

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Г.В. Суханкин

*В настоящей статье исследуется возможность повышения точности прогнозирования остаточного ресурса асинхронного двигателя (АД) на различных этапах эксплуатации в различных условиях температуры, влажности и вибрации.*

*Ключевые слова: остаточный ресурс, изоляция, упругость, диагностика.*

В процессе эксплуатации АД возникают и накапливаются повреждения изоляции, которые можно отнести к двум группам: производственным и внешней среды. Те и другие могут существенно влиять на остаточный ресурс АД. Кроме того, допущенные при изготовлении дефекты изоляции, развиваясь, также снижают работоспособность АД. Если учитывать, что 90-95% повреждений АД, согласно статистике, связано с повреждением изоляции, то по ее состоянию, можно судить о работоспособности двигателя в целом. Таким образом, правильная диагностика изоляции может существенно помочь в определении остаточного ресурса двигателя. При этом надо иметь в виду, что состояние изоляции определяется измерением диагностического параметра. Существует несколько методов диагностики изоляции с соответствующими диагностическими параметрами:

- повышенным напряжением;
- по частичным разрядам;
- добротно-емкостный;
- по сопротивлению изоляции;
- коэффициенту абсорбции;
- тангенсу угла диэлектрических потерь.

Любой из перечисленных методов позволяет с той или иной точностью определять остаточный ресурс изоляции, в зависимости от типа двигателя, условий эксплуатации и др. Для повышения точности измерения иногда целесообразно использовать несколько методов одновременно. Например, при измерении сопротивления изоляции надо учитывать ее зависимость от увлажнения. Путем измерения сопротивления сухой изоляции выявить дефекты изоляции невозможно, а, следовательно, и остаточный ресурс. Поэтому этот диагностический параметр целесообразно использовать в комбинации с другими. В той или иной степени ситуация с другими оценочными параметрами выглядит аналогично.

Для повышения точности прогнозирования остаточного ресурса АД разработано техническое устройство, работающее по принципу описанному ниже.

Известно, что модуль упругости  $E$  изоляции в обмотке статора асинхронного двигателя зависит от параметров акустических колебаний в изоляции следующим образом [1, с 10]:

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

где  $\rho$  – плотность изоляции статора АД,  $c$  – скорость распространения волны в изоляции статора АД,  $\alpha$  – коэффициент поглощения в изоляции статора АД,  $\lambda$  – длина волны акустических колебаний, величины  $c$ ,  $f$ ,  $\lambda$  связаны между собой соотношением

$$f = c/\lambda. \quad (2)$$

Плотность изоляции рассчитывается из отношения ее массы к объему, а скорость рассчитывается из соотношения [2, с 28]  $\rho c = z$ , где  $z$  – импеданс (акустическое сопротивление) изоляции. В свою очередь, импеданс можно рассчитать по формуле [3, с 27]  $z = \rho v$ , где  $\rho$  – акустическое давление, создаваемое звуком,  $v$  – колебательная скорость.

Определение величины диагностического тока проведем исходя из следующего.

Оценим потери полезного сигнала в статоре на магнитострикционный эффект. Напряженность магнитного поля длинного провода с током [4, с 156]

$$H = \frac{i}{2\pi a}, \quad (3)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м,  $i$  – ток, А,  $a$  – расстояние между проводниками паза обмотки статора, м.

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При синусоидальном диагностическом токе амплитудой порядка 1 А и усредненном расстоянии между проводниками паза обмотки статора  $a = 10^{-3}$  м величина  $H \approx 1,6 \cdot 10^2$  А/м. При таком диагностическом токе и напряженности магнитного поля потерями акустической энергии на магнитострикцию можно пренебречь. При увеличении силы диагностического тока свыше 1 А магнитострикционный эффект начинает оказывать заметное влияние на полезный сигнал, следовательно, сила тока, пропускаемого через обмотки статора, должна устанавливаться на уровне 1 А.

Экспериментально установлено, что оптимальная частота синусоидального диагностического тока составляет 5-10 кГц. Отклонение от нее приводит к большему затуханию звука.

Блок-схема предлагаемого устройства изображена на рисунке 1.

Устройство работает следующим образом. В измерительной карте 1 генерируют синусоидальный электрический сигнал определенной частоты, который усиливается в усилителе 2, поступает на щиток 3, с него поступает на обмотку статора 4, в обмотке статора электрический сигнал преобразуется в акустический, акустический сигнал проходит через блок 4.1 изоляции провода, через блок

4.2 воздушного зазора, через блок 4.3 стали статора, акустические колебания воспринимаются преобразователем 5, преобразуются в нем в электрические колебания, электрические колебания усиливаются в усилителе 6 и поступают в измерительную карту 1, расположенную на материнской плате 10. Программным пакетом 11 с учетом данных блока задания 12 вычисляется коэффициент затухания  $\alpha$ , модуль упругости  $E$ , номинальное значение модуля упругости  $E_{\text{ном}}$  и нормированное значение модуля упругости  $E_{\text{норм}}$  для конкретного типа изоляции:

$$E_{\text{норм}} = \frac{E_{\text{ном}}}{E} \quad (4)$$

Программным пакетом 11 с учетом условий эксплуатации АД по экспериментальным кривым вычисляется остаточный ресурс работы АД  $\tau_{\text{ост}1}, \tau_{\text{ост}2}, \dots, \tau_{\text{ост}n}$  по формулам:

$$\tau_{\text{ост}1} = \tau_{\text{о}1} - \tau_{\text{х}1}, \quad (5)$$

$$\tau_{\text{ост}2} = \tau_{\text{о}2} - \tau_{\text{х}2}, \quad (6)$$

$$\tau_{\text{ост}n} = \tau_{\text{о}n} - \tau_{\text{х}n}, \quad (7)$$

где  $\tau_{\text{о}1}, \tau_{\text{о}2}, \dots, \tau_{\text{о}n}$  – соответствующие времена отказа АД,  $\tau_{\text{х}1}, \tau_{\text{х}2}, \tau_{\text{х}n}$  – текущие времена работы АД при различных режимах эксплуатации,  $n$  – номер режима эксплуатации.

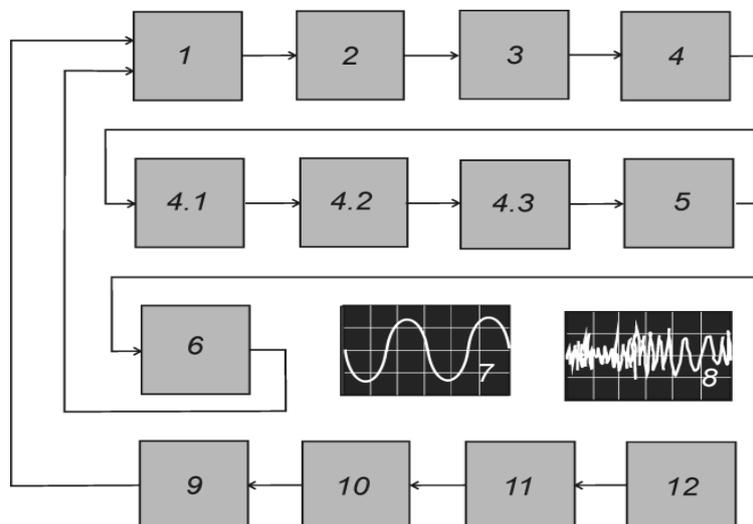


Рисунок 1 – Блок-схема устройства для акустической диагностики изоляции обмоток АД: 1 – измерительная карта, 2 – усилитель, 3 – щиток асинхронного электродвигателя, 4 – обмотка статора АД, 4.1 – изоляция провода, 4.2 – воздушный зазор, 4.3 – сталь, 5 – акустический преобразователь, 6 – усилитель, 7 – усиленный синусоидальный сигнал, 8 – усиленный принимаемый сигнал, 9 – шина PCI, 10 – материнская плата, 11 – программный пакет, 12 – блок задания значений  $\lambda, \rho, c, E_{\text{ном}}$  и режимов эксплуатации

Нами получены экспериментальные данные по модулю упругости  $E$  различных типов изоляции в функции времени при тепловом

старении асинхронных двигателей серии 4А мощностью 1,5 кВт, (рисунок 2). Испытания проводились до отказа АД (пробой изоляции).

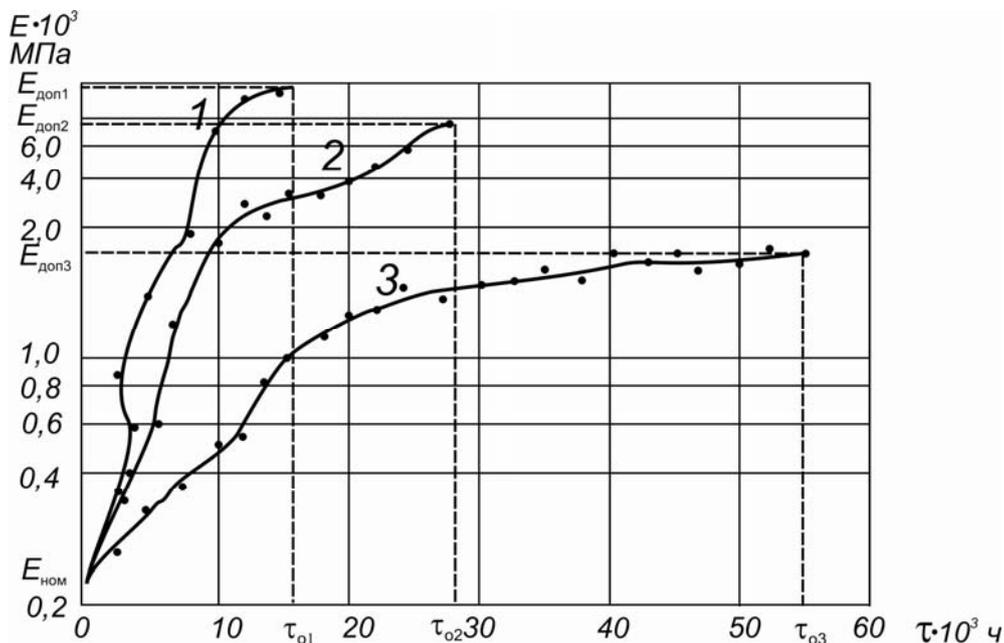


Рисунок 2 – Зависимость модуля упругости  $E$  от времени теплового старения  $\tau$  изоляции системы ПЭТВ (провод)+КП-34 (компаунд)

$E_{\text{доп1}}$ ,  $E_{\text{доп2}}$ ,  $E_{\text{доп3}}$  – предельно допустимые значения модуля упругости изоляции (после которых происходит ее пробой), полученные для соответствующих времен отказа  $\tau_{01}$ ,  $\tau_{02}$ ,  $\tau_{03}$ , АД,  $E_{\text{ном}}$  – номинальные значения модуля упругости изоляции 1, 2, 3, полученные для  $\tau = 0$ ; кривая 1 получена при температуре 90°C, 2 – при температуре 75°C, 3 – при температуре 50°C

Определение остаточного ресурса АД в процессе теплового старения изоляции приведено на рисунке 3, который получен из рисунка 2 с учетом замены величины  $E$  на  $E_{\text{норм}}$

. Режимы эксплуатации: кривая 1 получена при температуре 90°C, 2 – при температуре 75°C, 3 – при температуре 50°C;  $E_{\text{норм}}$  – текущее нормированное значение модуля упругости изоляционного материала в обмотке статора АД. Таким образом,  $\tau_{x1}$ ,  $\tau_{x2}$ ,  $\tau_{x3}$  можно рассматривать как прогнозные оценки времени работы АД по состоянию изоляции при различных режимах эксплуатации, а  $\tau_{01}$ ,  $\tau_{02}$ ,  $\tau_{03}$  – как прогнозные оценки времени эксплуатации АД в режимах 1, 2, 3 на этом рисунке.

Таким образом, пооперационное выполнение способа сводится к следующему. Генерируют синусоидальные электрические колебания, частоту синусоидальных электрических колебаний выбирают равной 5-10 кГц, усиливают электрические колебания, прикладывают их к обмотке статора АД так, чтобы в обмотке статора АД протекал ток величиной 1 ампер, принимают акустические колебания с поверхности корпуса статора АД, преобразуют их в электрические колебания, усиливают, сравнивают их со сгенерированными электрическими колебаниями, определяют коэффициент затухания  $\alpha$  акустических колебаний в изоляции АД, по значению  $\alpha$  вычисляют по формуле (1) модуль упругости  $E$ , определяют по графику (рисунок 2) номинальное значение модуля упругости  $E_{\text{ном}}$  для конкретного режима, определяют по формуле (4) нормированное значение модуля упругости  $E_{\text{норм}}$  для конкретного режима, определяют условия эксплуатации АД и по графику (рисунок 3) по кривой 1, 2 или 3 определяют прогнозные оценки времени работы АД по состоянию изоляции при различных режимах эксплуатации  $\tau_{x1}$ ,  $\tau_{x2}$ ,  $\tau_{x3}$ , находят остаточный ресурс  $\tau_{\text{ост1}}$ ,  $\tau_{\text{ост2}}$ ,  $\tau_{\text{ост3}}$  работы АД в конкретных условиях эксплуатации по соотношениям (5-7).

рируют синусоидальные электрические колебания, частоту синусоидальных электрических колебаний выбирают равной 5-10 кГц, усиливают электрические колебания, прикладывают их к обмотке статора АД так, чтобы в обмотке статора АД протекал ток величиной 1 ампер, принимают акустические колебания с поверхности корпуса статора АД, преобразуют их в электрические колебания, усиливают, сравнивают их со сгенерированными электрическими колебаниями, определяют коэффициент затухания  $\alpha$  акустических колебаний в изоляции АД, по значению  $\alpha$  вычисляют по формуле (1) модуль упругости  $E$ , определяют по графику (рисунок 2) номинальное значение модуля упругости  $E_{\text{ном}}$  для конкретного режима, определяют по формуле (4) нормированное значение модуля упругости  $E_{\text{норм}}$  для конкретного режима, определяют условия эксплуатации АД и по графику (рисунок 3) по кривой 1, 2 или 3 определяют прогнозные оценки времени работы АД по состоянию изоляции при различных режимах эксплуатации  $\tau_{x1}$ ,  $\tau_{x2}$ ,  $\tau_{x3}$ , находят остаточный ресурс  $\tau_{\text{ост1}}$ ,  $\tau_{\text{ост2}}$ ,  $\tau_{\text{ост3}}$  работы АД в конкретных условиях эксплуатации по соотношениям (5-7).

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

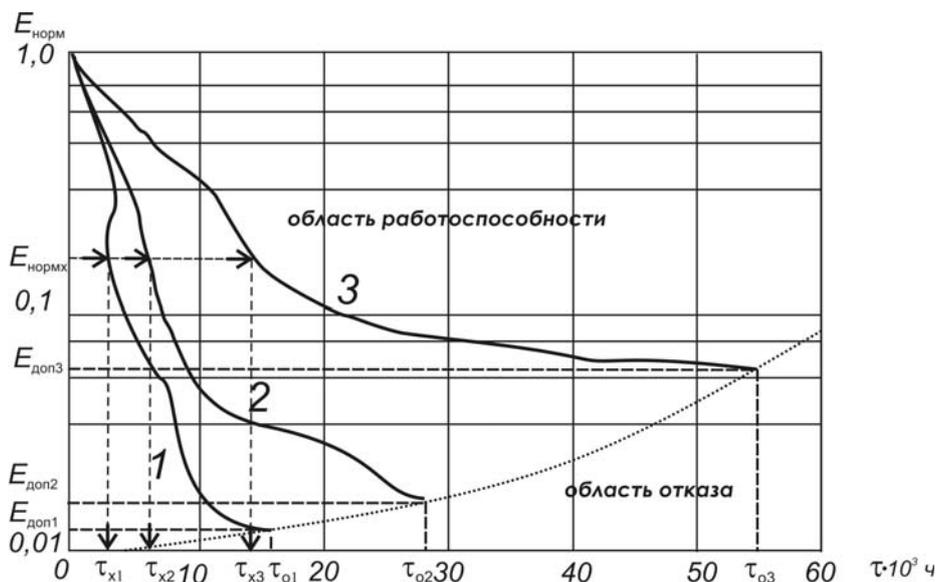


Рисунок 3 – Определение остаточного ресурса АД через изменение нормированного модуля упругости  $E_{норм}$  изоляции в обмотке статора асинхронного двигателя в процессе ее старения

Для других типов изоляции и АД расчет остаточного ресурса проводится аналогично.

Предлагаемый способ реализуется в устройстве, изображенном на рисунке 4.

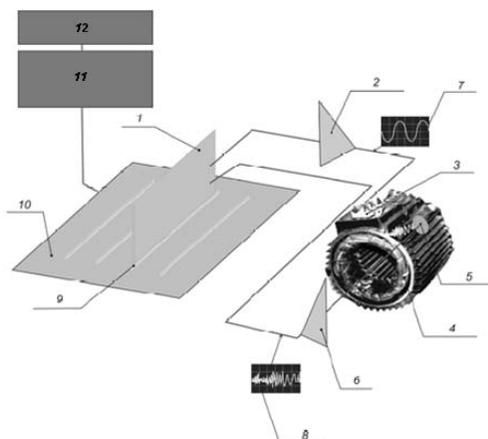


Рисунок 4 – Устройство для акустической диагностики изоляции обмоток АД: 1 – измерительная карта, 2 – усилитель, 3 – щиток асинхронного электродвигателя, 4 – обмотка статора АД, 5 – акустический преобразователь, 6 – усилитель, 7 – усиленный синусоидальный сигнал, 8 – усиленный принимаемый сигнал, 9 – шина PCI, 10 – материнская плата, 11 – программный пакет, 12 – блок задания значений  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $E_{норм}$  и режимов эксплуатации

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перепечко, И.И. Акустические методы исследования полимеров/ И.И. Перепечко. - М.: Химия, 1973, –289 с.
2. Крауткремер, Й. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Пер. с нем./ Г. Крауткремер, Й. Крауткремер; – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.

3. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля/ И.Н. Ермолов; М.: Машиностроение 1981. – 240 с.

4. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике/ Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич; – М.: Наука, 1975. – С 156.

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