

УДК 629.7

ББК 39.56

Ш397

А. А. Шейников

Минск, Республики Беларусь

А. Н. Белегов

Минск, Республики Беларусь

А. В. Рожок

Минск, Республики Беларусь

**ТЕСТОВАЯ ДИАГНОСТИКА ОБМОТОК АВИАЦИОННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА
БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

Разработана диагностическая зависимость, применение которой в алгоритмах обработки измерительной информации систем тестовой диагностики обмоток авиационных электрических машин исключает необходимость накапливать статистическую информацию о технологических параметрах исправных и дефектных обмоток, что способствует повышению достоверности и упрощению методики диагностирования.

Ключевые слова: обмотки авиационных электрических машин, тестовая диагностика, метод бегущей волны.

A. A. Shejnikov

Minsk, the Republic of Belarus

A. N. Belegov

Minsk, the Republic of Belarus

A. V. Rozhok

Minsk, the Republic of Belarus

TEST DIAGNOSTICS OF THE WINDINGS OF ELECTRICAL MACHINES USING THE TRAVELLING-WAVE METHOD

The authors developed a diagnostic relation which, when applied in measurement data processing algorithms of test diagnostic systems of the windings of aeronautic electrical machines, avoids the need to store statistic information about the operational parameters of fault-free and faulty windings thus promoting validity and simplification of the diagnostics technique.

Key words: windings of aeronautic electrical machines, test diagnostics, travelling-wave method.

Для авиационных электрических машин (АЭМ) является характерной высокая удельная мощность. Она достигается в результате применения достаточно большой частоты вращения, высококачественных электромагнитных материалов и эффективных способов охлаждения. Повышенная температура обмотки (до 185°C) и высокие плотности тока, несмотря на применение специальных электротехнических материалов, сокращают срок службы АЭМ до 3000 ч, в то время как срок службы электрических машин общего назначения составляет несколько десятков лет. Известно, что до 15 % преждевременных отказов АЭМ происходит из-за пробоя межвитковой изоляции [Зонтов, 1986]. Ее уязвимость обусловлена вхождением в механическую систему, состоящую из разнородных элементов: медь проводников – полимерные изоляционные материалы. Деформации в подобной системе при изменении температуры, электродинамических усилиях, вибрациях обмотки приводят к развитию внутренних напряжений в изоляции и, как следствие, образованию дефектов. Особенности дефектообразования влияют на выбор метода диагностики изоляционного слоя (*рис. 1*).

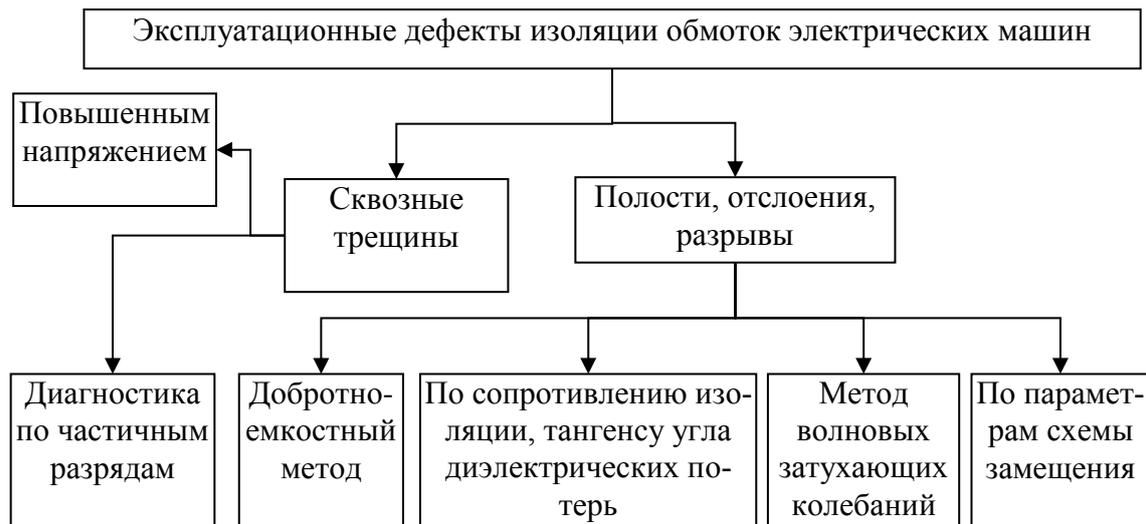


Рис. 1. Эксплуатационные дефекты изоляции и методы диагностики обмоток электрических машин

Для АЭМ с повышенным отработанным ресурсом основное значение имеет диагностика усталостных повреждений межвитковой изоляции [Белегов, 2012]. Структурным признаком наступления фазы критического износа и перехода АЭМ в состояние скрытого отказа служит образование сквозных трещин в межвитковой изоляционной композиции. При этом диагностика способами, чувствительными к любым неоднородностям изоляции (полости, отслоения, разрывы), заблаговременно покажет отрицательное состояние обмотки и необходимость проведения ремонта. Таким образом, их применение является необходимым и достаточным условием раннего обнаружения усталостных повреждений межвитковой изоляции.

Анализ существующих способов, чувствительных к неоднородностям изоляции, показал, что для оценки технического состояния требуется статистическая информация о технологических параметрах исправных и дефектных обмоток. Другими словами, эти способы не учитывают индивидуальных особенностей электрических машин [Суходолов, 2010].

Дополнительные исследования показали возможность решения этой проблемы при диагностике электрических машин с помощью волновых затухающих колебаний [Геллер, 1960]. В этом случае обмотка электрической машины представляет собой цепь переменного тока, образованную двумя параллельными-

ми проводами большой протяженности с известным сопротивлением нагрузки на конце – так называемую длинную линию. Любой малый элемент такой линии, окруженный электрическим и магнитным полями (рис. 2), будет обладать какими-то малыми: емкостью C , индуктивностью L и активным сопротивлением r одновременно. А это означает, что электрические параметры цепи оказываются непрерывно распределенными по ее длине.

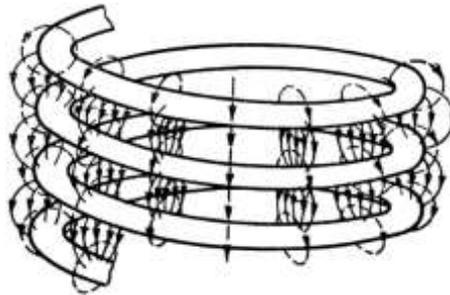


Рис. 2. Обмотка электрической машины и ее электромагнитное поле

Любой участок такой линии длиной dx можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из сосредоточенных бесконечно малых элементов dL , dC , dr , dg (рис. 3), к которым полностью применимы законы цепей.

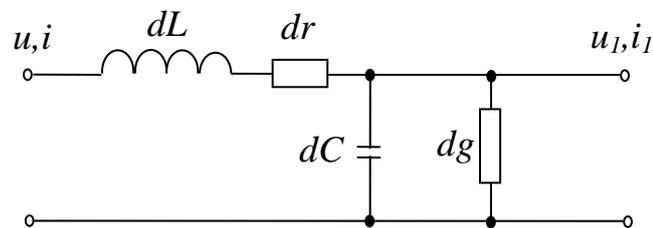


Рис. 3. Эквивалентная схема бесконечно малого элемента линии

Величина dL характеризует результирующую индуктивность верхнего и нижнего проводов бесконечно малого участка линии, dC величину емкости между проводами на интервале dx , а dr – активное сопротивление потерь в проводах. Проводимость dg обусловлена несовершенством изоляции между проводами и, следовательно, является проводимостью утечки на участке dx . Эквивалентная схема линии конечной длины содержит бесчисленное множество аналогичных звеньев, соединённых последовательно.

Вместо бесконечно малых величин dL , dC , dr , dg используют распределенные параметры линии, рассчитываемые на единицу длины: $L_1 = \frac{dL}{dx}$ – распреде-

ленная индуктивность; $C_1 = \frac{dC}{dx}$ – распределенная емкость; $r_1 = \frac{dr}{dx}$ – распреде-

ленное сопротивление потерь; $g_1 = \frac{dg}{dx}$ – распределенная проводимость утечки.

Чтобы найти напряжение и ток в любой точке линии, рассматривается бесконечно малый элемент dx , удаленный от ее начала на расстояние x . Искомые величины напряжения и тока на входе элемента, т. е. в точке с координатами x , обозначаются через u и i соответственно. Тогда значения u_1 и i_1 , на выходе элемента (в точке $x + dx$), будут:

$$\begin{aligned} u_1 &= f(x + dx, t), \\ i_1 &= \varphi(x + dx, t). \end{aligned}$$

(1)

Из приведенных в литературе результатов анализа импульсных характеристик обмоток электрических машин можно сделать вывод, что при испытаниях изоляции по методу «бегущей волны» обмотку следует рассматривать как колебательный контур, на вход которого действует ударное импульсное напряжение. Характерные осциллограммы импульсных напряжений при подаче на вход обмотки испытательного сигнала приведены на *рис. 4*.

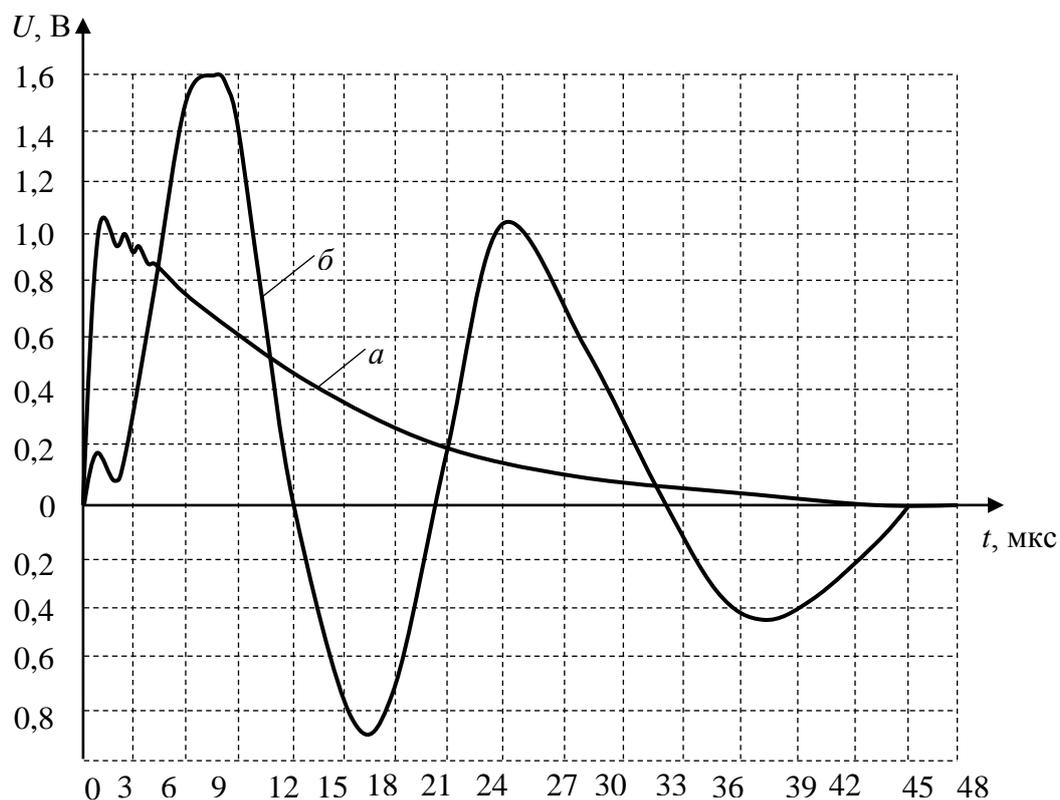


Рис. 4. Осциллограммы напряжений в начале и в конце обмоток якорей электрических машин постоянного тока:

a – осциллограмма напряжения в начале; *б* – осциллограмма напряжения в конце участка обмотки электрической машины

Как видно из *рис. 4*, на конце участка обмотки имеют место колебания напряжения относительно воздействующего на вход обмотки апериодического импульса.

В ряде случаев к линии предъявляется требование, чтобы передаваемые по ней сигналы не искажались. Для того, чтобы передаваемые сигналы не искажались, необходимо выполнить два условия: а) все частоты ω , образующие сигнал, должны затухать в одинаковой степени, т. е. коэффициент затухания не должен зависеть от частоты; б) все частоты, образующие сигнал, должны распространяться с одинаковой скоростью, т. е. фазовая скорость не должна зависеть от частоты. Если не будет выполняться первое условие, то в линии имеют место амплитудные искажения, при невыполнении второго условия – фазовые искажения.

В работе Хевисайда показано: чтобы линия не искажала передаваемые сигналы, её первичные параметры должны находиться в определенном соотношении:

$$\frac{r_0}{L_0} = \frac{g_0}{C_0} = k.$$

(2)

У реальных линий без специальных приспособлений $\frac{r_0}{L_0} > \frac{g_0}{C_0}$, т. е. условие не выполняется, и они искажают передаваемые сигналы. Следует заметить, что при увеличении L_0 автоматически падает фазовая скорость и она оказывается существенно ниже скорости света.

Часто при высоких частотах имеет место соотношение $r_0 \ll \omega L_0$ и $g_0 \ll \omega C_0$. В этих случаях допустимо считать, что $r_0 = 0$ и $g_0 = 0$. Это и будет линия без потерь.

Волновое сопротивление линии с потерями ($r_1 \neq 0$; $g_1 \neq 0$) записывается следующим образом:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r_1 + j\omega L_1}{g_1 + j\omega C_1}}.$$

(3)

Другими словами, волновое сопротивление является комплексной величиной.

Переходя к мгновенным значениям получим:

$$\begin{aligned} u &= u_1 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x) \\ i &= \frac{u_1}{Z_0} e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x - \varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

Угол φ характеризует величину фазового сдвига между колебаниями напряжения и тока прямой волны в каждой точке оси x . Значение βx характеризует количественное изменение фазы на интервале длиной X при $t = const$. Расстояние, на котором фаза напряжения меняется на 2π , соответствует длине

волны λ . Из уравнений видно, что распространение волны вдоль линии с потерями сопровождается непрерывным убыванием амплитуд напряжения и тока по экспоненциальному закону с коэффициентом затухания α , характеризующим скорость затухания. Физически уменьшение амплитуд колебаний можно объяснить тем, что по мере распространения волны, энергия ее частично расходуется на элементах линии в виде потерь на нагревание проводников, потерь в диэлектрике и т. д.

Коэффициент затухания приближенно можно рассчитать, используя следующее выражение:

$$\alpha \approx \frac{r_1}{2Z_0} + \frac{g_1}{2} Z_0.$$

(5)

Таким образом, по мере увеличения проводимости утечки g_1 , коэффициент α возрастает.

В литературе приведена приближенная формула для расчета Z_0 через поперечное сечение проводников a и расстояние между ними d :

$$Z_0 \approx 276 \lg \frac{d}{a}.$$

(6)

Для расчета активного сопротивления проводов в литературе приводится следующее выражение:

$$r_1 = \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{\omega \mu_1}{\sigma}}. \quad (7)$$

Здесь: $\mu_1 = \mu_0$ – магнитная проницаемость;

σ – удельная проводимость проводов.

Если проводимость утечки $g_1 = 0$, то:

$$\alpha = \frac{1}{240} \frac{\sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\pi \sigma}}}{a \ln \frac{d}{a}} = \frac{1}{240} \frac{\sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2 \sigma \pi^2}}}{a \ln \frac{d}{a}}. \quad (8)$$

При образовании витковых замыканий обмотки АЭМ появляется некоторое изменение коэффициента затухания:

$$\Delta\alpha = 138lg \frac{d}{a} g_1. \quad (9)$$

Таким образом, в общем случае коэффициент затухания описывается выражением:

$$\alpha = \frac{1}{240} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma\pi^2}} \frac{d}{a \ln \frac{d}{a}} + 138lg \frac{d}{a} g_1,$$

(10)

где ω – частота импульсного испытательного сигнала.

По изменению значения этого коэффициента ($\Delta\alpha$) можно судить о степени развитии дефектов изоляции обмоток АЭМ.

Таким образом, при использовании полученной диагностической зависимости в алгоритмах обработки измерительной информации систем тестовой диагностики обмоток АЭМ нет необходимости накапливать статистическую информацию о технологических параметрах исправных и дефектных обмоток, что способствует повышению достоверности и упрощению методики диагностирования.

Библиографический список

1. *Белегов А. Н.* Электрооборудование летательных аппаратов. Ч. 1. Системы электропитания летательных аппаратов / А. Н. Белегов, А. А. Шейников. Мн.: ВАРБ, 2012. 260 с.
2. *Геллер Б.* Волновые процессы в электрических машинах: пер. с нем. / Б. Геллер, А. Веверка. М.: Госэнергоиздат, 1960. 632 с.
3. *Зонтов А. В.* Системы электропитания летательных аппаратов / А. В. Зонтов. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986. 420 с.
4. *Суходолов Ю. В.* Повышение помехоустойчивости контроля межвитковой изоляции коллекторных электрических машин постоянного тока с помощью волновых затухающих колебаний / Ю. В. Суходолов, А. А. Шейников, А. Н. Малашин // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2010. № 19. С. 67–72.

References

1. *Belegov A. N.* (2012). Aircraft electrical equipment. V. 1. Aircraft electrical power supply systems / A. N. Belegov, A. A. Shejnikov. Minsk.: MARB, 2012. 260 p. (In Russian).
2. *Geller B.* (1960). Wave processes in electrical machines: transl. from Germ. / B. Geller, A. Veverka. M.: Gosjenergoizdat, 1960. 632 p. (In Russian).
3. *Zontov A. V.* (1986). Aircraft electrical power supply systems / A. V Zontov. M.: Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 1986. 420 p. (In Russian).
4. *Suhodolov Ju. V.* (2010). Increase of test immunity of turn insulation of d.c. commutator machines using wave damped oscillations / Ju. V. Suhodolov, A. A. Shejnikov, A. N. Malashin // Collected works, Military academy, the Rep. of Belarus. 2010. № 19. P. 67–72. (In Russian).