

УДК 621.3.01

С. Н. Лутай, В. В. Коломиец, Б. Б. Кобылянский, кандидаты техн. наук
**ТОЧНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Аннотация. Исследуется возможность повышения точности прогнозирования остаточного ресурса асинхронного двигателя на различных этапах эксплуатации, работающего в различных температурных условиях, а также в разнообразных условиях влажности и вибрации.

Ключевые слова: остаточный ресурс, изоляция, упругость, плотность изоляции, диагностика, электрические колебания, старение изоляции, ресурс двигателя

S. N. Lutay PhD., V. V. Kolomiyets PhD., B. B. Kobylansky PhD.
**EXACTNESS OF PROGNOSTICATION OF REMAINING RESOURCE
OF ASYNCHRONOUS ENGINE**

Abstract. In the real article possibility of increase of exactness of prognostication of remaining resource of asynchronous engine (AE) is investigated on the different stages of exploitation under various conditions of temperature, humidity and vibration.

Keywords: remaining resource, isolation, resiliency, closeness of isolation of diagnostician, electric, senescence of isolation, resource of engine

С. М. Лутай, В. В. Коломієць, Б. Б. Кобилянський, кандидати техн. наук
**ТОЧНІСТЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

Анотація. Досліджується можливість підвищення точності прогнозування залишкового ресурсу асинхронного двигуна на різних етапах експлуатації, який працює в різних температурних умовах, а також в різноманітних умовах вологості і вібрації.

Ключові слова: залишковий ресурс, ізоляція, пружність, щільність ізоляції, діагностика, електричні коливання, старіння ізоляції, ресурс двигуна

Постановка задачи исследования.

В процессе эксплуатации асинхронного двигателя (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% поврежденных 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.

Методы решения. Существует несколько методов диагностики изоляции с соответствующими диагностическими параметрами: повышенным напряжением;

- по частичным разрядам;
- добротнo-емкостный;
- по сопротивлению изоляции;
- коэффициенту абсорбции;
- тангенсу угла диэлектрических потерь.

© Лутай С.Н., Коломиец В.В., Кобылянский Б.Б., 2014

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 лишь 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 следующим образом [1; 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 ρ – плотность изоляции статора АД, c – скорость распространения волны в изоляции статора АД, α – коэффициент поглощения в изоляции статора АД, λ – длина волны акустических колебаний.

Эти величины связаны между собой соотношением

$$F=C/\lambda. \quad (2)$$

Плотность изоляции рассчитывается по отношению ее массы к объему, а скорость – из соотношения [2] $PC=Z$, где Z – импеданс (акустическое сопротивление) изоляции. В свою очередь, импеданс можно рассчитать по формуле [3] $Z=P/V$, где P – акустическое давление, создаваемое звуком, V – скорость колебаний.

Определение величины диагностического тока осуществим таким образом.

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

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

где H – напряженность магнитного поля, А/м, I – ток, А, a – расстояние между проводниками паза обмотки статора, м. При синусоидальном диагностическом токе амплитудой порядка 1 А и усредненном расстоянии между проводниками паза обмотки статора $a=10^{-3}$ м величина $H \ll 1,6 \cdot 10^2$ 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 обмотку статора, должна устанавливаться на уровне 1 А. Экспериментально установлено, что оптимальная частота синусоидального диагностического тока составляет 5 – 10 кГц. Отклонение от нее приводит к большому затуханию звука.

Блок-схема предлагаемого устройства изображена на рис. 1.

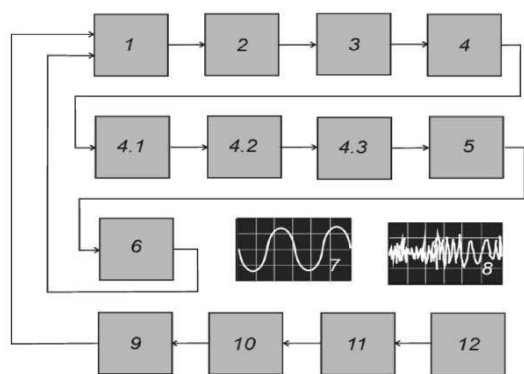


Рис. 1. Блок-схема устройства для акустической диагностики изоляции обмоток АД:

- 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 $\lambda, \rho, c, E_{ном}$ и режимов эксплуатации

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 a , модуль упругости E , номинальное значение модуля упругости $E_{ном}$ и нормированное значение модуля упругости $E_{ном}$ для конкретного типа изоляции:

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

Программным пакетом 11 (рис. 4) с учетом условий эксплуатации АД по экспериментальным кривым вычисляется остаточный ресурс работы АД $\tau_{ост1}, \tau_{ост2}, \dots, \tau_{остn}$ по формулам:

$$\begin{aligned} \tau_{ост1} &= \tau_{01} - \tau_{x1}, \\ \tau_{ост2} &= \tau_{02} - \tau_{x2}, \\ &\dots \\ \tau_{остn} &= \tau_{0n} - \tau_{xn}, \end{aligned} \quad (5-7)$$

где $\tau_{01}, \tau_{02}, \dots, \tau_{0n}$ – соответствующие времена отказа АД, $\tau_{x1}, \tau_{x2}, \dots, \tau_{xn}$ – текущие времена работы АД при различных режимах эксплуатации, n – номер режима эксплуатации.

Результаты моделирования. Нами получены экспериментальные данные по модулю упругости E различных типов изоляции в функции времени при тепловом старении АД серии 4А мощностью 1,5 кВт, рис. 2. Испытания проводились до отказа АД (пробой изоляции).

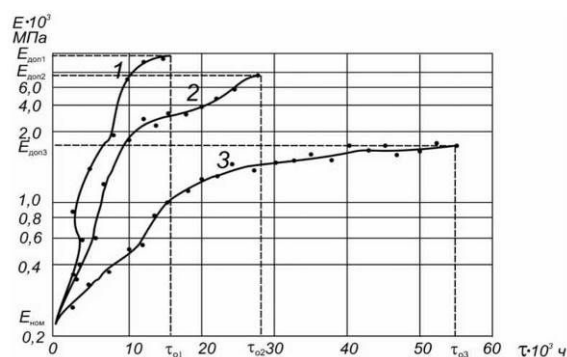


Рис. 2. Зависимость модуля упругости E от времени теплового старения τ изоляции системы ПЭТВ (провод)+КП-34 (компаунд)

Едон 1, Едон 2, Едон 3 – предельно допустимые значения модуля упругости изоляции (после которых происходит ее пробой), полученные для соответствующих времен отказа τ_{o1} , τ_{o2} , τ_{o3} АД,

Еном – 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 рис. 3, который получен из рис. 2 с учетом замены величины E на $E_{норм}$.

Режимы эксплуатации: кривая 1 получена при температуре 90°C; 2 – при 75°C; 3 – при 50°C; $E_{норм}$ – текущее нормированное значение модуля упругости изоляционного материала в обмотке статора АД. Таким образом, τ_{x1} , τ_{x2} , τ_{x3} можно рассматривать как прогнозные оценки времени работы АД по состоянию изоляции при различных режимах эксплуатации, а τ_{o1} , τ_{o2} , τ_{o3} – как прогнозные оценки времени эксплуатации АД в режимах 1, 2, 3 на рис. 3.

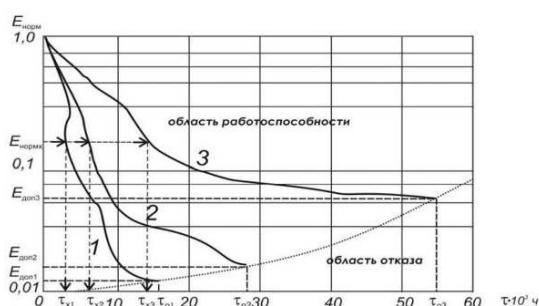


Рис. 3. Определение остаточного ресурса АД через изменение нормированного модуля упругости $E_{норм}$ изоляции в обмотке статора асинхронного двигателя в процессе ее старения

Для других типов изоляции АД расчет остаточного ресурса проводится аналогично.

Предлагаемый способ реализуется в устройстве, изображенном на рис. 4.

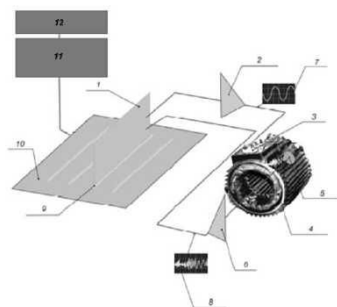


Рис. 4. Устройство для акустической диагностики изоляции обмоток АД:

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 A , p , c , $E_{ном}$ и режимов эксплуатации

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

Список использованной литературы

1. Сафарбаков А. М. Основы технической диагностики : учеб. пособие для студентов / А. М. Сафарбаков, Иркутск : Изд-во ИрГУПС. – 2006. – С. 10 – 25.
2. Бронев С. А. Регулируемые электроприводы переменного тока / С. А. Бронев, В. И., Овсянников, Б. П. Соустин. – Красноярск : КГТУ. – 1998. – С. 34 – 40.
3. Дубов А. А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А. А. Дубов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 54 – 57.
4. Смирнов В. И. Автоматизированный вибро-диагностический комплекс / В. И. Смирнов и др. // Автоматизация и современные технологии, 1999. – 156 с.
5. Левачев А. В. Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток / А. В. Левачев. – Барнаул. – 1998. – С. 45 – 51.
6. Гашимов М. А. Диагностические исследования неисправностей электроэнергетических машин при межфазных замыканиях в обмотке статора / М. А. Гашимов // Электричество. – М. : – 1987. – № 4. – С. 27 – 30.
7. Гашимов М. А. Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин / М. А. Гашимов // Электрические станции. – 1998. – № 11. – С. 30 – 35.
8. Гашимов М. А. Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин / С. М. Мирзоева // Электрические станции. – 1998. – № 10. – С. 8 – 12.
9. Бродовский В. Н. Исполнительные устройства с многофазными электродвигателями переменного

тока / В. Н. Бродовский // Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. Книга 3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы. – М. : Машиностроение. – 1976. – С. 67 – 72.

10. Андриященко В. А. Следящие системы автоматизированного сборочного оборудования / В. А. Андриященко. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отделение. – 1979. – С. 123 – 156.

Получено 18.07.2014

References

1. Sabracov A.M. *Osnovy tehnichej diagnostiki : ucheb. posobie dlja studentov* [Bases of Technical Diagnostics: Studies. Manual for the Students], (2006), *Izdatel'stvo IrGUPS*, pp. 10 – 25 (In Russian)

2. Bronov S.A., Ovsjannikov B. P., and Soustin B.P. *Reguliruemye jelektroprivody peremennogo toka* [The Managed Electromechanics of Alternating Current], (1998), *Crasnoarsc, Russian Federation, Publishing CGTY*, pp. 34 – 40 (In Russian).

3. Dubov A.A. *Problemy ocenki ostatochnogo resursa starejushhego oborudovanija* [Problems of Estimation of Remaining Resource of Senescent Equipment] (2003), *Teplojenergetika*, No. 11, pp. 54 – 57 (In Russian).

4. Smirnov V.I. i dr. *Avtomatizirovannyj vibro-diagnosticheskiy kompleks* [Automated Vibrodiagnostic automated Complex], (1999), *Avtomatizacija i Sovremennye Tehnologii*, 156 p. (In Russian).

5. Levahev V.I. *Diagnostika izoljicii asinxronnyh jelektrovdigatelej na osnove ispol'zovanija parametrov shemy zameshenija obmotok* [Diagnostics of Isolation of Asinxron Electric Motors on the Basis of Ispolzovan Parameters of Chart of Substituting for Obmot. Sciences], (1998), *Barnaul, Russian Federation*, pp. 45 – 51 (In Russian)

6. Gashimov M. A. *Diagnosticheskie issledovanija neispravnostej jelektroenergeticeskich mashin pri mezhfaznyh замыканиjah v obmotke statora* [Diagnostic Isledvan Disrepairs of Electroenergy Mahin at the Shorting in the Puttee of Stator], (1987), *Electricity*, Moscow, Russian Federation, No. 4, pp. 27 – 30 (In Russian).

7. Gashimov M.A. *Diagnostirovanie neispravnostej obmotki statora jelektriceskich mashin* [Diagnosticating of Puttee of Stator of Electric Machines], (1998), *Electric Stations*, No. 11, pp. 30 – 35 (In Russian).

8. Gahimov M.A., and Mirzoiva C. M. *Diagnostirovanie neispravnostej obmotki statora jelektriceskich mashin* [Diagnosticating of Puttee of Stator of Machines], (1998), *The Electric Stations*, No. 10, pp. 8 – 12 (In Russian).

9. Brodovsci V.N. *Ispolnitel'nye ustrojstva s mnogofaznymi jelektrovdigateljami peremennogo toka* [The Executive Devices with the Multiphase Electric Motors of Alternating Current], (1976), *Device and Elements of the Systems of Automatic Control and Management. Technical Cybernetics. Book 3. Executive Devices and Servo-*

mechanism, Moscow, Russian Federation, *Mashinostroenie Engineer*, pp. 67 – 72 (In Russian).

10. Andryushchenko V.A. *Century A. the Witness of the automated Assembly equipment* [The Tracker Systems of Automated Frame-Clamping Equipment], (1979), *Leningrad, Russian Federation, Machinebuilding, Leningrad. Separation*, pp. 123 – 156 (In Russian).



Лутай
Сергей Николаевич,
канд. техн. наук, доц. каф.
электроники и компьютерных
технологий систем управления
(ЭКТСУ. Учебно научного
профессионально-
педагогического ин-та Украин-
ской инженерно педагогиче-
ской академии (УИПА).
84500,г. Артемовск. Донецкая
обл. ул. Носакова 9а, Украина,
тел. 0502413255.
E-mail: Dep09@ya.ru



Коломиец
Валерий Витальевич,
канд. техн. наук, доц., дирек-
тор Учебно научного профес-
сионально педагогического
института УИПА.
Тел. 0990310429.
E-mail: Dep09@ya.ru



Кобылянский
Борис Борисович,
канд. техн. наук, каф. ЭКТСУ.
Учебно научного профессио-
нально педагогического инсти-
тута УИПА.
Тел. 0500252906.
E-mail:
b.kobiliansky@yandex.ua