

УДК 621.313.333

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ОБМОТОК СТАТОРОВ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
FREQUENCY METHOD FOR DIAGNOSTICS OF STATOR WINDINGS
OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

Зеленко В.В., ст. преподаватель, Суходолов Ю.В., к-т. техн. наук, доцент,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
V. Zelenko, Senior Lecturer, Yu. Suchodolov, Candidate of Technical Sciences,
S. Sizikov, Candidate of Technical Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация. Рассматривается частотный метод диагностики, позволяющий
увеличить чувствительность при контроле обмоток асинхронных
электродвигателей на витковые замыкания.*

*Abstract. A frequency diagnostic method is considered that allows
increasing the sensitivity when monitoring the windings of asynchronous
electric motors for turn-based short circuits.*

*Ключевые слова: асинхронные электродвигатели, частотная диагностика,
гармонические составляющие спектра, чувствительность контроля.*

*Keywords: asynchronous electric motors, frequency diagnostics, harmonic components
of spectrum, control sensitivity.*

ВВЕДЕНИЕ

Повышение чувствительности при испытании обмоток статоров асинхронных электродвигателей на витковые замыкания можно осуществить путем замены малочувствительной регистрации временных изменений параметров сигналов, снимаемых с поврежденной обмотки, регистрацией изменений амплитуды одной или нескольких гармонических составляющих, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра обмотки.

При контроле обмоток асинхронных электродвигателей применяются радиоимпульсы, высокочастотные импульсы, затухающие импульсы. Эффективность контроля можно повысить путем согласования спектрального состава испытательного сигнала с частотной характеристикой контролируемого объекта. Создание испытательных сигналов с амплитудой и несущей частотой, которые соответствуют резонансной области частот контролируемой обмотки, позволяет создать между витками контролируемой обмотки максимальные испытательные напряжения при равномерном распределении вдоль обмотки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Увеличить чувствительность контроля на витковые замыкания в обмотках электродвигателей возможно путем выбора временных параметров испытательных сигналов и замены регистрации изменения параметров сигнала во

временной области на регистрацию изменения амплитуды одной или нескольких спектральных составляющих выходного сигнала, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра обмотки.

Испытательный сигнал можно представить рядом Фурье [1]:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \underline{A}_n \exp(-j2\pi n f_0 t),$$

где \underline{A}_n – амплитуда гармоники с номером n ;

f_0 – частота следования импульсов испытательного сигнала.

После прохождения через обмотку сигнал можно записать в виде выражения:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \hat{E}(f_n / f_0) \underline{A}_n \exp(-j2\pi n f_0 t),$$

где $\hat{E}(f_n / f_0)$ – коэффициент передачи обмотки на частоте регистрируемой гармоники с номером

n : $n = f_n / f_0$ – номер регистрируемой гармоники.

Чувствительность метода контроля можно определить как отношение относительного увеличения регистрируемого параметра при замыкании к относительному изменению этого же параметра при максимально допустимых отклонениях параметров обмотки:

$$C = \frac{\Delta \underline{A}_{\hat{a}} / \underline{A}_{\hat{e}}}{\Delta \underline{A}_{\hat{e}} / \underline{A}_{\hat{e}}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} [\hat{E}_{\hat{a}}(f_n / f_0) - \hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0)] \cdot \underline{U}_n \exp(-j2\pi n f_0 t)}{\sum_{n=1}^{\infty} \Delta \hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0) \cdot \underline{U}_n \exp(-j2\pi n f_0 t)}, \quad (1)$$

где $\hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0)$, $\hat{E}'_{\hat{e}}(f_n / f_0)$ – коэффициенты передачи исправной обмотки с номером n , который соответствует частоте $f_n = n f_0$ при максимальном и минимальном отклонениях параметров обмотки от образцовой;

$$\Delta \hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0) = \hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0) - \hat{E}'_{\hat{e}}(f_n / f_0),$$

где $\hat{E}_{\hat{a}}(f_n / f_0)$ – коэффициент передачи обмотки с витковым замыканием для гармоники с номером n ;

\underline{U}_n – амплитуда гармоники входного сигнала с номером n ;

$\underline{A}_{\hat{e}}$ – комплексная величина выходного сигнала для исправной обмотки при максимальном отклонении параметров обмотки;

$\Delta \underline{A}_{\hat{a}}$ – абсолютное увеличение контролируемого параметра выходного сигнала при замыкании одного витка;

$A_{\dot{\epsilon}}'$ – комплексная величина выходного сигнала при минимальном отклонении обмотки, $\Delta A_{\dot{\epsilon}} = \underline{A}_{\dot{\epsilon}} - \underline{A}_{\dot{\epsilon}}'$.

Выражение (1) показывает, что максимальную чувствительность можно получить, если о состоянии обмотки судить по одной, или нескольким составляющим сигнала, подвергаемым наибольшему изменению при возникновении дефекта. Наибольшим изменениям подвергаются составляющие выходного сигнала, частота которых соответствует резонансной области контролируемой обмотки.

В общем случае условие превышения относительного увеличения параметра регистрируемого сигнала при замыкании одного витка обмотки над относительным увеличением этого же параметра для исправной обмотки и при одновременном воздействии дестабилизирующих факторов будет иметь вид:

$$C_{\dot{\epsilon}} = \frac{(\Delta A_n - \Delta A_{\ddot{a}\ddot{a}}) / \underline{A}_{\dot{\epsilon}}}{(\Delta \underline{A}_{\dot{\epsilon}} + \Delta A_{\dot{\epsilon}\ddot{a}}) / \underline{A}_{\dot{\epsilon}}} > 1. \quad (2)$$

где $\Delta \underline{A}_{\dot{\epsilon}\ddot{a}}$, $\Delta A_{\ddot{a}\ddot{a}}$ – комплексные приращения величин $\underline{A}_{\dot{\epsilon}}$ и $\underline{A}_{\ddot{a}}$, являющиеся абсолютной погрешностью и образующиеся за счет воздействия дестабилизирующих факторов;

$\underline{A}_{\ddot{a}}$ – комплексная величина выходного сигнала при наличии виткового замыкания.

С целью создания необходимого уровня и стабильных параметров подаваемого испытательного напряжения целесообразно применять сигналы в виде периодических последовательностей радиоимпульсов. Для определения спектрального состава последовательностей радиоимпульсов, можно представить их в виде суммы из m , задержанных во времени на T_c относительно друг друга, полных периодов синусоиды, которую можно как сумму положительной и отрицательной полуволны. Комплексная амплитуда полуволны n -й гармоники, согласно [2], определяется выражением:

$$U_{n1/2} = \frac{2U_m \dot{O}_{\dot{n}}}{\pi \dot{O}_{\dot{n}} (1 - n^2 T_c^2 / T_o^2)} \left| \cos \frac{\pi n T_c}{2 T_o} \right| \exp[-j \pi n T_c / (2 T_o)],$$

где T_c – период следования импульсов;

T_o – период синусоидального заполнения.

Сложив положительную и задержанную во времени на $t_c = T / 2$ отрицательную полуволны, в соответствии с теоремой о смещении, получим комплексную амплитуду n -й гармоники суммарного сигнала:

$$\underline{U}_{n\Sigma 1/2} = \underline{U}_{n1/2} - \underline{U}_{n1/2} \exp - j \pi n T_c / T_o,$$

Складывая сигналы, представляющие собой последовательность одного периода синусоиды с временной задержкой каждой относительно координат $t_c = (m - 1)T_c$ получим выражение комплексной амплитуды \underline{U}_n .

Определив положение характерных точек (нули) огибающей амплитудного спектра последовательностей радиоимпульсов

$n_0 = lf_c / (f_0 m)$, где $l = 1, 2, \dots$, далее можно получить выражение для нахождения наибольшего максимума огибающей амплитудного спектра сигналов в виде последовательностей радиоимпульсов:

$$U_{nm} = mU_m f_0 / f_c.$$

где $f_0 = 1/T_0$; $f_c = 1/T_c$.

Поэтому для обнаружения дефектов целесообразнее использовать спектральные составляющие с номерами, близкими к f_c / f_0 .

Экспериментальные исследования показывают, что наличие виткового замыкания приводит к изменению угла наклона амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) измерительной системы с дефектом в обмотке.

Это изменение с высокой точностью можно зафиксировать, выделяя из огибающей амплитудного спектра выходного сигнала, сразу две близлежащие гармоники, соответствующие по частоте самому крутому участку АЧХ измерительной системы с дефектом в обмотке. Суммой близлежащих гармоник будут биения, по форме которых можно судить о равенстве амплитуд гармоник и о состоянии обмотки. При наличии дефекта будет наблюдаться неравенство амплитуд выделяемых гармоник. При отсутствии дефекта также будет наблюдаться незначительное неравенство гармоник, но оно может быть скомпенсировано наклоном соответствующего участка огибающей амплитудного спектра подаваемого сигнала. Этот участок следует определять таким образом, чтобы в его пределах касательная к огибающей амплитудного спектра имела нулевой или близкий к нему угол наклона, что соответствует гармонике $n = f_c / f_0$. Тогда частота заполнения радиоимпульса:

$$f_c = (f_1 + f_2) / 2 + \Delta f,$$

где f_1 и f_2 – частоты, соответствующие началу и концу падающего участка АЧХ измерительной системы;

Δf – приращение частоты, необходимое для компенсации неравенства амплитуд выделяемых гармоник.

Увеличение частоты на Δf скомпенсирует наклон частотной характеристики для исправной обмотки, т. е. будет выполняться равенство

$$|U_{mn1}| = |U_{mn2}|$$

где $|U_{mn1}|$, $|U_{mn2}|$ – амплитуды гармоник выходного сигнала для исправной обмотки с номерами n_1 и n_2 , близкими к значению f_c / f_0 .

При выборе частоты следования радиоимпульсов необходимо выполнить условие, чтобы $n_1 f_0 \geq f_1$ и $n_2 f_0 \leq f_2$. Амплитуда радиоимпульсов и количество периодов синусоиды радиоимпульсов выбирается так, чтобы был создан необходимый уровень испытательного межвиткового напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Частотное совмещение выделяемых гармоник с областью АЧХ контролируемой обмотки, подвергающейся наибольшему изменению при возникновении виткового замыкания, позволяет получить превышение относительного увеличения регистрируемого сигнала от замыкания одного витка над относительным изменением этого же параметра для исправной обмотки с учетом разброса ее параметров и одновременном воздействии дестабилизирующих факторов на сигнал.

Увеличить чувствительность контроля можно используя в качестве информативного параметра наклон АЧХ обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. Радиотехнические цепи и сигналы / Под ред. К.А. Самойло. М.: Радио и связь, 1982. – 528 с.