмотки электрических машин усугубляется при плохой пропитке и сушке обмоток, когда степень заполненности межвитковых и прикорпусных полостей пропиточным составам низка. При этом в изоляции обмоток образуются многочисленные поры и капилляры, в которые происходит проникновение и адсорбция влаги и пыли, что приводит к ускоренному старению изоляции обмоток, к значительному повышению вероятности отказа изоляции указанных обмоток [7–14]. Большую опасность представляет недопустимый нагрев обмоток электрических машин, 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. [1].

Все эти качественные изменения свойств обмотки после пропитки и сушки связаны не только с физическими свойствами, но и с количеством пропиточного состава, проникшего в полости обмотки и оставшегося в них после операции пропитки и сушки, а также с его распределенностью по полостям обмотки и степенью его высушенности. Повышение качества изоляции обмоток невозможно осуществить без совершенствования технологии пропитки и сушки. Однако совершенствование этих операций, оперативное устранение технологических причин, приводящих к некачественной пропитке и сушке, невозможно без разработки и внедрения неразрушающих методов контроля качества указанных технологических операций. Результаты, полученные авторами, позволяют минимизировать вероятность выпуска машин с неудовлетворительным качеством пропитки, а именно с не полностью высушенным компаундом с низкой и неравномерной распределенностью по обмотке пропиточного состава.

Экспериментальная часть

В работах [15–29] рассмотрены вопросы, связанные с контролем качества пропитки корпусной изоляции обмоток по ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника. Недостатком такого контроля является невозможность определить, как распределился пропиточный состав по фазам обмотки, обычно соединенным звездой, и до какой степени этот состав высушен.

В настоящее время контроль степени высыхания лакокрасочных материалов осуществляют по ГОСТ 19007–73 [30]. В соответствии с указанным документом выделяют 7 степеней высыхания, а контроль производят на специально подготовленных плоских образцах лакокрасочного материала. Недостатком такого контроля является его применение только на плоских, специально приготовленных образцах контролируемого лакокрасочного материала.

Целью настоящей работы является показать возможность контроля распределенности пропиточного состава по фазам обмотки и степени его отверждения по результатам измерения ёмкости обмоток относительно магнитного сердечника на двух частотах электромагнитного поля.

Диэлектрическая проницаемость образцов пропиточного изоляционного состава измерялась при температуре 20 °С на трехэлектродной ячейке по ГОСТ 6433.4–71 с помощью цифрового измерителя ёмкости Е8–4 (рис. 1, *а*). Как следует из рис. 1, *а*, частотные зависимости пропиточного состава имеют две характерные области: область (А), в которой наблюдается явно выраженная зависимость диэлектрической проницаемости от частоты, и область (Б), где зависимость диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного поля практически отсутствует. Область (А) условно называется дисперсионной, а область (Б) – оптической. При отверждении (сушке) компаундов частотная зависимость диэлектрической проницаемости выполаживается, а затем практически исчезает. Если выбрать две частоты измерения диэлектрической проницаемости пропиточного состава, одна из которых f_1 лежит в дисперсионной области, а другая частота f_2 – в оптической области, то, используя зависимости, приведенные на рис. 1, *а*, можно представить график зависимости степени высушенности пропиточного состава от отношения (K) логарифмов диэлектрических проницаемостей $K = \dfrac{\lg \varepsilon_{nc}(f_2)}{\lg \varepsilon_{nc}(f_1)}$ на выбранных частотах f_2 и f_1 соответственно (рис. 1, *б*).

При этом если каким-то образом в контролируемой обмотке измерить диэлектрические проницаемости на выбранных частотах, то можно, используя график, представленный на рис. 1, *б*, определить степень высушенности пропиточной изоляции в упомянутой контролируемой обмотке.

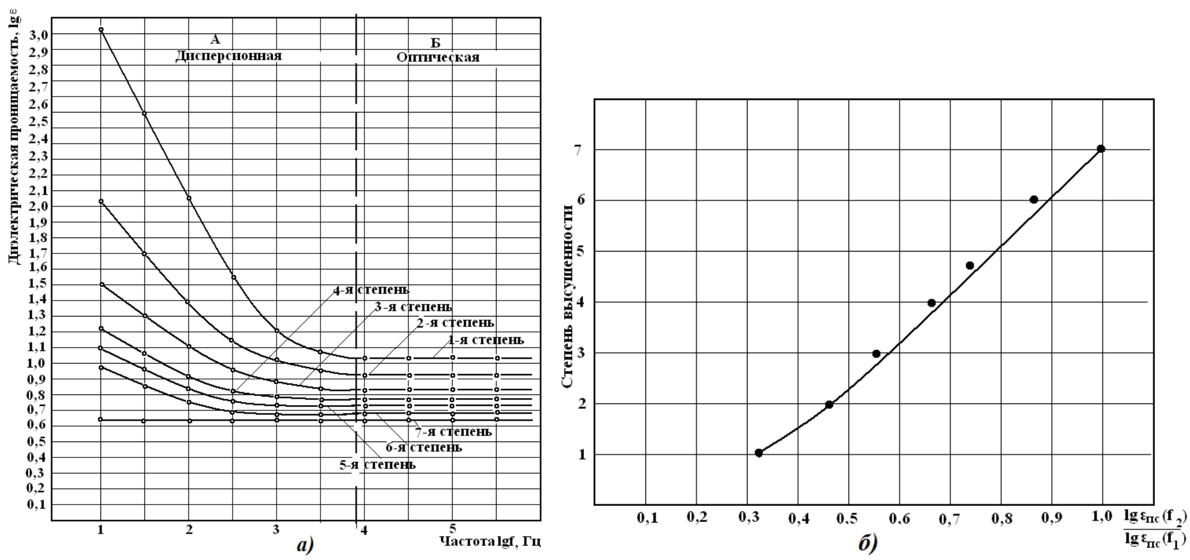

Рис. 1. *Частотные зависимости диэлектрической проницаемости компаунда КП-34 (а) и зависимость степени его высушенности от отношения логарифмов диэлектрических проницаемостей, измеренных на двух частотах (б)*

Fig. 1. *Frequency dependence of dielectric constant of the compound KP-34 (a) and dependence of its dryness degree on ratio of dielectric permittivity logarithms measured at two frequencies (б)*

Теоретическая часть

Рассмотрим, как найти отношение K в контролируемой обмотке и по нему определить степень высушенности обмотки. Условно обмотку электротехнического изделия до пропитки можно представить в виде слоистого анизотропного тела (рис. 2, А), состоящего из медного провода – 1, эмалевой изоляции – 2, межвитковых воздушных полостей – 3, корпусной изоляции – 4, прикорпусных воздушных полостей – 5. Обмотка всыпана в пазы массивного стального сердечника – 6.

Обмотку после пропитки и сушки также можно представить в виде анизотропного слоистого тела (рис. 2, Б). На рис. 2, Б введены те же обозначения, что и на рис. 2, А, только воздушные полости – 3 и 5 (рис. 2, А) обозначены цифрами 7 и 8, так как эти полости после пропитки и сушки заполнены пропиточным составом. Так как толщина $d_э$ эмалевой изоляции провода – 2, толщина $d_к$ корпусной изоляции – 4 и суммарная толщина $d_в$ воздушных полостей – 3 и 5 между поверхностью обмотки и поверхностью паза пренебрежительно малы и составляют несколько микрон, то емкость обмотки относительно корпуса можно с пренебрежительно малой погрешностью представить в виде слоистого плоского конденсатора.

Покажем, как по измерениям ёмкостей двух фаз обмотки относительно корпуса до пропитки и после неё можно определить степень высушенности пропиточной изоляции обмотки и коэффициенты пропитки каждой из фаз обмотки.

Введем следующие величины: $C_{дп12}(f_1)$, $C_{дп13}(f_1)$, $C_{дп23}(f_1)$ – ёмкости относительно магнитного сердечника (корпуса) двух фаз непропитанной обмотки, измеренные на частоте электромагнитного поля f_1; $C_{дп12}(f_2)$, $C_{дп13}(f_2)$, $C_{дп23}(f_2)$ – ёмкости относительно магнитного сердечника (корпуса) двух фаз непропитанной обмотки, измеренные на частоте электромагнитного поля f_2; $C_{пп12}(f_1)$, $C_{пп13}(f_1)$, $C_{пп23}(f_1)$ – ёмкости относительно магнитного сердечника (корпуса) двух фаз пропитанной обмотки, измеренные на частоте электромагнитного поля f_1; $C_{пп12}(f_2)$, $C_{пп13}(f_2)$, $C_{пп23}(f_2)$ – ёмкости относительно магнитного сердечника (корпуса) двух фаз пропитанной обмотки, измеренные на частоте электромагнитного поля f_2.

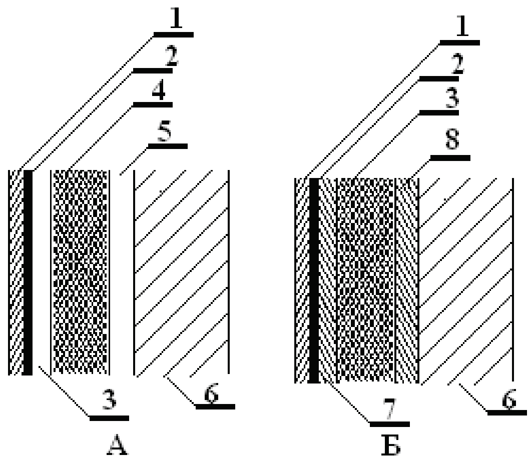

Рис. 2. *Представление обмотки в виде анизотропного слоистого тела: 1 – жила провода; 2 – эмалевая изоляция; 3 – воздушные полости между обмоткой и корпусной изоляцией; 4 – корпусная изоляция; 5 – прикорпусные воздушные полости; 6 – магнитный сердечник; 7 и 8 – пропиточный состав*

Fig. 2. *Representation of the winding in the form of anisotropic laminated body: 1 is the wire strand; 2 is the enamel insulation; 3 is the air cavity between the winding and ground insulation; 4 is the ground insulation; 5 is the air cavity; 6 is the magnetic core; 7 and 8 is the compound*

Рассмотрим сущность предлагаемого способа контроля качества пропитки обмоток электрических машин и степени отверждения пропиточного состава после сушки обмоток, используя любые две фазы обмотки. Введём индексы номеров фаз обмотки k и j, позволяющие сократить описание, рассматривая в обобщенном виде все сочетания двух фаз обмотки (1–2, 1–3, 2–3) в одном выражении, не прибегая к дублированию формул, запись которых аналогична для любых двух фаз, а отличие их состоит только в сочетании номеров фаз.

Если до пропитки измерить ёмкость $C_{дп12}(f_1)$ двух фаз обмотки относительно магнитного сердечника на частоте f_1, то в соответствии с рис. 2 эту емкость можно представит в виде суммы трех емкостей, соединенных последовательно

$$\frac{1}{C_{дп12}(f_1)} = \frac{1}{C_э(f_1)} + \frac{1}{C_к(f_1)} + \frac{1}{C_в}, \qquad (1)$$

где $C_э(f_1)$ – ёмкость слоя эмалевой изоляции провода на частоте f_1; $C_к(f_1)$ – ёмкость слоя корпусной изоляции на частоте f_1; $C_в(f_1)$– суммарные ёмкости воздушных слоев 5 и 6 (рис. 2, А).

В общем случае диэлектрическая проницаемость эмалевой и корпусной изоляции может иметь зависимость от частоты. Поэтому обозначим диэлектрические проницаемости эмалевой и корпусной изоляции на частоте f_1 соответственно $\varepsilon_э(f_1)$ и $\varepsilon_к(f_1)$.

С учетом введенных обозначений для плоского конденсатора можно записать

$$C_э(f_1) = \frac{2}{3} p \frac{\varepsilon_0 \varepsilon v(f_1) S}{d_э}, \qquad (2)$$

$$C_к = \frac{2}{3} p \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_к(f_1) S}{d_к}, \qquad (3)$$

$$C_в = \frac{2}{3} p \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_в S}{d_{в12}}, \qquad (4)$$

где p – количество пазов в магнитном сердечнике статора; $\frac{2}{3}p$ – количество пазов в магнитном сердечнике статора, в которые всыпана контролируемая обмотка $\varepsilon_в$ – диэлектрическая проницаемость воздуха, ε_0=8,854187817·10^{-12} электрическая постоянная; $C_в$ – суммарная ёмкость воздушных слоев 5 и 6 (рис. 2). Подставив выражения (2)–(4) в формулу (1) и учитывая, что диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_в$=1, можно записать

$$\frac{1}{C_{дпkj}(f_1)} = \frac{3d_э}{2p\varepsilon_э(f_1)\,\varepsilon_0 S} + \frac{3d_к}{2p\varepsilon_0\varepsilon_к(f_1)S} + \frac{3d_в}{2p\varepsilon_0 S}, \qquad (5)$$

Из выражения (5) следует

$$d_в = \frac{2}{3} pS\,\varepsilon_0 \times \left[\frac{1}{C_{дпkj}(f_1)} - \frac{3d_э}{2p\varepsilon_0\varepsilon_э(f_1)S} - \frac{3d_к}{2p\varepsilon_0\varepsilon_к(f_1)S}\right] = \frac{\begin{pmatrix} 2pS\varepsilon_0\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1) - \\ -3C_{дпkj}(f_1)[d_э\varepsilon_к(f_1) + d_к\varepsilon_э(f_1)] \end{pmatrix}}{3\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1)C_{дпkj}(f_1)}. \qquad (6)$$

После пропитки и сушки обмоток объемы полостей 5 и 6 частично заполняются пропиточным составом, имеющим измеренную на частоте f_1 диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_п(f_1)$ (рис. 1, Б). Так как пропиточный состав не полностью заполняет объемы полостей 8 и 9, а статистически распределен по этим полостям, то в упомянутых полостях образуется бинарная статистическая смесь, состоящая из частиц пропиточного состава и частиц воздуха, с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon^*(f_1)$. Диэлектрическая проницаемость бинарной смеси $\varepsilon^*(f_1)$ подчиняется распределению Лихтенеккера–Ротера [5], в соответствии с которым можно записать

$$\ln \varepsilon^*(f_1) = \frac{V_{пckj}}{V_0} \ln \varepsilon_{i}(f_1) + \frac{V_0 - V_{пckj}}{V_0} \ln \varepsilon_в, \qquad (7)$$

где V_0 – объем полостей 5 и 6 в двух фазах обмотки (рис. 2, А); $V_{пckj}$ – объем в двух фазах kj обмотки, который занимают частицы пропиточного состава в слоях 8 и 9; V_0–$V_{пckj}$ – объём воздуха в слоях 8 и 9; $\varepsilon^*(f_1)$ – диэлектрическая проницаемость статистической смеси в слоях 8 и 9.

Учитывая, что диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_в$=1, а ln $\varepsilon_в$=0, выражение (7) можно записать в виде

$$\ln \varepsilon^*(f_1) = \frac{V_{пckj}}{V_0} \ln \varepsilon_п(f_1) = K_{прkj} \ln \varepsilon_п(f_1). \qquad (8)$$

В выражении (8) отношение $\frac{V_{пckj}}{V_0}$ есть не что иное, как коэффициент пропитки $K_{прkj}$ объёмов полостей 8 и 9 двух фаз обмотки, характеризующий степень заполнения объёма полостей V_0 пропиточным составом.

Если после пропитки и сушки измерить на частоте f_1 ёмкость у той же контролируемой части обмотки относительно корпуса $C_{ппkj}(f_1)$ и учесть, что пропиточный состав, диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon_п(f_1)$ статистически распределился по объёмам полостей 8 и 9 (рис. 2, Б), то емкость $C_{пckj}(f_1)$ слоев 8 и 9 можно представить выражением

$$C_{пckj}(f_1) = \frac{2}{3} p \frac{\varepsilon_0 \varepsilon^*(f_1) S}{d_в}. \qquad (9)$$

Подставив в уравнение (5) вместо $C_в$ величину $C_{пckj}(f_1)$ (9), можно записать выражение для емкости двух фаз обмотки относительно корпуса после пропитки и сушки $C_{ппkj}(f_1)$ в виде

$$\frac{1}{C_{ппkj}(f_1)} = \frac{3d_э}{2p\varepsilon_0\varepsilon_э(f_1)S} + \frac{3d_к}{2p\varepsilon_0\varepsilon_к(f_1)S} + \frac{3d_в}{2p\varepsilon_0\varepsilon^*(f_1)S}. \qquad (10)$$

Из соотношения (10) найдем выражение для величины зазора зазоры $d_в$

$$d_в = \varepsilon^*(f_1) \times \left[\frac{\begin{matrix} 2pS\varepsilon_0\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1) - \\ -3C_{ппkj}(f_1)[d_э\varepsilon_к(f_1) + d_к\varepsilon_э(f_1)] \end{matrix}}{3\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1)C_{ппkj}(f_1)}\right]. \qquad (11)$$

Так как после пропитки и сушки зазоры 8 и 9 (рис. 2, Б) в контролируемой части обмотки не изменились и остались равны зазорам 5 и 6 (рис. 2, А) в непропитанной обмотке, то, приравняв правую часть выражения (6) к правой части выражения (11), получим

$$\varepsilon^*(f_1)\times\left[\frac{\begin{pmatrix}2pS\varepsilon_0\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1)-\\-3C_{ппkj}(f_1)[d_э\varepsilon_к(f_1)+d_к\varepsilon_э(f_1)]\end{pmatrix}}{3\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1)C_{ппkj}(f_1)}\right]=$$

$$=\frac{\begin{pmatrix}2pS\varepsilon_0\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1)-\\3C_{дпkj}[d_э\varepsilon_к(f_1)+d_к\varepsilon_э(f_1)]\end{pmatrix}}{3\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1)C_{дпkj}(f_1)}. \qquad (12)$$

Преобразовав полученное выражение, запишем

$$\varepsilon^*(f_1)=\frac{C_{ппkj}(f_1)[C_{экв}(f_1)-C_{дпkj}(f_1)]}{C_{дпkj}(f_1)[C_{экв}(f_1)-C_{ппkj}(f_1)]}, \qquad (13)$$

где

$$C_{экв}(f_1)=\frac{2pS\varepsilon_0\varepsilon_э(f_1)\varepsilon_к(f_1)}{3[d_э\varepsilon_к(f_1)+d_к\varepsilon_э(f_1)]} \qquad (14)$$

– эквивалентная емкость последовательно соединенных емкостей эмалевой и корпусной изоляции двух фаз обмотки на частоте f_1.

Выразим из соотношения (8) коэффициент пропитки $K_{прkj}$ и получим

$$K_{прkj}=\frac{\ln\varepsilon^*(f_1)}{\ln\varepsilon_{пс}(f_1)}. \qquad (15)$$

Подставив в выражение (15) значение $\varepsilon^*(f_1)$ из соотношения (13), получим

$$K_{прkj}=\frac{1}{\ln\varepsilon_{пс}(f_1)}\times$$

$$\times\ln\frac{C_{ппkj}(f_1)[C_{экв}(f_1)-C_{дпkj}(f_1)]}{C_{дпkj}(f_1)[C_{экв}(f_1)-C_{ппkj}(f_1)]}, \qquad (16)$$

где $C_{экв}(f_1)$ определяется по формуле (14).

Произведя аналогичные преобразования для емкостей контролируемой обмотки на частоте электромагнитного поля f_2, можно показать, что

$$K_{прkj}=\frac{1}{\ln\varepsilon_{пс}(f_2)}\times$$

$$\times\ln\frac{C_{ппkj}(f_2)[C_{экв}(f_2)-C_{дпkj}(f_2)]}{C_{дпkj}(f_2)[C_{экв}(f_2)-C_{ппkj}(f_2)]}. \qquad (17)$$

Любую из формул (16) или (17) можно использовать для определения коэффициента пропитки $K_{прkj}$ двух фаз kj обмотки при условии, что в этих формулах известна величина $\ln\varepsilon_{пс}(f_1)$ или величина $\ln\varepsilon_{пс}(f_2)$. В реальности же ни одна из этих величин не известна, и их нужно определить, используя только значения тех величин, которые могут быть измерены в реальной обмотке, а именно емкости двух фаз обмотки относительно корпуса, измеренные на частотах f_1 или f_2.

Рассмотрим, как можно определить хотя бы одну, или обе указанные величины $\ln\varepsilon_{пс}(f_1)$, $\ln\varepsilon_{пс}(f_2)$.

Так как значение коэффициента пропитки должно оставаться неизменным, независимо от того на какой частоте производились измерения соответствующих параметров обмотки, то можно приравнять правые и левые части выражений (16) и (17). Тогда получим:

$$\frac{1}{\ln\varepsilon_{пс}(f_1)}\ln\frac{C_{ппkj}(f_1)[C_{экв}(f_1)-C_{дпkj}(f_1)]}{C_{дпkj}(f_1)[C_{экв}(f_1)-C_{ппkj}(f_1)]}=$$

$$=\frac{1}{\ln\varepsilon_{пс}(f_2)}\ln\frac{C_{ппkj}(f_2)[C_{экв}(f_2)-C_{дпkj}(f_2)]}{C_{дпkj}(f_2)[C_{экв}(f_2)-C_{ппkj}(f_2)]}. \qquad (18)$$

Из формулы (18) следует

$$\frac{\ln\varepsilon_{пс}(f_2)}{\ln\varepsilon_{пс}(f_1)}\times$$

$$\times\begin{Bmatrix}\ln C_{ппkj}(f_1)+\ln C_{экв}(f_1)-C_{дпkj}(f_1)-\\\ln C_{дпkj}(f_1)-\ln C_{экв}(f_1)-\tilde{N}_{ппkj}(f_1)\end{Bmatrix}=$$

$$=\begin{Bmatrix}\ln C_{ппkj}(f_2)+\ln C_{экв}(f_2)-C_{дпkj}(f_{21})-\\\ln C_{дпkj}(f_2)-\ln C_{экв}(f_{21})-C_{ппkj}(f_2)\end{Bmatrix}. \qquad (19)$$

Так как натуральный логарифм связан с десятичным логарифмом соотношением

$$\ln N=a\cdot\lg N, \qquad (20)$$

где $a\cong 2{,}30259$ – постоянная величина, то справедливо равенство

$$K=\frac{\ln\varepsilon_{пс}(f_2)}{\ln\varepsilon_{пс}(f_1)}=\frac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}, \qquad (21)$$

где K – коэффициент, определяющий степень высушенности (компаундирования) пропиточного состава в обмотке.

Выразим из формулы (19) с учетом формулы (21) отношение $\dfrac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}$

$$K=\frac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}=$$

$$=\frac{\begin{pmatrix}\ln C_{ппkj}(f_2)+\ln[C_{экв}(f_2)-C_{дпkj}(f_2)]-\\-\ln C_{дпkj}(f_2)-\ln[C_{экв}(f_2)-C_{ппkj}(f_2)]\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}\ln C_{ппkj}(f_1)+\ln[C_{экв}(f_1)-C_{дпkj}(f_1)]-\\-\ln C_{дпkj}(f_1)-\ln[C_{экв}(f_1)-C_{ппkj}(f_1)]\end{pmatrix}}. \qquad (22)$$

Таким образом, измерив ёмкость контролируемой части обмотки относительно корпуса на двух выбранных частотах f_1 и f_2 до пропитки $C_{дпkj}(f_1)$, $C_{дпkj}(f_2)$ и после пропитки и сушки $C_{ппkj}(f_1)$, $C_{ппkj}(f_2)$, а также значения диэлектрических проницаемостей эмалевой $e_э(f_1)$, $e_э(f_2)$ и корпусной изоляции $e_к(f_1)$, $e_к(f_2)$ на тех же упомянутых частотах f_1 и f_2 и вычислив из конструктивных обмоточных данных величины $C_{экв}(f_1)$ и $C_{экв}(f_2)$, можно рассчитать по выражению (22) отношение $K=\dfrac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}$ и по графику, приведенному на рис. 4, определить степень высушенности каждой контролируемой обмотки.

Следует отметить, что при контроле любых однотипных обмоток величины $\varepsilon_э(f_1)$, $\varepsilon_э(f_2)$, $\varepsilon_к(f_1)$, $\varepsilon_к(f_2)$ измеряются лишь один раз на тех же упомянутых частотах f_1 и f_2, и также один раз рассчитываются из конструктивных обмоточных данных величины $C_{экв}(f_1)$ или $C_{экв}(f_2)$. После этого у всех контролируемых обмоток измеряются ёмкости двух фаз относительно корпуса на двух выбранных частотах до пропитки и после неё, и затем, используя соотношение (22) и график, приведенный на рис. 1, определяют степень высушенности пропиточного состава в каждой контролируемой обмотке.

После определения степени K высушенности пропиточного состава по графикам, представленным на рис. 1, определяют величины $\lg\varepsilon_{пс}(f_1)$ и $\lg\varepsilon_{пс}(f_2)$, и по формуле (21) вычисляют величины $\ln\varepsilon_{пс}(f_1)$ и $\ln\varepsilon_{пс}(f_2)$. После этого, используя любую из формул – (16) или (17), подставив в неё соответствующие значения $\ln\varepsilon_{пс}(f_1)$ или $\ln\varepsilon_{пс}(f_2)$, а также соответствующие значения ёмкостей относительно корпуса двух фаз обмотки, измеренных до пропитки и после пропитки и сушки, соответственно на частоте f_1 или частоте f_2, можно определить реальное значение коэффициента пропитки упомянутых двух фаз обмотки.

Если значения диэлектрических проницаемостей эмалевой и корпусной изоляции на двух выбранных частотах f_1 и f_2 одинаковы, т. е. $\varepsilon_э(f_1)=\varepsilon_з(f_2)=\varepsilon_э$, $\varepsilon_к(f_1)=\varepsilon_к(f_2)=\varepsilon_к$, что наиболее часто распространено на практике, тогда также равны друг другу величины емкости обмоток относительно корпуса до пропитки, измеренные на упомянутых частотах $C_{дп12}(f_1)=C_{дп12}(f_2)=C_{дп12}$, и величины $C_{экв}(f_1)=C_{экв}(f_2)=C_{экв}$.

В этом случае отпадает необходимость измерять ёмкость каждой контролируемой обмотки до пропитки дважды на каждой из выбранных частот f_1 и f_2, а достаточно измерить упомянутую емкость только на одной из выбранных частот. При равенстве $\varepsilon_э(f_1)=\varepsilon_э(f_2)=\varepsilon_э$, $\varepsilon_к(f_1)=\varepsilon_к(f_2)=\varepsilon_к$ существенно упрощается и формула (22), которую можно записать в виде:

$$K=\frac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}=$$

$$=\frac{\begin{pmatrix}\ln C_{ппkj}(f_2)+\ln(C_{экв}-C_{дпkj})-\\-\ln C_{дпkj}-\ln[C_{экв}-C_{ппkj}(f_2)]\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}\ln C_{ппkj}(f_1)+\ln(C_{экв}-C_{дпkj})-\\-\ln C_{дпkj})-\ln[C_{экв}-C_{ппkj}(f_1)]\end{pmatrix}}=$$

$$\frac{\ln C_{ппkj}(f_2)-\ln[C_{экв}-C_{ппkj}(f_2)]+A}{\ln C_{ппkj}(f_1)-\ln[C_{экв}-C_{ппkj}(f_1)]+A},\qquad(23)$$

где $A=\ln(C_{экв}-C_{дпkj})-\ln C_{дпkj}=\ln\frac{C_{экв}-C_{дпkj}}{C_{дпkj}}$.

Формулы (16) и (17) могут быть записаны в виде

$$K_{прkj}=\frac{1}{\ln\varepsilon_{пс}(f_1)}\ln\frac{C_{ппkj}(f_1)[C_{экв}-C_{дпkj}]}{C_{дпkj}[C_{экв}-C_{ппkj}(f_1)]}.\qquad(24)$$

Произведя аналогичные преобразования для емкостей контролируемой обмотки на частоте электромагнитного поля f_2, можно показать, что

$$K_{прkj}=\frac{1}{\ln\varepsilon_{пс}(f_1)}\ln\frac{C_{ппkj}(f_2)[C_{экв}-C_{дпkj}]}{C_{дпkj}[C_{экв}-C_{ппkj}(f_2)]}.\qquad(25)$$

Заменив в вышеприведенных формулах индексы kj на конкретные номера фаз, можно определить коэффициенты пропитки любых двух фаз обмотки $K_{пр12}$, $K_{пр13}$, $K_{пр23}$.

Коэффициенты пропитки $K_{пр12}$, $K_{пр13}$, $K_{пр23}$ являются среднестатистической характеристикой пропитки соответствующих двух фаз, и их величины можно определить из выражений:

$$K_{пр12}=\frac{K_{пр1}+K_{пр2}}{2},\qquad(26)$$

$$K_{пр13}=\frac{K_{пр1}+K_{пр3}}{2},\qquad(27)$$

$$K_{пр23}=\frac{K_{пр3}+K_{пр2}}{2},\qquad(28)$$

где $K_{пр1}$, $K_{пр2}$, $K_{пр3}$ – коэффициенты пропитки фаз 1, 2 и 3.

Решив систему уравнений (26)–(28) относительно коэффициентов пропитки фаз $K_{пр1}$, $K_{пр2}$, $K_{пр3}$, получим

$$K_{пр1}=K_{пр12}-K_{пр23}+K_{пр13},\qquad(29)$$

$$K_{пр2}=K_{пр23}-K_{пр13}+K_{пр12},\qquad(30)$$

$$K_{пр3}=K_{пр13}-K_{пр12}+K_{пр23}.\qquad(31)$$

Практическая реализация результатов

На рис. 3 приведена функциональная электрическая схема устройства для определения степени высушенности пропиточного состава по коэффициенту K в обмотках электродвигателя, реализующего предлагаемый способ и эпюры напряжений, поясняющие работу устройства. Устройство для определения коэффициента пропитки обмоток электрических машин (рис. 3, А), содержит: двухчастотный генератор – 1, измерительный усилитель – 2, синхронный детектор – 3, аналого-цифровой преобразователь – 4, преобразователь – 5 двоичного кода в двоично-десятичной последовательно-параллельный код, блок сопряжения – 6, вычислительный блок – 7, блок управления – 8. К первому выходу генератора – 1 подключена обмотка – 9 контролируемого изделия, корпус которого соединен с входом – 3 измерительного усилителя – 2.

Второй выход генератора – 1 соединен с управляющим входом синхронного детектора – 3. Измерительный усилитель – 2 соединен с входом синхронного детектора – 3, который соединен с АЦП – 4. Выход АЦП – 4 подключён к преобразователю – 5 двоичного кода в двоично-десятичный последовательно-параллельный код. Выход преобразователя – 5 соединен с блоком сопряжения – 6, выход – 4 которого соединен с входом блока управления – 8. Информационный выход блока сопряжения – 6 соединен с входом вычислительного блока – 7. Выходы блока управления – 8 подключены к входу генератора – 1 и ко второму входу аналого-цифрового преобразователя соответственно. Устройство работает следующим образом. Нажимают кнопку «Пуск» и напряжение треугольной формы с частотой, например 100 Гц (рис. 3, эпюра *а*), лежащей в дисперсионной области, формируемое двухчастотным генератором – 1, поступает через испытуемую емкость C_x между статором и обмоткой на усилитель тока – 2. В усилителе – 2 напряжение в результате дифференцирования приобретает форму прямоугольного импульса с амплитудой, пропорциональной емкости C_x (рис. 3, эпюра *б*). Сформированный импульс далее через синхронный детектор – 3 поступает на АЦП – 4, где происходит преобразование напряжения в двоичный параллельный код, который поступает на вход преобразователя – 5. В преобразователе – 5 осуществляется преобразование двоичного кода в двоично-десятичный последовательно-параллельный код, который, в свою очередь, преобразуется в последовательный десятичный код в блоке сопряжения – 6 и вводится в память вычислительного блока – 7.

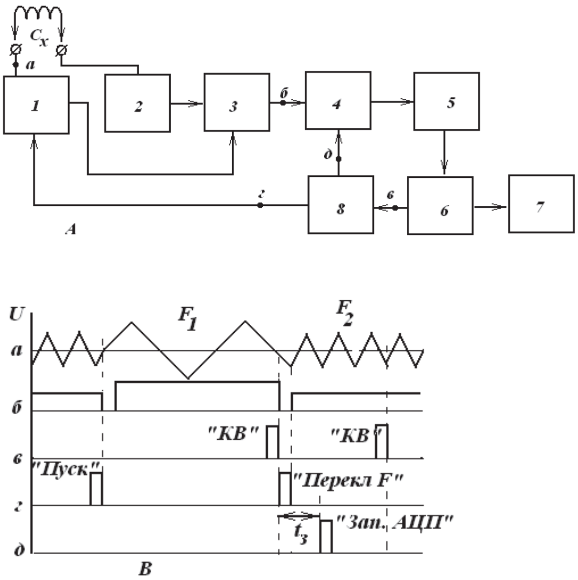

Рис. 3. *Функциональная электрическая схема устройства контроля коэффициента пропитки (А) и эпюры (В)*

Fig. 3. *Functional electric diagram of the device for controlling the coefficient of impregnation (A) and plot (B)*

По окончании ввода блок сопряжения вырабатывает сигнал «Конец ввода» («КВ») (рис. 3, эпюра В), который поступает в блок управления – 8, где формируются два сигнала (рис. 3, эпюры *г* и *д*), разрешающие повторное измерение C_x на частоте, лежащей в оптической области, например, 5000 Гц, и запись в память. По результату измерений $C_{дп1}$, $C_{дп2}$, $C_{пп1}$, $C_{пп2}$, введенных в память вычислительного блока – 7 автоматически вычисляется не только коэффициент пропитки корпусных полостей обмотки, коэффициент пропитки в соответствии с выражениями (7) или (8), но и определяется степень отверждения пропиточного состава по выражению (12).

По предлагаемому способу осуществлялся контроль пропитки в фазах пропитанной обмотки статоров двигателя типа 4АИР112М [31, 32]. Обмотка статора, соединенная звездой, пропитывалась струйным методом компаундом КП-34 и после пропитки сушились.

Предварительно перед контролем подготавливали партию образцов компаунда КП-4 по ГОСТ 19007–73 с различными, отличающимися от образца к образцу, степенями высушенности, и у каждого из упомянутых образцов снимали зависимость диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного поля. Снятые зависимости приведены на рис. 1, *а*. Выбирали две частоты измерения: f_1=1000 Гц, лежащую в дисперсионной области частотной зависимости компаунда КП-34, f_2=10 кГц в оптической области не отвержденного изоляционного пропиточного состава КП-34. Затем, после выбора двух частоты измерения, используя снятые для образцов частотные зависимости, строили график зависимости (рис. 1, *б*) степени высушенности пропиточного компаунда КП-34 от отношения диэлектрических проницаемостей $K=\dfrac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}$, где $\varepsilon_{пс}(f_1)$ и $\varepsilon_{пс}(f_2)$ – диэлектрические проницаемости пропиточного состава, измеренные на частотах f_1 и f_2 электромагнитного поля соответственно.

У соответствующих двух фаз непропитанной обмотки измеряли ёмкости относительно корпуса на двух выбранных частотах $C_{дп12}(f_1)$ и $C_{дп13}(f_1)$, $C_{дп23}(f_1)$ и $C_{дп12}(f_2)$, $C_{дп13}(f_2)$ и $C_{дп23}(f_2)$. Во всех случаях для каждых двух фаз контролируемой обмотки значения ёмкости относительно корпуса, измеренные на двух частотах, были одинаковыми, т. е. $C_{дп12}(f_1)=C_{дп12}(f_2)=C_{дп12}$, $C_{дп13}(f_1)=C_{дп13}(f_2)=C_{дп13}$, $C_{дп23}(f_1)=C_{дп23}(f_2)=C_{дп23}$. Это указывало на то, что диэлектрические проницаемости эмалевой и корпусной изоляции в выбранном диапазоне частот не зависят от частоты. Выявленное равенство послужило основанием для того, чтобы считать, что для всех контролируемых обмоток справедливы равенства: $\varepsilon_э(f_1)=\varepsilon_э(f_2)=\varepsilon_э$, $\varepsilon_к(f_1)=\varepsilon_к(f_2)=\varepsilon_к$, и $C_{экв}(f_1)=C_{экв}(f_2)=C_{экв}$. Однако в общем случае емкости $C_{дп12}(f_1)\neq C_{дп13}(f_1)\neq C_{дп23}(f_1)$ и $C_{дп12}(f_2)\neq C_{дп13}(f_2)\neq C_{дп23}(f_2)$ не равны друг другу, так как их величины зависят от того, как уложены витки упомянутых фаз в обмотке, и от неодинаковых значений полостей в пазах. Полученные результаты показали, что для оценки степени отверждения пропиточного состава в каждой из контролируемых обмоток можно использовать формулу (23).

Затем у каждой из двух фаз контролируемой обмотки измеряли на выбранных двух частотах емкости относительно корпуса после пропитки и сушки обмотки $C_{пп12}(f_1)$, $C_{пп13}(f_1)$, $C_{пп23}(f_1)$ и $C_{пп12}(f_2)$,

$C_{пп13}(f_2)$, $C_{пп23}(f_2)$, и по результатам измерений вычисляли отношение $K=\dfrac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}$ по формуле

$$K=\frac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}=$$
$$=\frac{\ln C_{ппkj}(f_2)-\ln[C_{экв}-C_{ппhj}(f_2)]+A}{\ln C_{ппhi}(f_1)-\ln[C_{экв}-C_{ппhj}(f_1)]+A},\qquad(32)$$

где $C_{экв}(f_1)=C_{экв}(f_2)=C_{экв}=\dfrac{2pS\varepsilon_0\varepsilon_э\varepsilon_к}{3[d_э\varepsilon_к+d_к\varepsilon_э]}$ – эквивалентные емкости двух фаз обмотки, складывающиеся из последовательно соединенных емкостей эмалевой и корпусной изоляции контролируемой обмотки на частотах f_1 и f_2 электромагнитного поля соответственно, $p=36$ – количество пазов в магнитном сердечнике, в которые всыпана контролируемая часть обмотки; S=0,5375·10^{-2} м^2 – площадь паза; ε_0=8,854187·10^{-12} – электрическая постоянная; $\varepsilon_э$=3,85 – диэлектрическая проницаемость эмалевой изоляции провода обмотки на частотах f_1 и f_2 электромагнитного поля; $\varepsilon_к$=5,92 – диэлектрические проницаемости корпусной изоляции на частотах f_1 и f_2 электромагнитного поля соответственно; $d_э$=0,7·10^{-3} м – толщина эмалевой изоляции провода; $d_к$=1·10^{-3} м – толщина корпусной изоляции. Расчетная постоянная величина $C_{экв}$, которую использовали для оценки степени отверждения всех контролируемых обмоток, была равна

$$C_{экв}=\frac{2pS\varepsilon_0\varepsilon_э\varepsilon_к}{3[d_э\varepsilon_к+d_к\varepsilon_э]}=$$
$$=\frac{2\cdot36\cdot1,402\cdot10^{-2}\cdot8,854187817\cdot10^{-12}\cdot3,85\cdot5,92}{23,982\cdot10^{-3}}=$$
$$=8493,73\ \text{пФ}.$$

После чего по вычисленной величине $K=\dfrac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}$ определяли из графика зависимости (рис. 1) степень высушенности пропиточного состава от отношения диэлектрических проницаемостей в каждой контролируемой обмотке.

Результаты измерений и расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1. *Результаты измерений и расчетов*
Table 1. *Results of measurements and calculations*

$C_{дп}$, пФ	$C_{пп}(f_1)$, пФ	$C_{пп}(f_2)$, пФ	A	$\dfrac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}$	Степень высушенности Dryness degree
$C_{дп12}$=1660	$C_{пп12}$=2410	$C_{пп12}$=2241,9	1,415	0,796	5
$C_{дп13}$=1590	$C_{пп13}$=2380	$C_{пп13}$=2160,4	1,468	0,73	4
$C_{дп23}$=1630	$C_{пп23}$=2425	$C_{пп23}$=2255,3	1,438	0,8	5

Как следует из табл. 1, все три фазы обмотки имеют 4–5 степень высушенности, т. е. являются недосушенными, что служит показателем их низкого качества. Поэтому для повышения качества обмоток нужно пересмотреть режимы и время их сушки.

Из графика на рис. 1, *б* определяем, что $K=\dfrac{\lg\varepsilon_{пс}(f_2)}{\lg\varepsilon_{пс}(f_1)}\cong0,8,$ что соответствует пятой степени высушенности пропиточного состава. По графикам, приведенным на рис. 1, находим, что на частоте f_2=10 кГц диэлектрическая проницаемость не отверждённого пропиточного состава $\varepsilon_п$=6,31. Результаты контроля внесены в табл. 2.

Таблица 2. *Сравнительный анализ*
Table 2. *Comparative analysis*

По предлагаемому способу According to the proposed method			По способу-прототипу [31] According to the method-prototype [31]		
K_{12}=0,21	K_{13}=0,21	K_{23}=0,22	K_{12}=0,27	K_{13}=0,27	K_{23}=0,29
K_1=0,2	K_2=0,22	K_3=0,22	K_1=0,25	K_2=0,29	K_3=29

Затем по формуле (25) рассчитывали коэффициенты пропитки двух фаз обмотки по предлагаемому способу и по способу [31]. В способе [31] при расчете коэффициентов пропитки фаз диэлектрическая проницаемость отвержденного до 7 степени компаунда КП-34 равняется $\varepsilon_п$=4,2. По формулам (29)–(32) определяли коэффициенты пропитки и сушки каждой из трёх фаз.

Как следует из табл. 2, погрешность определения коэффициента пропитки по предлагаемому способу на (25–32) % выше, чем по способу прототипу.

Заключение

Таким образом, рассмотренный способ и устройство контроля распределенности пропиточного состава по фазам обмотки и одновременного контроля степени отверждения пропиточного состава, по сравнению с известными способами контроля указанных параметров [23, 24], более информативны. Ёмкостные способы контроля качества пропитки во всех известных аналогах не учитывают степени отверждения пропиточного состава. Это приводит к тому, что коэффициент пропитки, определяемый указанными способами, может существенно отличаться от реального коэффициента. Кроме того, ни один из аналогов не позволяет определить степень высушенности проникшего в обмотки пропиточного состава, что снижает не только точность, но и информативность контроля. Предлагаемый способ, по сравнению известными аналогами, устраняет недостатки аналогов и имеет более высокую точность определения коэффициента пропитки обмоток, что связано с учетом степени отверждения пропиточного состава и с возможностью более точного определением его диэлектрической проницаемости в обмотке. Предлагаемый способ особенно важен для контроля изоляции обмоток электрических машин горнодобывающей промышленности, где безотказность и надежность изделий наиболее важны для предотвращения аварийных и катастрофических ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
2. Колмаков Е.А., Кондрашов П.М., Зеньков И.В. Обзор конструкций фильтров в составе погружных электроцентробежных насосов при добыче нефти // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 1. – С. 150–155.
3. Компьютерная система для функциональной диагностики электроприводов карьерных экскаваторов / В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев, В.М. Завьялов, И.Ю. Семыкина // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 6. – С. 159–168.
4. Русский Е.Ю. Анализ прочности роторов шахтных осевых вентиляторов // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 2. – С. 31–34.
5. Герике П.Б. Определение дефектов динамического оборудования тяговых лебедок экскаваторов типа драглайн по параметрам механических колебаний // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 1. – С. 21–26.
6. 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.
7. Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – Chicago, June, 2003. – P. 459–462.
8. 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.
9. 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.
10. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – Chicago, June, 2008. – P. 257– 260.
11. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications / D. Hwang, K. Lee, Y. Kim, I. Lee, T. Lim, D. Kim // IEEE Industry Application Conference. – Chicago, June, 2003. – V. 1. – P. 432–438.
12. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments / N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, P. Maussion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – V. 60. – № 5. – P. 60–67.
13. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – P. 1–5.
14. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems / S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – V. 55. – № 12. – P. 4127–4134.
15. ГОСТ IEC 60851–5-2011. Провода обмоточные. Методы испытаний. Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
16. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1999. – V. 6. – № 2. – P. 20–26.
17. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
18. 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.
19. Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. Motor winding problems caused by inverter drives // IEEE Industry Applications Magazine. – 2003. – V. 9. – № 4. – P. 22–31.
20. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study // Physica. – 2007. – V. 396. – № 3. – P. 132–137.
21. 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.
22. Кондратьева Н.Г., Кузнецов Н.А. Сравнительная оценка коэффициентов заполнения паза пропиточным составом, определенных различными методами // Технология электротехнического производства. – 1981. – № 12. – С. 14–16.
23. Дудкин А.Н. Разработка методов оценки технологического процесса пропитки обмоток асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1980. – 163 с.
24. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Ёмкостной контроль качества пропитки обмоток электрических машин общего назначения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 69–78.
25. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
26. Frost N., Chapman M., Bruetsch R. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs // IEEE Insulation. – 2008. – V. 1. – № 4. – P. 571–574.
27. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems / S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – V. 55. – № 12. – P. 4127–4134.
28. Halpem E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1967. – V. 2. – № 3. – P. 141–145.
29. ГОСТ 19007–73. Материалы лакокрасочные. Метод определения времени и степени высыхания. Госстандарт России. – М.: Государственный стандарт Союза ССР, 1974. – С. 5.
30. Способ определения коэффициента пропитки обмоток электрических машин: авт. свид. СССР № 1241361; заявл. 24.06.83; опубл. 30.06.86. Бюл. № 24. – 4 с.
31. 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.

Поступила 05.04.2017 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 621.313.045:621.315.61

CONTROL OVER INSULATION OF ELECTRIC DRIVES WINDINGS IN MINING EQUIPMENT AFTER TECHNOLOGICAL OPERATIONS OF IMPREGNATION AND DRYING

Gennadiy V. Smirnov[1],
smirnov@main.tusur.ru

Dmitriy G. Smirnov[1],
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 electric machines are one of the most common types of electrical industry products, and they are used in varied industries. The failure of the electrical machine leads to a crash, shutdown and, consequently, to high economic cost of eliminating the results of machine failure. The results of electric machines failure are especially tangible in exploration, production and transportation of geo-resources in the oil, mining, coal, chemical and other industries, as these industries are currently the basis for formation of the budget of the country. The reliability and uptime of these machines are largely determined by impregnation and drying of windings, as these operations form the important qualitative characteristics of the windings: insulating, thermal, moisture and mechanical. All these properties depend on the degree of filling winding cavities with impregnating composition and the degree of its polymerization (curing). In the case of lack of dryness (compound curing completion; polymerization, etc.) of the windings after impregnation the defects can occur in the inter-turn insulation during storage and transportation of equipment to the operation site, which inevitably leads to decrease in windings resistance insulation. Improvement of the operations is impossible without adequate methods of non-destructive quality control of carrying out these operations. Therefore, the development of methods to control the quality of impregnation and the degree of rejection of the impregnating composition in the windings is very topical.*

The aim *of the work is to demonstrate the possibility of controlling the impregnating composition distribution in the winding and the degree of its curing by the results of measuring the capacitance of the windings relative to the magnetic core at two frequencies of the electromagnetic field.*

Research methods: *electromagnetic, to study the dependence of dielectric permittivity of the impregnating composition on the electromagnetic field frequency and curing degree.*

Results. *The paper considers the capacitive method of monitoring the curing degree of the impregnating composition in the windings of electrical products and introduces the experimentally obtained graphs of dependence of the compound KP-34 dielectric permeability on the electromagnetic field frequency taken at different dryness degrees of the compound. The authors have justified the physical bases of controlling the quality of impregnation and drying. The paper introduces the main criteria for assessing the quality of these technological operations and the diagram of the monitoring device and considers the principle of its operation.*

Key words:
Winding, impregnating composition, degree of cure, frequency dependence, dielectric constant, capacitance, amplifier, synchronous detector, computing unit.

REFERENCES

1. Kurbatova O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornykh maschin i elektrooborudovaniya* [installation and repairing of mining machinery and electrical equipment]. Vladivostok, DVGTU Publ. house, 2004. 286 p.
2. Kolmakov E.A., Kondrashov P.M., Zenkov I.V. Obzor konstruktsii filtrov v sostave pogruzhnykh elektrotsentrobezhnykh nasosov pri dobyche nefti [Review of filter design in the composition of electrical submersible pumps in oil production]. *Vestnik KuzGTU*, 2016, no. 1, pp. 150–155.
3. Kashirskikh V.G., Garaev A.N., Zavyalov V.M., Semykina I.Yu. Computernaya sistema dlya funktsionalnoy diagnostiki elektroprivodov karyernykh ekskovatorov [Computer system for functional diagnostics of electric drives of quarrytion excavators]. *Bulletin of KuzGTU*, 2016, no. 6, pp. 159–168.
4. Russky E.Yu. Analiz prochnosti rotorov shakhtnykh osevykh ventilyatorov [Analysis of rotor strength in the mine axial fans]. *Vestnik KuzGTU*, 2015, no. 2, pp. 31–34.
5. Gerike P.B. Opredelenie defektov dinamitcheskogo oborudovanya tyagovykh lebedok ekskovatorov tipa draglayn po parametram mekhanicheskikh kolebaniy [Defining the defects of dynamic equipment of traction hoists in the dragline type excavators by the parameters of mechanical vibrations]. *Vestnik KuzGTU*, 2014, no. 1, pp. 21–26.
6. Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadov V.I., Petukevich M.S., Bikbaiva 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.
7. Gupta B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. Chicago, June, 2003. pp. 459–462.
8. Smyrak B., Knych T., Mamala A., Uliasz P., Jabłoński M. A new generation of aluminum enameled winding wires. *Wire Journal International*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 55–61.
9. 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.
10. Chapman M., Frost N., Bruetsch R. Insulation systems for rotating low-voltage machines. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Chicago, June, 2008. pp. 257–260.
11. Hwang D., Lee K., Kim Y., Lee I., Lim T., Kim D. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications. *IEEE Industry Application Conference*. Chicago, June, 2003. Vol. l, pp. 432–438.

12. Lahoud N., Faucher J., Malec D., Maussion P. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 5, pp. 60–67.
13. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–5.
14. Grubic S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4134.
15. *GOST IEC 60851–5-2011. Provoda obmototchnye. Metody ispitany. Ch. 5. Elektritcheskie svoistva* [State Standard 60851–5-2011. Magnet wires. Test methods. P. 5. Electrical properties]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 P.
16. Bellomo J.P., Castelan P., Lebey T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1999, vol. 6, no. 2, pp. 20–26.
17. Borisenko A., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh elektritcheckikh maschin* [Cooling industrial electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
18. Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadov V.I., Petukevich M.S., Ponamarev S.A. Thermal properties of magnetodielectric 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.
19. Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. Motor winding problems caused by inverter drives. IEEE Industry Applications Magazine, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 22–31.
20. Prasad A., Prasad K. Effective permittivity of random composite media: a comparative study. *Physica*, 2007, vol. 396, no. 11, pp. 132–137.
21. Pokholkov Yu.P., Besperstov P.P., Pykhtin V.V. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya obmotok na defektnost vitkovoy 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.
22. Kondrateva G.N., Kuznetsov I.N. Sravnitelnaya otsenka koeffitsientov zapolneniya paza propitotchnym sostavom, opredelennykh razlichnymi metodami [Comparative evaluation of the fill factor of the groove of the impregnating composition defined by different methods]. *Technology electrical production*, 1981, no. 12, pp. 14–16
23. Dudkin A.N. *Razrabotka metodov otsenki tekhnologicheskogo protsessa propitki obmotok asinkhronnykh dvigateley.* Dis. Kand. nauk [Development of methods for evaluation of technological process of impregnation of induction motor windings. Cand. Diss.]. Tomsk, 1980. 163 p.
24. Smirnov G.V., Smirnov D.G. Capacitive method for controlling the quality of winding impregnation in electric motor for general industrial use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 69–77. In Rus.
25. Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdely* [Reliability of winding insulation in electrical products]. Tomsk, Tomsk State University Press, 1990. 192 p.
26. Frost N., Chapman M., Bruetsch R. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs. *IEEE Insulation*, 2008, vol. 1, no. 4, pp. 571–574.
27. Grubic S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4134.
28. Halpem E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1967, vol. 2, no. 3, pp. 141–145.
29. GOST 19007–73. *Materiali lakokrasotchnie. Metod opredilenja vremeni i stepeni visichania.* [Paint and varnish materials. Method of determining the time and extent of drying]. Moscow, State standard of the USSR, 1974. 5 p.
30. Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhdaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the impregnation coefficient of windings of electrical machines]. Author certificate. The USSR, no. 1241361, 1986.
31. 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.

Received: 5 April 2017.s

Information abour 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.