

УДК 621.313.13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ УСТАНОВЛЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

С. А. Иванов; Я. О. Теплова, канд. техн. наук
ООО "АСпромт", Зеленоград, Москва, Россия

Е. Д. Дуюнов
ООО "СовЭлМаш", Зеленоград, Москва, Россия

В. Д. Колдаев, д-р техн. наук
Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Зеленоград, Москва, Россия

Исследованы применяемые подходы к определению эксплуатационных характеристик электрических машин, в частности асинхронных двигателей, в целях обеспечения качества испытаний, а также установления соответствия классам энергоэффективности. В процессе разработки методики испытаний новых энергоэффективных двигателей, реализующих принцип совмещения обмоток типа "звезда в треугольнике", разработан и предложен способ определения сопротивлений обмоток этих электрических машин.

Ключевые слова: энергоэффективный электропривод, электрическое сопротивление, совмещенные обмотки электрических машин, испытания.

Задачи снижения энергопотребления в промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве, транспорте и т. д. являются ключевыми в рамках одного из приоритетных направлений развития экономики как России, так и других промышленно развитых государств. Системы, использующие электропривод, — основные потребители электроэнергии. В связи с этим даже незначительное сокращение энергопотребления электрических машин приводит к существенной экономии и повышению эффективности технологических процессов [1, 2]. Международная электротехническая комиссия ввела в обращение классы энергетической эффективности, обозначаемые кодами IE [3]. Так, в странах Европей-

ского Союза директива ЕС 640/2009, определяющая соответствие сверхвысокому классу IE3, с 2017 г. распространяется на двигатели с номинальной мощностью 0,75—375 кВт, широко применяемые в промышленности [1].

Сложившаяся ситуация обуславливает актуальность задач поиска и масштабного внедрения научно обоснованных решений и путей улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик электропривода, а также повышения эффективности контроля этих характеристик.

Основная часть

В качестве средства повышения энергоэффективности все более широко применяются, известные и вновь разрабатываемые схемы так называемых совмещенных обмоток типа "Славянка". Совмещенная обмотка включает в себя две взаимозависимые обмотки, одна из которых собрана в "звезду", другая — в "треугольник". Обмотки уложены в пазы таким образом, что результирующие векторы индукции магнитных потоков пар полюсов одноименных фаз "звезды" и "треугольника" образуют между собой угол в 30 электрических градусов. Это приводит к образованию фактически шестифазной системы токов и, соответственно, улучшению параметров электромагнитных полей, а также моментных характе-

Иванов Сергей Александрович, генеральный директор.
E-mail: iserg@as-pp.ru

Теплова Яна Олеговна, инженер.
E-mail: yana.teplova@gmail.com

Дуюнов Евгений Дмитриевич, инженер по внедрению новой техники и технологии.

E-mail: dyunov@yandex.ru

Колдаев Виктор Дмитриевич, профессор.
E-mail: koldaev.v@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2018 г.

© Иванов С. А., Теплова Я. О., Дуюнов Е. Д.,
Колдаев В. Д., 2018

ристик, существенно превосходящих характеристики аналогов [4—6].

Анализ нормативно-технических документов, а также отечественного и зарубежного опыта показывает, что широко применяемые методы испытаний электрических машин могут быть модернизированы и улучшены в части эффективности контроля параметров машин с совмещенными обмотками. При этом решение задачи достаточно достоверного определения параметров испытуемых машин необходимо для обеспечения возможности создания адекватных схем замещения и разработки эффективных алгоритмов и систем управления энергоэффективными приводами для возможно более полной реализации преимуществ технологии совмещенных обмоток (контроллеров частотного управления). Кроме того, это позволит избежать необходимости создания более сложных и, соответственно, более дорогостоящих и трудоемких в тестировании, отладке и сопровождении систем управления.

Так, известны способы определения сопротивления фаз трехфазных электрических машин с обмотками, соединенными по типу подключения "звезда" или "треугольник", однако определение сопротивлений совмещенных обмоток не регламентируется, т. е. способов определения сопротивлений для электродвигателей и генераторов с совмещенными обмотками не содержится в стандартах. Измерение для классических обмоток производят пофазно при наличии выводов начала и конца каждой фазы либо для каждой части фазы при наличии отдельных выводов [7]. Также возможно измерение сопротивления между каждыми двумя соседними отводами, но сумма измеренных сопротивлений может не совпадать со значением сопротивления обмотки в целом.

Для создания методики автоматизированных испытаний электрических машин, прежде всего асинхронных двигателей, предложен способ определения сопротивлений совмещенных обмоток электрических машин.

В соответствии с нормативными документами при подключении фаз обмотки электрической машины в "звезду" без нейтрального (нулевого) вывода сопротивление фазы, примыкающей к выводу начала или конца фазы, к примеру вывода 1, определяется по формуле

$$R_1 = \frac{R_{31} + R_{12} - R_{23}}{2} \quad (1)$$

где R_{31} , R_{12} , и R_{23} — значения сопротивлений, измеренных, соответственно, между выводами 3 и 1, 1 и 2, 2 и 3 [7].

При соединении фаз обмоток в "треугольник" сопротивление между двумя соседними выводами определяют следующим образом:

$$R_1 = \frac{2R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2} \quad (2)$$

При проведении испытаний определяют разности (расхождения) измеренных значений R_{31} , R_{12} и R_{23} . Если эти расхождения не превосходят 2 % для подключения в "звезду" и 1,5 % для подключения в "треугольник", переходят к определению сопротивления одной фазы.

Для "звезды" это значение определяют как среднее арифметическое трех измеренных сопротивлений, поделенное на два:

$$R = \frac{R_{И}}{2} \quad (3)$$

Для соединения обмоток в "треугольник" сопротивление одной фазы определяют следующим образом:

$$R = \frac{2R_{И}}{2} \quad (4)$$

Предлагаемый способ определения сопротивлений обмоток предназначен для использования при испытаниях асинхронных электродвигателей и генераторов с совмещенными обмотками, реализующими параллельное соединение "звезды" и "треугольника" [8—10].

На рис. 1 представлена схема измерения сопротивления при сопряжении фаз в "звезду" и "треугольник".

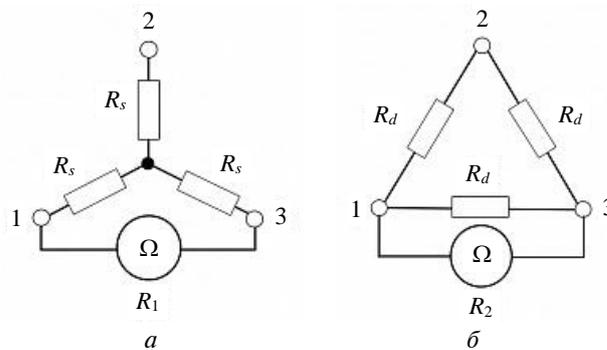


Рис. 1. Измерение сопротивления обмоток:
а — при сопряжении фаз обмоток в "звезду";
б — при сопряжении фаз обмоток в "треугольник"

Прежде всего определяют величину R_1 — сопротивления между выводами 3 и 1, 1 и 2, 2 и 3 и R_2 — сопротивление между выводами 1 (2, 3) и нейтральным выводом. Измерение производится с помощью любого измерительного устройства в зависимости от используемой комплектации испытательного стенда и набора контрольно-измерительного оборудования.

Исходя из методики определения сопротивлений фаз классических обмоток и общей схемы соединения совмещенных обмоток, можно утверждать, что

$$R_s = \frac{R_1}{2}; R_l = 2R_s, \quad (5)$$

$$R_d = \frac{2R_2}{2}; R_2 = \frac{2R_d}{3}, \quad (6)$$

где R_s — сопротивление "звезды";
 R_d — сопротивление "треугольника".

Из выражений (5) и (6) следует, что при параллельном сопряжении "звезды" и "треугольника" для сопротивления между выводами 3 и 1, 1 и 2, 2 и 3 (рис. 2) справедливо выражение

$$R_3 = \frac{4R_s R_d}{3(2R_s + 2R_d / 3)} = \frac{4R_s R_d}{6(R_s + R_d / 3)} = \frac{2R_s R_d}{3R_s + R_d}. \quad (7)$$

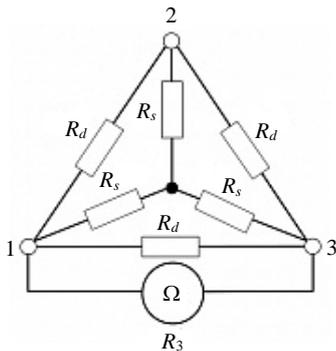


Рис. 2. Параллельное сопряжение обмоток, соединенных в "звезду" и "треугольник"

Для сопротивлений между выводами 1, 2, 3 и нейтральным выводом (рис. 3) справедливо следующее выражение:

$$R_4 = \frac{R_s (R_d + R_s)}{3R_s + R_d}. \quad (8)$$

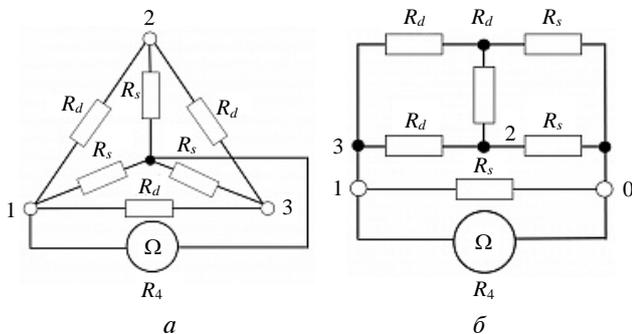


Рис. 3. Определение сопротивлений между выводами 1, 2, 3 и нейтральным выводом совмещенных обмоток при параллельном сопряжении "звезды" и "треугольника"

Из (7) получим сопротивление "треугольника" R_d :

$$\begin{aligned} R_3 (3R_s + R_d) &= 2R_s R_d; \\ 3R_3 R_s + R_3 R_d &= 2R_s R_d; \\ 3R_3 R_s &= 2R_s R_d - R_3 R_d; \\ R_d (2R_s - R_3) &= 3R_3 R_s; \\ R_d &= \frac{3R_3 R_s}{2R_s - R_3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из (8) также получаем сопротивление "треугольника":

$$\begin{aligned} R_4 (3R_s + R_d) &= R_s (R_d + R_s); \\ 3R_4 R_s + R_4 R_d &= R_s R_d + R_s^2; \\ R_4 R_d - R_s R_d &= R_s^2 - 3R_4 R_s; \\ R_d (R_4 - R_s) &= R_s^2 - 3R_4 R_s; \\ R_d &= \frac{R_s^2 - 3R_4 R_s}{R_4 - R_s}. \end{aligned} \quad (10)$$

Приравняв выражения (9) и (10), из полученного уравнения выводим выражение для сопротивления "звезды" R_s :

$$\begin{aligned} \frac{3R_3 R_s}{2R_s - R_3} &= \frac{R_s^2 - 3R_4 R_s}{R_4 - R_s}; \\ \frac{3R_3 R_s}{2R_s - R_3} &= \frac{R_s (R_s - 3R_4)}{R_4 - R_s}; \\ \frac{3R_3}{2R_s - R_3} &= \frac{R_s - 3R_4}{R_4 - R_s}; \\ 3R_3 (R_4 - R_s) &= (2R_s - R_3) (R_s - 3R_4); \\ 3R_3 R_4 - 3R_3 R_s &= 2R_s^2 - 6R_4 R_s - R_3 R_s + 3R_3 R_4; \\ -2R_3 &= 2R_s - 6R_4; \\ 6R_4 - 2R_3 &= 2R_s; \\ R_s &= 3R_4 - R_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Для получения сопротивления "треугольника" R_d (11) подставим в выражение (10). Получим выражение для R_d как отношения произведения сопротивления R_3 и разности утроенного значения R_4 и R_3 к разности удвоенного значения R и R_3 :

$$\begin{aligned} R_d &= \frac{R_s (R_s - 3R_4)}{R_4 - R_s}; \\ R_d &= \frac{-R_3 (3R_4 - R_3)}{R_3 - 2R_4}; \\ R_d &= \frac{R_3 (3R_4 - R_3)}{2R_4 - R_3}. \end{aligned} \quad (12)$$

Измеряют значения сопротивлений R_{31} , R_{12} , R_{23} (сопротивления между выводами 3 и 1, 1 и 2, 2 и 3).

После определения значений сопротивлений между выводами 3 и 1, 1 и 2, 2 и 3 получают значение сопротивления R_3 аналогично значению R_1 по формуле (2). Если расхождения в измеренных значениях сопротивлений R_{31} , R_{12} и R_{23} не превосходят $\pm 1,5\%$ при сопряжении фаз в "треугольник", то сопротивление R_3 определяют аналогично формуле (4).

Значение сопротивления R_4 получают как среднее арифметическое сопротивлений между выводами 1, 2, 3 и нейтральным выводом.

В соответствии с (11) и (12) определяют сопротивления "звезды" (R_s) и "треугольника" (R_d).

С применением описанного способа и при наличии нейтрального вывода "звезды" также можно определять косвенным образом, является ли обмотка испытуемой электрической машины совмещенной. В рамках испытаний модернизированных с заменой обмоток, перепроектированных и вновь изготовленных машин способ может использоваться для установления правильности выполнения совмещенной обмотки.

Для проверки правильности обмотки вычисляют отношение сопротивления "треугольника" R_d к сопротивлению "звезды" R_s . При корректном выполнении совмещенной обмотки в соответствии с технологией "Славянка" полученное значение должно находиться в диапазоне 2,9—3,1, что было установлено экспериментально на различных образцах асинхронных двигателей.

Заключение

Способ определения сопротивлений совмещенных обмоток нашел применение в специализированной лаборатории при создании комплексной методики испытаний в автоматизированном режиме электрических вращающихся машин с совмещенными обмотками для получения приемлемых результатов испытаний и контроля качества исполнения. В частности, повышение эффективности определения сопротивлений обмоток позволяет оценивать электрические потери в обмотках. Результаты этих испытаний в дальнейшем будут использованы для:

- исследования и разработки конструктивных решений при проектировании энергоэффективных асинхронных, синхронных электродвигателей и генераторов с совмещенными обмотками типа "звезда в треугольнике" на основе автоматизированного проектирования и компьютерного моделирования [6];

- разработки схем замещения для повышения эффективности автоматического управления электроприводами, включая высокомоментные приводы транспортных средств.

В условиях поиска путей снижения энергоемкости технологических процессов в производстве, ЖКХ, транспорте и других областях деятельности, а также необходимости обеспечения устойчивости и надежности энергосистем масштабное внедрение энергоэффективных электроприводов представляется весьма перспективным направлением развития электротехнической отрасли как в России, так и за рубежом. В свою очередь, это обуславливает актуальность задач контроля и обеспечения качества электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые регламенты IE3 повышают энергетическую эффективность электродвигателей на 50 % [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://webportalsrv.gost.ru/portal/DOR-www.nsf/all/4E381F92DE0F0B1AC3257E1800447B71?OpenDocument> (дата обращения: 04.07.2018).
2. ANSI/EASA AR100 2015 Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus. 2003 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.easa.com/resources/booklet/ANSI-EASA-AR100-2015> (дата обращения: 20.06.2018).
3. ГОСТ IEC 60034-30-1-2016. Машины электрические вращающиеся. Ч. 30-1. Классы КПД двигателей переменного тока, работающих от сети (код IE). — М.: Стандартинформ, 2017. — 18 с.
4. Kasten H., Hofmann W. Electrical Machines with Higher Efficiency through Combined Star-Delta Windings // Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011.
5. Cistelecan M. V., Ferreira F. J. T. E., Popescu M. Adjustable Flux Three-Phase AC Machines with Combined Multiple-Step Star-Delta Connections // IEEE Trans. On Energy Conversion. 2010. V. 25. No. 2. P. 348—355.
6. Дуюнов Д. А., Яковлев И. Н., Дуюнов Д. Е., Портнов Е. М., Агриков Ю. М., Терашкевич И. М., Теплова Я. О. Разработка метода повышения энергоэффективности электрических приводов на базе асинхронных двигателей с совмещенными обмотками // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2017. № 2. С. 11—17.
7. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.

8. Дуюнов Д. А., Дуюнов Е. Д., Агриков Ю. М. Обмотка асинхронного двигателя. Патент 111723 РФ. МПК7 Н 02 К 3/28, Н 02 К 17/14. Заявитель и патентообладатель ООО "АС и ПП". 2011125501/07. Заявл. 21.06.2011. Опубл. 20.12.2011. Бюл. № 35.

9. Агриков Ю. М., Дуюнов Д. А., Блинов В. Л., Яковлев И. Н. Малошумный асинхронный двигатель. Патент 2507664 РФ. МПК7 Н 02 К 3/28, Н 02 К 17/12. Заявитель и патентообладатель ООО "АС и ПП". 2011151274/07. Заявл. 14.12.2011. Опубл. 20.02.2014. Бюл. № 5.

10. Агриков Ю. М., Дуюнов Д. А., Дуюнов Е. Д., Блинов В. Л., Яковлев И. Н. Малошумный энергоэффективный электропривод. Патент 2568672 РФ. МПК7 Н 02 К 17/12, Н 02 К 3/28. Заявитель и патентообладатель ООО "АС и ПП". 2014132978/07. Заявл. 11.08.2014. Опубл. 20.11.2015. Бюл. № 32.

EVALUATION OF COMBINED WINDINGS RESISTANCE OF THREE-PHASE ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC MACHINES FOR PROVIDING RELIABILITY OF MACHINES OPERATIONAL CHARACTERISTICS ESTIMATION

S. A. Ivanov, Ya. O. Teplova

"ASpromt" Limited Liability Company, Zelenograd, Moscow, Russia

E. D. Duyunov

"SovElMash" Limited Liability Company, Zelenograd, Moscow, Russia

V. D. Koldaev

National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia

The wide-used approaches to estimation of electric machines, including induction motors, performance characteristics were investigated. The goal of this estimation is to provide the high quality of testing and to find out energy efficiency classes the test samples of motors meet. While developing the test methodology and procedure for new energy-efficient motors with combined windings, implementing the "star in delta" principle, and the method of combined windings resistance were developed and proposed.

Keywords: energy-efficient electric drive, electric resistance, electric machines combined windings, testing.

Bibliography — 10 references.

Received September 20, 2018