

## АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен

*Рассмотрены пути повышения надежности асинхронных электродвигателей путем акустического контроля состояния их изоляции. Многочисленные данные свидетельствуют, что работоспособность изоляции в значительной степени зависит от физико-механических свойств полимерных материалов, из которых она изготавливается. Поэтому в данной статье показано, как контролируются вязкоупругие характеристики изоляции на этапе изготовления или ремонта асинхронного электродвигателя.*

*Ключевые слова: полимерная изоляция, физико-механические показатели, контроль, вязкоупругие характеристики.*

Полимерные материалы, предназначенные для изоляции обмоток, подвергаются статическим и динамическим механическим нагрузкам в процессе работы асинхронного электродвигателя (АЭД). Наиболее часто проводят оценку полимерной изоляции по электрическим характеристикам, в частности, по электрической прочности. Статистические данные, полученные во время эксплуатации АЭД показывают, что работоспособность изоляции в значительной степени зависит от физико-механических свойств полимерных материалов, из которых она выполнена. Более того, если электрические нагрузки действуют на изоляцию только в период эксплуатации, то механические нагрузки, и в первую очередь, внутреннее напряжение, действуют на неё как в период работы электродвигателя, так и в период, когда он отключен. Они возникают в полимерных материалах в процессе изготовления и выполнения ремонта АЭД и действуют на протяжении всего срока эксплуатации. Недооценка роли внутренних напряжений и недостаточный учет механических нагрузок на изоляцию в конструкции АЭД приводят к ухудшению ее эксплуатационных свойств, снижению надёжности [1]. Диагностикой полимерных материалов на этапе изготовления или выполнения профилактического ремонта АЭД обеспечивается эффективный подход к их выбору для обеспечения нормального функционирования изоляции. Основными характеристиками полимерных материалов, влияющими на работоспособность изоляции, являются модуль упругости  $E$ , сдвига  $G$  и коэффициент Пуассона  $\mu$  [2]. Кроме того, во время пропиточных операций

необходим непрерывный контроль вязкости  $\eta$ . Используя эти показатели можно производить оценку упругих и деформационных свойств полимеров. Прочностные свойства изоляции АЭД оцениваются по кратковременному пределу прочности и характеризуются температурно-временной зависимостью, важнейшим параметром которого является ТКЛР (температурный коэффициент линейного расширения).

В соответствии с теорией, надежность полимерной изоляции – это свойство сохранять свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение времени эксплуатации. Под отказом изоляции понимается событие, после которого она перестает выполнять свои функции. При допущении постоянства интенсивности отказов вероятность отказа к данному моменту времени  $t$ :

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda(t)},$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

Среднее время безотказной работы

$$t_p = 1/\lambda.$$

При постоянном действии негативных факторов интенсивность отказов

$$\lambda = 1/t_p.$$

При переменных температурах и механических напряжениях в надежности необходимо учитывать принцип суммирования повреждаемостей [1]:

$$\int_0^{t_p} \frac{d\tau}{\tau[\sigma(t)]} = 1.$$

В случае, если напряжение и температура изменяются равномерно и ступенчато в

## АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

течение времени, то, очевидно, должно выполняться условие:

$$t_1/t_{p1} + t_2/t_{p2} + \dots + t_n/t_{pn} < 1$$

где  $t_1, t_2, t_n$  – промежутки времени.

Весь срок службы:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i.$$

При этом надёжность изоляции

$$P = 1 - Q.$$

Математическая модель надёжности – это математическое выражение, показывающее связь параметров системы, действующих факторов и вероятности безотказной работы системы [1].

Систему изоляции можно представить как вектор состояния  $P$  в какой-либо момент времени  $t$ .

$$P = x_1, x_2, \dots, x_n.$$

Каждая компонента вектора состояния представляет собой совокупность электрических и физико-механических показателей, таких как предел электрических и механических прочностей,  $\operatorname{tg} \delta$ , модуля упругости и сдвига  $E$  и  $G$ , вязкости  $\eta$  и проч.

Вся совокупность состояния системы является некоторым фазовым пространством. Если за  $P_0$  принять начальное состояние системы, а за  $P_n$  – её конечное состояние, то  $P_1, P_2, \dots$  – некоторые промежуточные дискретные значения системы, которые характеризуют ее состояния через  $t, 2t, \dots$  отрезков времени. Такая последовательность векторов характеризует процесс изменения состояния системы. В исследовании [2] показано, что часто доминирующими факторами, определяющими состояние такой системы как изоляцией обмотки электрической машины являются ее физико-механические показатели и механические напряжения (нагрузки), являющиеся следствием действия температур. Таким образом, измерение физико-механических показателей изоляции как на этапах ее изготовления или эксплуатации является важным фактором, влияющим на надёжность ЭМ в целом. Для оценки состояния изоляции, как элемента надёжности ЭМ в целом, необходимо выявление диагностического параметра и возможность его расчета на основе изменения коэффициента передачи акустической волны, прошедшей ее. Акустическая волна в рассматриваемом методе индуцируется вследствие микроперемещений проводников обмотки при пропускании через нее диагностического тока.

При осуществлении контроля отвердения изоляции необходимо наблюдение за превращением системы из жидкого состояния

в твёрдое путём измерения  $\eta$  и  $G$  с помощью акустических импульсов исходя из соотношения:

$$R = \frac{-iZ_1' - Z}{-iZ_1' + Z},$$

где  $R$  – коэффициент отражения,  $Z, Z_1'$  – соответственно импеданс эталона и изоляции.

В результате генерации сдвиговой волны, величина деформации в граничном слое пропорциональна тому, насколько согласован сдвиговой механический импеданс  $Z$  изоляции с импедансом эталона. Если чувствительный датчик установлен так, чтобы измерить энергию отражённого импульса, то по относительному ослаблению интенсивности колебаний можно судить о свойствах изоляции, так как ослабление пропорционально  $Z$ , а твёрдые эталоны имеют высокие значения импеданса. Импульсы, прошедшие через подложку собираются и фиксируются в виде отражённой волны с экспоненциально убывающей амплитудой, интенсивность поглощения  $\Delta$  которой рассчитывается в децибеллах (дБ).

Интенсивность поглощения  $\Delta$  связана с коэффициентом отражения  $R$  формулой:

$$\operatorname{lg} R = -\Delta/40. \quad (1)$$

Функциональные изменения значения интенсивности поглощения  $\Delta$  как функции отвердения можно использовать для исследования кинетики процесса изменения состояния изоляции. Абсолютные значения импеданса рассчитываются из выражения (1) [3]:

$$Z \approx k(1-R)/(1+R),$$

где численный коэффициент, соответствующий эталону находится как  $Z_q \cos \alpha$ . Величина  $G'$  вычисляется по формуле:

$$G' \approx \rho Z^2 \approx k \left( \frac{1-R}{1+R} \right)^2.$$

При контроле полимерной изоляции АЭД методом отражения волна сдвиговых деформаций распространяется в эталоне и отражается от поверхности, на котором она находится. При контроле жидкой фазы изоляции наиболее приемлемым является метод, основанный на использовании поверхностных волн, которые распространяются на границе эталон–изоляция. Эталон представляет собой тонкую металлическую пластинку с размерами  $a \times 2b$  к торцу которой закреплен излучатель акустических волн (рисунок 1), создающий необходимые колебания.

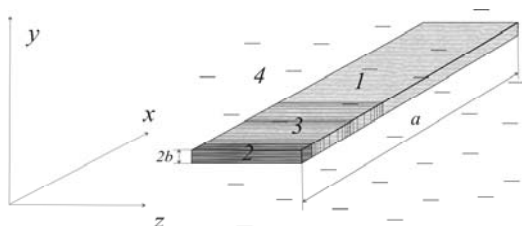


Рисунок 1 – Прямоугольная пластинка, предназначенная для измерения вязкоупругих характеристик жидкой фазы изоляции: 1 – алюминиевая пластинка, 2 – источник акустических волн, 3 – волновые колебания, 4 – изоляция

Поглощение колебаний увеличивается, а их скорость падает, если пластинку поместить в изоляцию. Снижение скорости обуславливается сдвигом фазы. Разница параметров рассматриваемой схемы до и после помещения пластинки в изоляцию позволяет рассчитать её вязкоупругие характеристики. Геометрические параметры пластинки значительно превышают длину сдвиговой волны, распространяющуюся в ней, поэтому метод основывается на использовании пластинки неограниченных размеров. Координатные плоскости со значением  $y = \pm b$  соответствуют поверхности пластинки. Эталон находится в пределах  $y \geq b$  и  $y \leq -b$ . Колебания распространяются вдоль оси  $x$  и симметричны относительно плоскости  $y=0$  со смещением по оси  $z$ . На границе сдвиговые колебания пластинки совпадают с колебаниями в изоляции.

Используя второй закон Ньютона к элементарной площади  $dx dy$  опишем распространение сдвиговых волн.

$$G \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где  $G$  – модуль упругости при сдвиге,  $\rho$  – плотность и  $u$  – смещение, зависящее от трёх параметров: координат  $x, y$  и времени  $t$  [3].

Изоляция является поглотителем колебаний, поэтому вместо  $\mu$  должен использоваться комплексный коэффициент Пуассона в (2). Его действительная часть характеризует энергию колебаний вследствие упругих свойств, а мнимая – вязкую составляющую или способность превращать энергию колебаний необратимо в тепло. Решение уравнения (2) для рассмотренной схемы имеет следующий вид:

$$\omega_k = A_n e^{i\omega t} e^{-kx} (e^{ly} + e^{-ly}), \quad (3)$$

где  $\omega$  – круговая частота, а  $k$  и  $l$  – комплексные числа, которые являются соответ-

ственно  $x$ -й и  $y$ -й компонентами. Действительные части этих величин характеризуют интенсивность поглощения волны в направлениях  $x$  и  $y$ , а мнимые части описывают её фазовые составляющие.

При сдвиговых волнах импеданс изоляции может быть найден как произведение известного импеданса эталона на его толщину и разность  $\Delta k$ , определенную при ее наличии и отсутствии.

Таким образом, экспериментально измеряемой величиной является комплексная величина  $\Delta k$ , которая определяется как

$$\Delta k = D + i\Theta.$$

Увеличение интенсивности затухания, связанной помещением эталона в изоляцию является действительной частью этой формулы, мнимая же часть обусловлена фазовыми изменениями колебаний [3]. Некоторые данные, полученные по данной методике в отверждающейся эпоксидной смоле, при  $t=25^\circ$  на частоте 1,6 МГц приведены в таблице.

Таблица 1 - Данные, полученные с помощью метода колеблющейся пластинки для эпоксидной изоляции

Время, ч	Вязкость, $\eta$ , кг/м·с	Модуль сдвига, Н/м <sup>2</sup>	
		G'	G''
1	$0,83 \cdot 10^{-2}$	$33 \cdot 10^{-5}$	$19 \cdot 10^{-5}$
5	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$47 \cdot 10^{-3}$	$34 \cdot 10^{-3}$
10	$1,33 \cdot 10^{-1}$	$64 \cdot 10^{-1}$	$56 \cdot 10^{-1}$
15	1,54	$21 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$
20	-	$35 \cdot 10^5$	$44 \cdot 10^5$
24	-	$12 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^9$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галушко, А.И. Надёжность изоляции электрических машин/ И.С. Максимова, Р.Г. Оснач, П.М. Хазановский.- М.: Энергия, 1979. – 176 с. ил.
2. Хомутов, О.И. Электрические и акустические методы диагностики изоляции электрических машин: монография/ Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен, В.И. Сташко. -Новосибирск: Наука, 2007. –210 с.
3. Viscoelastic relaxation in polymers. Edited by M.SHEN. Interscience publisher a division of John Wiley and sons, Inc. Los Angeles, 1971.

**Суханкин Г.В.**, к.т.н., АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. 8(3852) 29-07-44;

**Герцен Н.Т.**, к.т.н., ОАО «АДП» тел. 8(3852) 26-04-98.