

МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Г. В. Суханкин

В статье рассматривается модель измерения диагностического показателя изоляции электрической машины, в частности, асинхронного электродвигателя. В качестве диагностического показателя выбран модуль упругости изоляционного материала.

Ключевые слова: модель, диагностический признак, звуковая волна, обмотка, изоляция.

Асинхронные двигатели (АД) – один из основных и массовых элементов электропривода технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве. Поэтому длительная и надёжная работа всех технологических цепочек, в первую очередь, связана с бесперебойной работой АД. Выход из строя АД приводит как к браку, порче сырья и недоотпуску продукции, так и к ремонту и замене самого электродвигателя [1]. То и другое обуславливает дополнительные затраты, что влияет на себестоимость выпускаемой продукции и, в конечном счёте, на её конкурентоспособность. Особенно это актуально в нынешнее время в условиях повышенной конкурентоспособности после вступления России в ВТО.

Статистика показывает, что наиболее уязвимым звеном в АД является обмотка, а точнее её изоляция, представляющая собой эмалевое покрытие провода и затвердевший пропиточный состав. В среднем по России ремонту подвергается порядка 25 % электродвигателей, причем установлено, что около 80 % от общего их количества приходится на животноводство и малые агропредприятия. При этом следует отметить, что более 85 % аварий связано именно с повреждением электрической части электродвигателей [2].

Для решения задачи по повышению надёжности и увеличению срока службы электродвигателей необходима реализация комплекса мер, включая исследование причин старения изоляции, выявление совокупности факторов, оказывающих основное влияние на этот процесс, разработку адекватной математической модели старения, выявление новых диагностических признаков её состояния, возможность практической оценки степени старения новыми эффективными методами, определение её остаточного ресурса с помощью нейронных обучающихся сетей и т. д.

Для реализации любого из вышеперечисленных пунктов необходимы практические методы измерения диагностических признаков. На сегодняшний день существует около 10 диагностических признаков, по которым можно судить как о состоянии изоляции, так и о самом электродвигателе в целом. Автором и коллегами в [3] удалось выявить новый диагностический показатель и разработать методику его измерения. Этому в немалой степени способствовал анализ уже существующих данных [4]. Например, было выяснено, что одним из основных факторов повреждения изоляции является тепло. В общем виде действие тепла на изоляцию любого типа во времени приводит к увеличению её модуля упругости E , сначала ускоренно, а затем замедляясь (рисунок 1). Для других повреждающих факторов E ведет себя не так однозначно, как на рисунке 1.

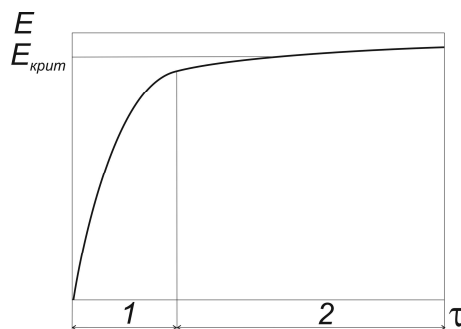


Рисунок 1 – Зависимость E от воздействия тепла во времени τ : 1 – начальный период старения изоляции, 2 – конечный период старения изоляции, $E_{крит}$ – момент выхода из строя изоляции

Однако статический показатель E изоляции в собранном электродвигателе измерить не представляется возможным в силу того, что в обмотку может подаваться только пе-

МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

ременный синусоидальный ток, который в нашем случае является диагностическим.

При подаче в обмотку синусоидального диагностического тока $u = u_0 \sin \omega t$ в изоляции возникают звуковые волны (звуковое давление), которые распространяются во всех направлениях АД (рисунок 2), порождая по сути дела акустические шумы, вследствие их взаимного усиления или ослабления.

Из рисунка 2 видно, что амплитуда акустических волн на начальном этапе эксплуатации АД составила около 12 единиц, что соответствует $2 \cdot 10^{-3}$ Па (а), при пробое изоляции – 25 единиц – $4 \cdot 10^{-3}$ Па (г).

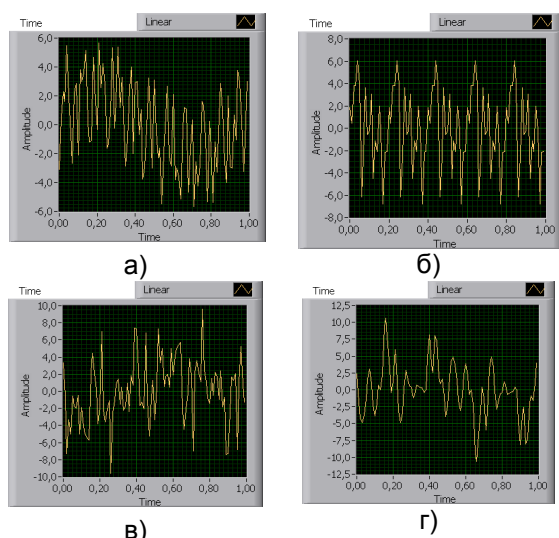


Рисунок 2 – Экспериментальные данные по измерению амплитуды акустических волн в относительных единицах. Время эксплуатации изоляции АД серии 4А, мощностью 1,5 кВт :
а) – 100 ч, б) – 300 ч, в) – 500 ч,
г) – 900 ч (отказ изоляции) [4]

В рассматриваемой модели периодическое воздействие звукового давления осуществляется на вязкоупругую среду. Если поставить в соответствие амплитуду деформации изоляции амплитуде звуковой волны (смещению частиц в полимерной изоляции), движущейся в этой среде, то для стеклообразного полимера при воздействии синусоидального акустического напряжения с частотой ω деформация также изменяется по синусоиде с почти полным совпадением фаз обеих синусоид [4]:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \sin \omega t, \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 \sin \omega t, \end{aligned}$$

где σ_0 , ε_0 – амплитудные значения напряжения и деформации.

Если испытанию подвергается эластичный образец звуковым давлением с частотой,

сравнимой с временем релаксации, то звуковое давление (напряжение) и деформация не будут совпадать по фазе (рисунок 3).

Отставание деформации от действия силы приводит к тому, что деформация достигает максимума тогда, когда напряжение уже прошло через максимальное значение. Это выразится следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \sin \omega t, \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi), \end{aligned}$$

где φ – разность фаз между напряжением и деформацией (рисунок 3).

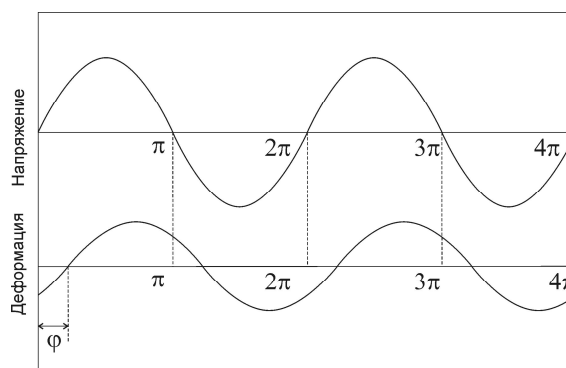


Рисунок 3 – Синусоидальное напряжение и деформация в изоляции АД

Основными соотношениями, используемыми в рассматриваемом методе, являлись:

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2}, \quad (1)$$

где $|E^*|$ – комплексный модуль упругости (диагностический признак (ДП)),
 E' – динамический модуль упругости (ДМУ) изоляции (рисунок 4).

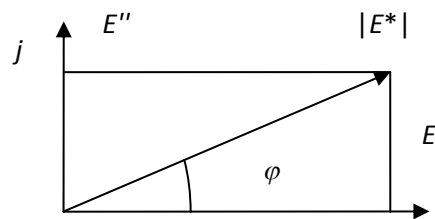


Рисунок 4 – Упругие характеристики полимерной изоляции на комплексной плоскости

ДМУ определяется из выражения (2):

$$E' = \frac{\rho c \left[1 - \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

а модуль потерь (МП) изоляции E'' – из (3):

$$E'' = \frac{\rho c^2 \frac{\alpha \lambda}{2\pi}}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi}\right)^2\right]^2}, \quad (3)$$

где ρ – плотность изоляции, λ – длина акустической волны, α – коэффициент поглощения звука в изоляции.

ДМУ характеризует величину энергии, получаемую и отдаваемую единицей объёма межвитковой и корпусной изоляции за период времени. МП характеризует часть энергии, которая превращается в тепло за один период колебаний.

Однако непосредственно показатель E измерить в эксперименте невозможно. Непосредственно измеряемой величиной является

α , а так как эти величины находятся в функциональной связи по (1–3), то мы можем определять E . Таким образом, измеряя α , мы можем судить о состоянии изоляции АД в любой момент времени. Понимание процесса измерения удобно рассматривать на примере модели. Как известно, модель является упрощенным представлением чего-либо. Поэтому, используя в качестве входного базиса синусоидальную функцию, на выходе модели мы будем иметь такую же функцию, но с изменённой амплитудой. В реальном эксперименте на выходе мы имеем сумму амплитуд множества синусоид, представляющую собой шум (рисунок 2).

При разработке метода измерения диагностического признака была использована модель, представленная на рисунке 5 [4].

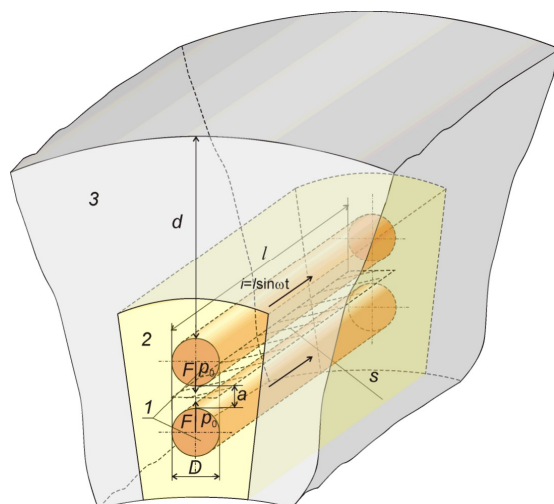


Рисунок 5 – Модель метода измерения $|E^*|$ изоляции обмоток асинхронного двигателя (АД): 1 – проводники обмотки, 2 – изоляция, 3 – магнитопровод, F – сила взаимодействия проводников обмотки; S – площадка, на которую эта сила действует, i – диагностический синусоидальный ток в проводнике; $p \sin \omega t$ – акустическое напряжение, создаваемое взаимодействием проводников; d – путь прохождения волны от точки её генерации до датчика, устанавливаемого на поверхности электродвигателя

При создании модели измерения ДП были допущены следующие упрощения.

1. Число проводников обмотки в пазу – 2.
2. Распространяемая волна, генерируемая взаимодействием этих проводников, является плоской. Расчетное изменение звукового давления уменьшается в такой волне вследствие ее ослабления по экспоненциальному закону:

$$p = p_0 e^{-\alpha d}, \quad (4)$$

где p_0 и p – соответственно звуковые давления, создаваемые в начале и в конце пути волны (до и после прохождения изоляции).

3. Расстояние между проводниками считаем одинаковыми, тогда сила взаимодействия проводников модели:

$$F = \frac{\mu \mu_0 i^2 \sin^2 \omega t}{2\pi a} l,$$

где μ – относительная магнитная проницаемость изоляции,

μ_0 – магнитная постоянная,

a – расстояние между проводниками,

l – длина проводников в пазу,

ω – круговая частота диагностического тока.

В соответствии с моделью (рисунок 5) акустическое напряжение:

МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

$$p_0 = F/S,$$

где F – сила (Н), создаваемая параллельными проводниками обмотки, через которые протекает диагностический ток i ,

$S = D l$ – площадка (m^2) между проводниками обмотки, на которую сила эта действует.

4. d в модели принимаем 10^{-1} м, $D – 10^{-3}$ м, $l – 10^{-1}$ м, что примерно соответствует АД средней мощности, затуханием в элементе 3 модели пренебрегаем, так как $\alpha_3 \ll \alpha_2$.

Таким образом, по экспериментально измеряемой датчиком величине p рассчитывается α по (2), а затем и ДП по (1).

Для понимания принципа измерения была разработана имитационная модель, состоящая из механических элементов, приведённая на рисунке 6, результат её работы – рисунок 7.

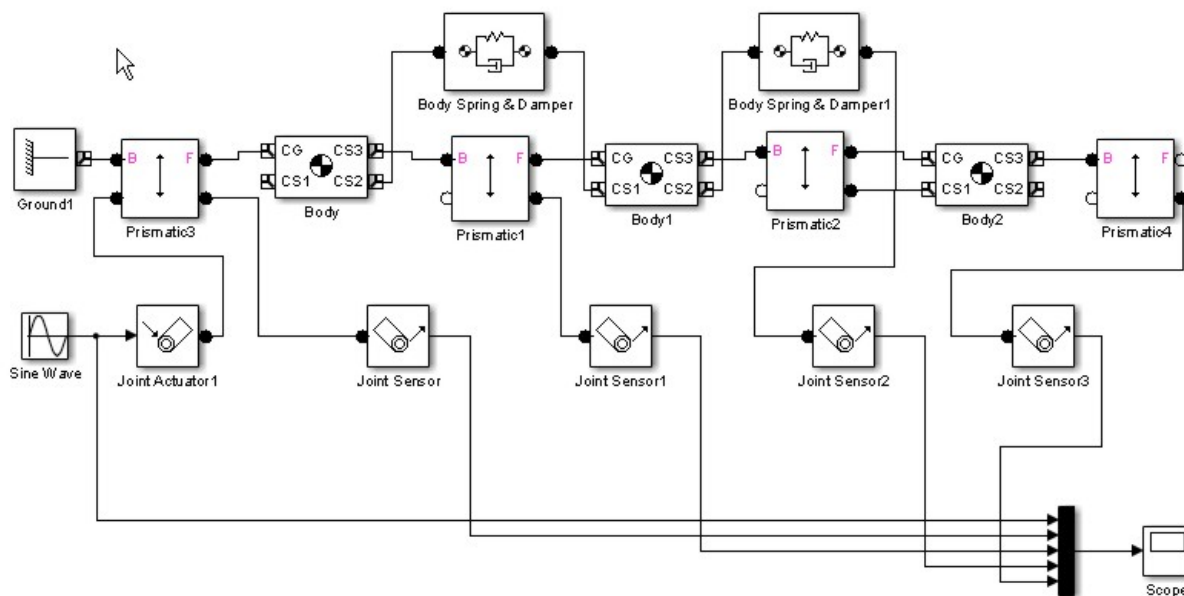


Рисунок 6 – Имитационная механическая модель рассматриваемого метода измерения

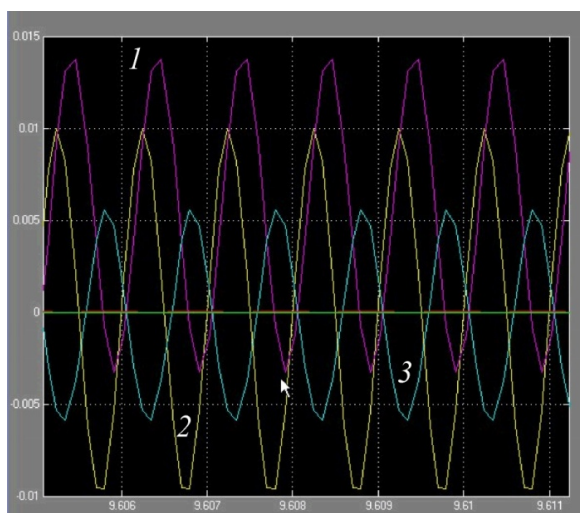


Рисунок 7 – Результат работы имитационной модели: 1 и 2 – p_0 , создаваемое проводниками обмотки, 3 – p , создаваемое волной, после прохождения изоляции

Таким образом, итоговое уравнение для расчета звукового давления определенное в модели:

$$p = \frac{\mu \mu_0 i^2 \sin^2 \omega t}{2\pi a S} e^{-\alpha d}.$$

Вместо α в вышеприведенное уравнение подставляются данные из таблицы 1.

Таблица 1 – Формулы для определения коэффициентов α

Для ДМУ	$\alpha = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{-2 \cdot \pi^2}{\lambda^2} - \frac{c^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho}{E' \cdot \lambda^2} + \frac{\sqrt{8 \cdot c^2 \cdot E \cdot \pi^4 \cdot \lambda^4 \cdot \rho + c^4 \cdot \pi^4 \cdot \lambda^4 \cdot \rho^2}}{E' \cdot \lambda^4}}$
Для МП	$\alpha = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{-\frac{16 \cdot \pi^2}{3 \cdot \lambda^2} + \frac{64 \cdot 2^{1/3} E'' \cdot \pi^4}{3 \cdot (-128 E''^3 \cdot \pi^6 \cdot \lambda^6 + 27 c^4 E'' \pi^6 \lambda^6 \rho^2 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-256 c^4 E''^4 \pi^{12} \rho^2 + 27 c^8 E''^2 \pi^{12} \lambda^{12} \rho^4}})^{1/3} + \frac{2 \cdot 2^{2/3} (-128 E''^3 \pi^6 \lambda^6 + 27 c^4 E'' \pi^6 \lambda^6 \rho^2 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-256 c^4 E''^4 \pi^{12} \rho^2 + 27 c^8 E''^2 \pi^{12} \lambda^{12} \rho^4})^{1/3}}{3 E'' \lambda^4}} \right) -$ $\frac{1}{2} \left(\frac{32 \pi^2}{3 \lambda^2} - \frac{64 \cdot 2^{1/3} E'' \cdot \pi^4}{3 \cdot (-128 E''^3 \cdot \pi^6 \cdot \lambda^6 + 27 c^4 E'' \pi^6 \lambda^6 \rho^2 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-256 c^4 E''^4 \pi^{12} \rho^2 + 27 c^8 E''^2 \pi^{12} \lambda^{12} \rho^4})^{1/3}} - \frac{2 \cdot 2^{2/3} (-128 E''^3 \pi^6 \lambda^6 + 27 c^4 E'' \pi^6 \lambda^6 \rho^2 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-256 c^4 E''^4 \pi^{12} \rho^2 + 27 c^8 E''^2 \pi^{12} \lambda^{12} \rho^4})^{1/3}}{3 E'' \lambda^4} + \frac{16 c^2 \pi^3 \rho}{E'' \lambda^3} \right) \sqrt{\frac{-\frac{16 \cdot \pi^2}{3 \cdot \lambda^2} + \frac{64 \cdot 2^{1/3} E'' \cdot \pi^4}{3 \cdot (-128 E''^3 \cdot \pi^6 \cdot \lambda^6 + 27 c^4 E'' \pi^6 \lambda^6 \rho^2 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-256 c^4 E''^4 \pi^{12} \rho^2 + 27 c^8 E''^2 \pi^{12} \lambda^{12} \rho^4}})^{1/3} + \frac{2 \cdot 2^{2/3} (-128 E''^3 \pi^6 \lambda^6 + 27 c^4 E'' \pi^6 \lambda^6 \rho^2 + 3 \sqrt{3} \sqrt{-256 c^4 E''^4 \pi^{12} \rho^2 + 27 c^8 E''^2 \pi^{12} \lambda^{12} \rho^4})^{1/3}}{3 E'' \lambda^4}}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 2436081 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/11 (2006/01). Способ акустической диагностики изоляции обмоток асинхронного электродвигателя / Н. Т. Герцен, Г. В. Суханкин, Н. П. Воробьев; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «Алт. гос. техн. университет им. И. И. Ползунова (АлтГТУ)» – № 2010129672/28; – заявл. 15.07.2010 г.; – опубл. 10.12.2011 г., – Бюл. № 34. – 12 с.: ил.

2. Суханкин, Г. В. Модель взаимодействия акустического сигнала и изоляции статора электрической машины, подвергшейся старению [Текст] / Г. В. Суханкин, Н. Т. Герцен // Ползуновский вестник. – № 4. – 2009. – С. 124–132.

3. Суханкин, Г. В. Компьютерная система акустической диагностики изоляции электрических машин [Текст] / Н. Т. Герцен, Г. В. Суханкин // Ползуновский вестник. – № 4. – 2007. – С. 146–154.

4. Суханкин, Г. В. Техническая диагностика и остаточный ресурс электроустановок : монография [Текст] / О. К. Никольский, Н. П. Воробьев, Н. Т. Герцен, А. Ф. Костюков, П. И. Семичевский, Г. В. Суханкин, Н. И. Черкасова, Г. А. Гончаренко, под общ. ред. заслуженного деятеля науки и техники России, докт. техн. наук, проф. О. К. Никольского. – Барнаул : Изд-во АДП, 2013. – 207 с.

Суханкин Г. В., к.т.н., E-mail: gen@mail.ru, 656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел. +7(385-2)29-07-44.