

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **24479**

(13) **С1**

(45) **2024.12.20**

(51) МПК

G 01R 31/06 (2006.01)

(54) **СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ
В ОБМОТКАХ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ**

(21) Номер заявки: а 20230102

(22) 2023.04.21

(43) 2024.12.05

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Исаев Александр Витальевич; Суходолов Юрий Викторович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) RU 2289143 C2, 2006.

BY 20042 C1, 2016.

RU 2339962 C1, 2008.

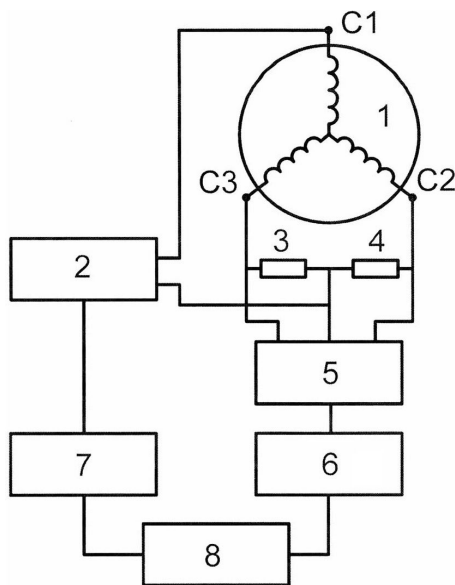
SU 794565, 1981.

WO 2013/026276 A1.

US 5508620 A, 1996.

(57)

Способ обнаружения дефектов витковой изоляции в обмотках трехфазной электрической машины, при котором формируют периодическую импульсную последовательность одной полярности в виде периодической последовательности пачек импульсов с количеством импульсов в пачке 2^{n+1} (где $n = 1, 2, 3 \dots$), с постоянным периодом следования и регулируемой длительностью и временем задержки импульсов, передают сформированную последовательность на вывод одной из фазных обмоток и снимают сигналы с выводов двух других соединенных с резисторами фазных обмоток, суммируя их, после чего выделяют информативную спектральную составляющую из полученной суммы сигналов и информативную спектральную составляющую из упомянутой периодической



Фиг. 1

ВУ 24479 С1 2024.12.20

импульсной последовательности, находят разность фаз между выделенными информативными спектральными составляющими, по которой определяют межвитковое сопротивление обмоток, затем меняют последовательность подключения выводов фазных обмоток, обеспечивая подачу периодической импульсной последовательности на вывод фазной обмотки, отличной от предыдущей, и повторяют упомянутые операции, определяя значение межвиткового сопротивления, и по наличию значительной разницы найденных значений межвиткового сопротивления определяют наличие дефекта витковой изоляции в обмотках трехфазной машины.

Изобретение относится к электроизмерительной и испытательной технике и может быть использовано для контроля качества и обнаружения дефектов витковой изоляции обмоток электрических машин и межвитковых замыканий.

В настоящее время существуют различные способы для контроля состояния обмоток электрических машин и обнаружения в них межвитковых замыканий.

Известен способ определения короткозамкнутых витков в электрических обмотках [1], при котором на обмотки подают напряжение изменяющейся частоты, измеряют параметры резонансного контура обмоток и судят о наличии коротких замыканий по частотному максимуму измеряемого параметра. При этом напряжение изменяющейся частоты подают на одну из обмоток, резонансный контур образуют между двумя обмотками посредством создания магнитной связи между ними и соединения с заземлением двух выводов обмоток, а в качестве измеряемого параметра резонансного контура используют добротность.

Способ обладает следующими недостатками:

ограниченная область применения, так как невозможно провести контроль электрических машин с внутренним соединением фаз обмоток в звезду и без наличия четвертого (нулевого) вывода;

форма высокого напряжения различной частоты, подаваемого на обмотки электрической машины, существенно отличается от синусоидальной, что приводит к большой погрешности результатов диагностики.

Известен способ комплексного контроля фазных обмоток трехфазной электрической машины [2], при котором в качестве параметра снимаемых напряжений измеряют абсолютное значение разности фаз напряжений, дополнительное напряжение подают после основного с частотой, составляющей 90 % от частоты максимума абсолютного значения измеренной разности фаз, величиной выше, чем основное напряжение, и достаточное для достоверного заключения о бездефектности витковой изоляции.

Способ обладает следующими недостатками:

ограниченная область применения, так как невозможно провести контроль электрических машин с внутренним соединением фаз обмоток в звезду и без наличия четвертого (нулевого) вывода;

малая достоверность контроля из-за одновременного использования двух источников напряжения (основного и дополнительного), обладающих различием в частотных характеристиках и внутренних сопротивлениях, вызванные несопадением параметров реализованных блоков.

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является способ комплексного контроля трехфазной обмотки электрической машины [3], основанный на подаче последовательности разнополярных импульсов напряжения в виде групп на выводы обмотки, две фазы которой включают как плечи измерительного активно-индуктивного моста, и изменением длительности импульсов и времени задержки между ними в последовательности совмещают участок ее спектра с низкочастотным участком частотной характеристики обмотки и определяют наличие замыкания по величине разности фаз гармоник, выделенных из сигналов, снятых с плеч моста.

Прототипу присущи следующие недостатки:

высокая погрешность из-за использования двух избирательных блоков, обладающих различием в частотных характеристиках и внутренних сопротивлениях, вызванных различием параметров каскадов на основе ОУ, на которых реализованы эти избирательные устройства;

использование разнополярных импульсов приводит к дополнительной погрешности из-за неизбежной асимметрии импульсов и разброса параметров и дополнительно ограничивает возможность цифровой реализации измерительного процесса;

низкая помехозащищенность из-за трудности выделения необходимой спектральной составляющей при наличии близко лежащих соседних спектральных составляющих;

низкая чувствительность к влиянию межвитковых замыканий на выделяемый для анализа сигнал, так как анализ параметров спектра выполняется на дорезонансных частотах, что, в свою очередь, приводит к повышенному влиянию помех.

Целью изобретения является повышение чувствительности к влиянию межвитковых замыканий и помехоустойчивости и уменьшение погрешности измерения.

Поставленная задача достигается тем, что в способе обнаружения дефектов витковой изоляции в обмотках трехфазной электрической машины формируют периодическую импульсную последовательность одной полярности в виде периодической последовательности пачек импульсов с количеством импульсов в пачке 2^{n+1} (где $n = 1, 2, 3 \dots$), с постоянным периодом следования и регулируемой длительностью и временем задержки импульсов, передают сформированную последовательность на вывод одной из фазных обмоток и снимают сигналы с выводов двух других соединенных с резисторами фазных обмоток, суммируя их, после чего выделяют информативную спектральную составляющую из полученной суммы сигналов и информативную спектральную составляющую из упомянутой периодической импульсной последовательности, находят разность фаз между выделенными информативными спектральными составляющими, по которой определяют межвитковое сопротивление обмоток, затем меняют последовательность подключения выводов фазных обмоток, обеспечивая подачу периодической импульсной последовательности на вывод фазной обмотки, отличной от предыдущей, и повторяют упомянутые операции, определяя значение межвиткового сопротивления, и по наличию значительной разницы найденных значений межвиткового сопротивления определяют наличие дефекта витковой изоляции в обмотках трехфазной машины.

На фиг. 1 изображена блок-схема устройства, реализующего заявленный способ, на фиг. 2 и 3 соответственно изображены принцип формирования генератором испытательного напряжения импульсной последовательности и ее амплитудно-частотный спектр, на фиг. 4 изображен метод определения уровня межвиткового сопротивления в зависимости от измеренного значения разности фаз, полученных с двух плеч.

Для увеличения чувствительности к контролю межвиткового сопротивления применяют испытательный сигнал, частота диагностической спектральной составляющей которого находится в резонансной области обмотки контролируемой электрической машины, где уровень диагностируемого параметра максимальный.

Применяют однополярный испытательный сигнал, что ведет к уменьшению погрешности при контроле межвиткового сопротивления, так как в этом случае для формирования испытательного сигнала нет необходимости использовать двуполярные источники питания и несколько независимых схем формирования импульсов, параметры которых всегда отличаются, а также на них по-разному влияют дестабилизирующие внешние факторы.

Для повышения помехоустойчивости в испытательном сигнале организуют подавление соседних спектральных составляющих путем формирования генератором испытательного напряжения последовательности импульсов положительной полярности с устанавливаемыми длительностью импульсов и временем задержки между ними в группах.

Сопротивление в месте дефекта однозначно коррелирует с разностью фаз, которую определяют между одноименными спектральными составляющими испытательного сигнала и суммы сигналов, снятых с двух плеч обмоток электрической машины, что позволяет использовать для анализа снимаемого сигнала одноканальное избирательное устройство и исключить погрешности, связанные с неустранимым дисбалансом двух избирательных устройств.

Устройство для обнаружения дефектов витковой изоляции в обмотках трехфазной электрической машины 1, реализующее способ, содержит генератор испытательного напряжения 2, измерительные резисторы 3 и 4, смеситель сигналов 5, избирательное устройство суммы снимаемых сигналов 6, избирательное устройство испытательного сигнала 7 и фазовый детектор 8.

Устройство для обнаружения дефектов витковой изоляции в обмотках трехфазной электрической машины, согласно предлагаемому способу, работает в следующей последовательности. К одной из обмоток электрической машины 1 подключают выход генератора испытательного напряжения 2, выходы оставшихся двух других обмоток подключают к измерительным резисторам 3 и 4, сигнал с которых подают на смеситель сигналов 5, выход которого подключают к входу избирательного устройства суммы снимаемых сигналов 6, выход которого подключают к одному из входов фазового детектора 8, на второй вход которого подключают выход избирательного устройства испытательного сигнала 7, вход которого, в свою очередь, подключают к выходу генератора испытательного напряжения 2.

Работа устройства, реализующего заявленный способ, заключается в следующем. Генератором испытательного напряжения 2 формируется последовательность групп импульсов положительной полярности с устанавливаемыми параметрами длительности импульсов и временем задержки между ними. При этом длительность импульса (фиг. 2) выбирают таким образом, чтобы для самой дальней и имеющей максимальный номер спектра спектральной составляющей относительно выделяемой, которую подавляют, выполнялось условие

$$n_{0t_i} = N \cdot \frac{T}{t_i},$$

где T - период импульсной последовательности;

t_i - длительность импульса;

N - номер нуля амплитудно-частотного спектра.

Амплитудно-частотный спектр импульсной последовательности представлен на фиг. 3, кривая I.

Затем через время задержки, длительность которой определяется условием $n_{0t_{z1}} = N \cdot \frac{T}{2t_{z1}}$ (где t_{z1} - время задержки между двумя импульсами в последовательности), для самой дальней и имеющей минимальный номер спектра спектральной составляющей относительно выделяемой формируют второй, полностью повторяющий первый, импульс (фиг. 2), амплитудно-частотный спектр которого представлен на фиг. 3, кривая II. Далее полученную пачку из двух импульсов, объединенных в группу, повторяют через дополнительное время задержки (фиг. 2), для которой выполняется условие $n_{0t_{z2}} = N \cdot \frac{T}{2t_{z2}}$ (где t_{z2} - время задержки между группами из двух импульсов в последо-

вательности), для спектральной составляющей расположенной в спектре ближе к выделяемой, относительно подавленной с максимальным номером спектра ранее (фиг. 3, кривая III). Для подавления следующей спектральной составляющей полученную импульсную группу из четырех импульсов повторяют через время задержки t_{z3} (фиг. 2), характеризующую ноль спектральной составляющей, расположенной между выделяемой и подавленной ранее, с минимальным номером спектра (фиг. 3, кривая IV). Результатом выполненных операций является периодическая импульсная последовательность одной

полярности с количеством импульсов в пачке 2^{n+1} (где $n = 1, 2, 3 \dots$). В результате подобных операций выделяют информативную спектральную составляющую, уравнение которой имеет вид (1), добротность выделения которой будет максимальной, и при этом полученный испытательный сигнал малочувствителен к искажению от помех:

$$u_{gn} = U_{gn} \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (1)$$

где φ_n - фаза информативной спектральной составляющей генератора испытательного сигнала;

U_{gn} - амплитуда информативной спектральной составляющей генератора испытательного сигнала;

n - номер информативной спектральной составляющей;

ω - частота импульсной последовательности, формируемая генератором.

Далее сформированный испытательный сигнал подают на вывод одной из фазных обмоток электрической машины 1, например вывод С1 (фиг. 1), и на два вывода других фаз через общую точку соединенных последовательно измерительных резисторов 3 и 4, при этом с двух оставшихся выводов обмоток электрической машины 1, соответственно выводов С2 и С3 (фиг. 1), с помощью измерительных резисторов 3 и 4 снимают контрольные сигналы, уравнение которых можно представить в виде

$$A_1 = \sum_{n=1}^k (U_{mn1} \cos \psi_{n1} + jU_{mn1} \sin \psi_{n1}) \quad \text{и} \quad A_2 = \sum_{n=1}^k (U_{mn2} \cos \psi_{n2} + jU_{mn2} \sin \psi_{n2}), \quad (2)$$

которые суммируют в смесителе сигналов 5. Из полученной комбинации, содержащей набор спектральных составляющих, каждая из которых имеет свой сдвиг фаз, с помощью избирательного устройства суммы снимаемых сигналов 6 выделяют одну информативную спектральную составляющую, выражение для которой можно представить в виде

$$A_{inf} = \sqrt{U_{m1inf}^2 + U_{m2inf}^2 + 2U_{m1inf} \cdot U_{m2inf} \cdot (\cos(\psi_{1inf} - \psi_{2inf}))} \cdot e^{\frac{\psi_{1inf} + \psi_{2inf}}{2}}, \quad (3)$$

где U_{m1inf} - амплитуда информативной гармоники, полученной с одного плеча электрической машины;

U_{m2inf} - амплитуда информативной гармоники, полученной со второго плеча;

ψ_{1inf} - фаза информативной гармоники, полученной с одного плеча электрической машины;

ψ_{2inf} - фаза информативной гармоники, полученной со второго плеча электрической машины.

При этом

$$\psi_{1inf} = \psi_g + \Delta\varphi_1 \quad \text{и} \quad \psi_{2inf} = \psi_g + \Delta\varphi_2, \quad (4)$$

где ψ_g - начальная фаза информативной спектральной составляющей подаваемого с генератора напряжения;

$\Delta\varphi_1$ - изменение фазы информативной спектральной составляющей, определяемой добротностью контура катушки первой обмотки;

$\Delta\varphi_2$ - изменение фазы информативной спектральной составляющей, определяемой добротностью контура катушки второй обмотки.

Полученную результирующую спектральную составляющую подают на один вход фазового детектора 8, на второй вход которого подают выделенную избирательным устройством испытательного сигнала 7 информативную спектральную составляющую испытательного сигнала, формируемую генератором испытательного напряжения 2. Величина разности фаз коррелирована с сопротивлением в месте дефекта витковой изоляции и связана зависимостью

$$R_i(\Delta\varphi) = a_{1i} \cdot \Delta\varphi^0 + a_{2i} \cdot \Delta\varphi^{1/2} + a_{3i} \cdot \Delta\varphi^1 + a_{4i} \cdot \Delta\varphi^{3/2} + a_{5i} \cdot \Delta\varphi^{5/2}, \quad (5)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 - начальные значения коэффициентов, зависящие от типа выбранной электрической машины;

i - тип выбранной электрической машины;

$\Delta\varphi$ - разность фаз, полученная на фазовом детекторе.

Для полной диагностики состояния обмоток электрической машины в измерительной системе меняют местами выводы для подключения к генератору испытательного напряжения и одного из выводов двух других обмоток, например выводы C1 и C2.

Например, определим межвитковое сопротивление обмоток статора асинхронного двигателя АИР65 мощностью 380 Вт, обладающего резонансом обмотки в области 45 кГц. Для этого с помощью генератора испытательного напряжения 2, построенного на основе программируемого микроконтроллера STM32F103C8TB6 с выходным каскадом усилителя мощности на MOSFET-транзисторе IRF740, формируют импульсный сигнал, выделив в нем 13-ю спектральную составляющую, подавляя в нем 11, 12, 14 и 15 составляющие. В этом случае период импульсной последовательности (T) 23 мкс.

Так, согласно

$$n_{0t_i} = N \cdot \frac{T}{t_i} \text{ и } n_{0t_{z1}} = N \cdot \frac{T}{2t_{z1}}. \quad (6)$$

Длительность импульсов и время задержки между группами в импульсной последовательности будут следующими:

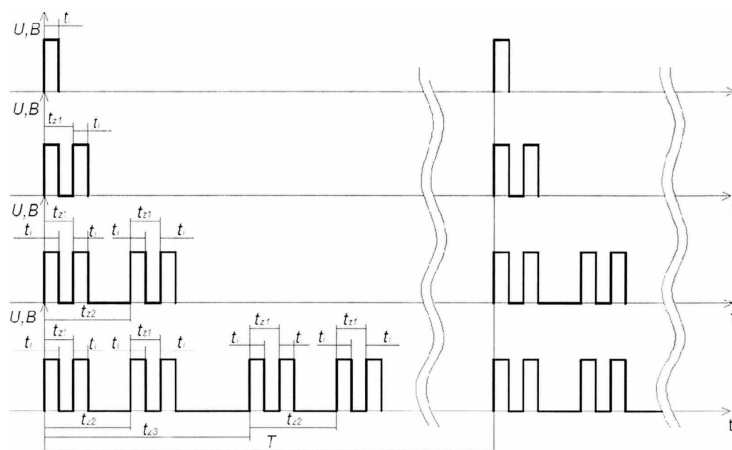
$$\begin{aligned} t_i &= N \cdot \frac{T}{n_{0t_i}} = 1,3 \text{ мкс}, \\ t_{z1} &= N \cdot \frac{T}{2n_{0t_{z1}}} = 1,8 \text{ мкс}, \\ t_{z2} &= N \cdot \frac{T}{2n_{0t_{z2}}} = 3,5 \text{ мкс}, \\ t_{z3} &= N \cdot \frac{T}{2n_{0t_{z3}}} = 7,2 \text{ мкс}. \end{aligned}$$

В общем виде амплитудно-частотный спектр полученного сигнала имеет вид, представленный на фиг. 4.

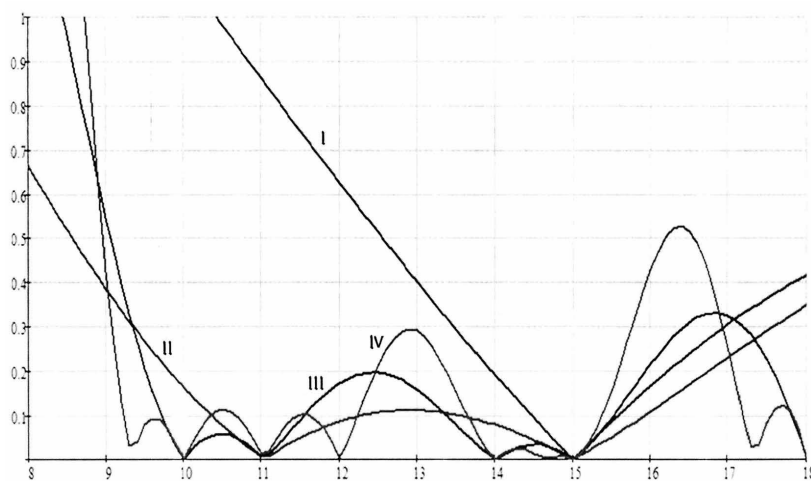
Полученный импульсный сигнал подают на вывод фазной обмотки C1 и снимают с выводов C2 и C3 с помощью измерительных резисторов 3 и 4 исследуемые сигналы, которые подают на смеситель сигналов 5, построенный на операционном усилителе ОРА2237. Далее с помощью избирательных устройств 6 и 7, построенных на операционном усилителе AD8551ARZ, выделяют две информативные спектральные составляющие из сигналов, полученных со смесителя сигналов 5 и с генератора испытательного напряжения 2, и подают их на два входа фазового детектора 8, где в соответствии с выражением (5) и вычисленными коэффициентами a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 для данного типа двигателя и на основании зависимости для этого двигателя $\Delta\varphi = f(R)$ (фиг. 4) определяют дефектную обмотку и получают уровень значения межвиткового сопротивления в ней. Так, при текущей схеме подключения значение $\Delta\varphi$ показало уровень 27 градусов, что соответствует межвитковому сопротивлению в одной из дефектных обмоток около 105 Ом (фиг. 4, точка А). Затем заменяют в схеме подключения контакты выводов C1 и C2 (фиг. 1) и повторяют процедуру измерения. Результатом стало значение $\Delta\varphi$, равное 7 градусам, что соответствует межвитковому сопротивлению около 10 кОм (фиг. 4, точка В). Следовательно, обмотка диагностируемого асинхронного двигателя с выводом C2 (фиг. 1) имеет прогрессирующий дефект межвитковой изоляции, который уже не позволяет двигателю работать в номинальном режиме, и он нуждается в ремонте.

Источники информации:

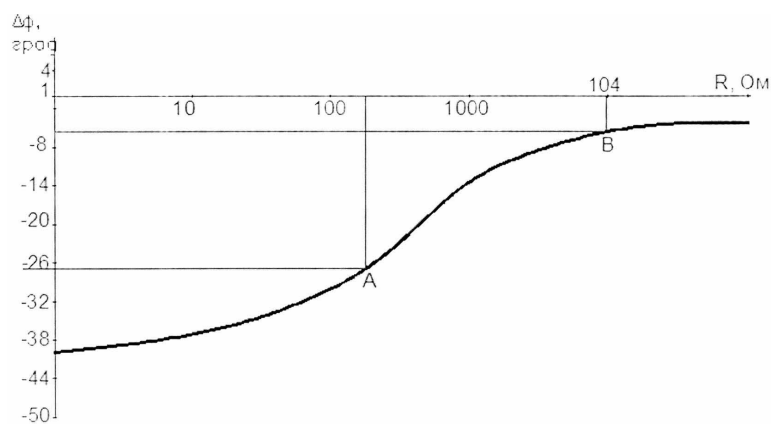
1. RU 2305291, 2007.
2. BY 20042 C1, 2015.
3. RU 2289143, 2006.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4