



## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ ПО ФАЗАМ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ С СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКОЙ

Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Васильев Д.А., Дресвянникова Е.В.

Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, г. Ижевск, Россия

nebelll@bk.ru

**Резюме:** ЦЕЛЬ. В электроприводах промышленных и сельскохозяйственных механизмов широкое распространение получили асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Одним из возможных путей улучшения их энергетических характеристик является применение совмещённой 12-зонной обмотки статора вместо стандартной 6-зонной. Однако, в совмещённой обмотке с параллельным соединением фаз схемы «звезда» и схемы «треугольник», фазы могут быть загружены не равномерно. Поэтому основной целью работы является исследование распределения токов между фазами в схемах «звезда» и схеме «треугольник» в асинхронном электродвигателе с совмещённой обмоткой. МЕТОДЫ. Исследование осуществлялось на электродвигателе АИР71В4, стандартная обмотка которого была заменена на совмещённую. В новой обмотке эмпирическое отношение активных сопротивлений схемы «треугольник» и схемы «звезда» получилось меньше теоретического на 7%. Испытания проводились в режиме холостого хода и короткого замыкания при питании от трёхфазной сети, а также в режиме короткого замыкания при обрыве одного из линейных проводов. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе приводятся значения токов, протекающих по фазам совмещённой обмотки. Для экспериментального образца определена разность значений теоретических и измеренных токов. Получены уравнения токов при обрыве одного из линейных проводов. Предложены схемы включения главных контактов теплового реле для электродвигателя с совмещённой обмоткой. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования показали, что в асинхронном электродвигателе с совмещённой обмоткой, в которой реальное отношение активных сопротивлений схемы «треугольник» и схемы «звезда» меньше теоретического, ток по фазам распределяется не пропорционально. Схема включения трёхполюсного теплового реле, в которой его главные контакты подключаются в фазы схемы «треугольник», является наиболее предпочтительной.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель; совмещённая обмотка; распределение токов; тепловое реле; отношение активных сопротивлений.

**Для цитирования:** Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Васильев Д.А., Дресвянникова Е.В. Исследование распределения токов по фазам в асинхронном электродвигателе с совмещённой обмоткой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 150-159. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-150-159.

## RESEARCH OF CURRENT DISTRIBUTION BY PHASES IN ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITH A COMBINED WINDING

KV Martynov, LA Panteleeva, DA Vasiliev, EV Dresvyannikova

Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

nebelll@bk.ru

**Abstract:** THE PURPOSE. The asynchronous electric motor with a squirrel cage rotor is widely used in the electric driven industry and agricultural machinery. One of the possible ways to improve its energy characteristics is to use a combined 12-zone stator winding instead of the standard 6-zone one. However, in a combined winding with a parallel connection of the «star» and «delta» phases, the phases may not be loaded equally. Therefore, the main purpose of the work under analysis is to study the distribution of currents between the phases of the «star» and «delta» in the asynchronous motor with a combined winding. METHODS. The study was

performed on the AIR71V4 engine, rewound onto a combined winding, in which the real ratio of the active resistances of the «delta» and «star» turned out to be 7% less than the theoretical one. The tests were carried out in no-load and short-circuit mode when powered from a three-phase network, as well as in short-circuit mode when one of the line wires is broken. **RESULTS.** The work gives the values of the currents flowing through the phases of the combined winding. For the experimental sample, the deviation of the obtained currents from the theoretical values is determined. Equations of currents are obtained when one of the linear wires is broken. Schemes for switching on the main contacts of a thermal relay for a motor with a combined winding are proposed. **CONCLUSION.** The results of the study showed that in an asynchronous motor with a combined winding, in which the real ratio of the active resistances of the «delta» and «star» is less than the theoretical one, the current is not proportionally distributed over the phases. The most preferred circuit for switching on a thermal relay is one in which its main contacts are connected to the «delta» phases, and the thermal relay must be three-pole.

**Keywords:** asynchronous electric motor; combined winding; distribution of currents; thermal relay; the ratio of active resistances.

**For citation:** Martynov KV, Panteleeva LA, Vasiliev DA, Dresvyannikova EV. Research of current distribution by phases in asynchronous electric motor with a combined winding. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(5): 150-159. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-150-159.

### Введение

В качестве электропривода промышленных и сельскохозяйственных установок преимущественное применение получили трёхфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, так как на их долю приходится около 70-75% от всего энергопотребления [1, 2]. Поэтому повышение энергетических показателей таких двигателей может привести к значительному снижению затрат электрической энергии. Несмотря на высокую надёжность асинхронных электродвигателей, не исключена возможность их отказа, особенно при тяжёлых условиях эксплуатации [3]. Так, например, в сельскохозяйственном производстве ежегодный выход электродвигателей из строя составляет 25-30% от имеющегося парка [4]. Наиболее распространённой причиной отказа является повреждение обмотки статора, что составляет 90-95% от всех случаев [4, 5]. При этом асинхронный электродвигатель выводится в капитальный ремонт с заменой обмотки, после которого его энергетические характеристики могут ухудшиться. Поэтому целесообразно применять способы и методы, способствующие улучшению энергетических характеристик электродвигателей, не только при их изготовлении, но и при их ремонте.

Применяемые мероприятия должны быть, по возможности, простыми, недорогими и доступными в условиях осуществления ремонта. Одним из таких возможных направлений повышения КПД и коэффициента мощности электродвигателя является использование в нём совмещённой 12-зонной обмотки статора вместо стандартной 6-зонной. Совмещённую обмотку можно представить в виде двух трёхфазных обмоток, в одной из которых фазы соединены по схеме «звезда» (далее «звезда»), а в другой по схеме «треугольник» (далее «треугольник»). Между собой они подключаются параллельно, либо последовательно (рис. 1).

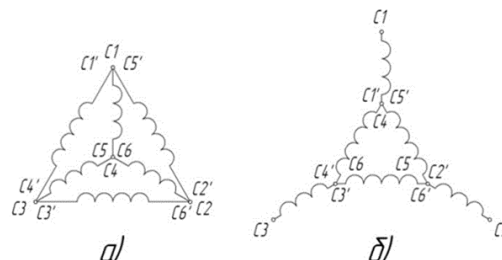


Рис. 1. Схемы соединения частей совмещённых обмоток: а) параллельное соединение; б) последовательное соединение

Fig. 1. Schemes for connecting parts of combined windings: a) parallel connection; b) serial connection

Совмещённая обмотка вызывает определённый исследовательский интерес не только в России, но и за рубежом [6-10]. В предыдущих работах были обоснованы некоторые

преимущества совмещённых обмоток, такие как снижение относительного содержания высших пространственных гармоник [11-14] и эквивалентного активного сопротивления [15].

При проектировании совмещённых обмоток стремятся добиться равного разделения мощностей между «звездой» и «треугольником», при этом отношение сопротивлений «треугольника» к сопротивлениям «звезды» должно быть равным трём  $z_{\Delta}/z_Y=3$ . В этом случае токи между обмотками распределяются следующим образом:

$$I_Y = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta} = \frac{I_{Y\Delta}}{2},$$

где  $I_Y$  и  $I_{\Delta}$  – действующие значения токов, протекающих по фазам «звезды» и «треугольника» соответственно, А;

$I_{Y\Delta}$  – линейный ток электродвигателя с совмещённой обмоткой, А.

Несмотря на все преимущества совмещённой обмотки, у неё есть и потенциальный недостаток – при параллельном соединении фаз «звезды» и «треугольника» теоретически возможно не пропорциональное распределение токов между фазами, что может привести к перегреву одной из обмоток. Причиной тому может быть несоответствие теоретического и эмпирического соотношения сопротивлений фаз, а также возможность существования токов гармоник кратных трём в замкнутом контуре «треугольника».

**Цель исследования** – определить, как распределяются токи между фазами «звезды» и «треугольника» в электродвигателе с совмещённой обмоткой.

#### Материалы и методы

Исследования проводились на асинхронном электродвигателе АИР71В4 с номинальной мощностью 0,75 кВт, в который была уложена совмещённая 12-зонная обмотка (рис. 2). Перематка осуществлялась на ЗАО «Удмуртский электроремонтный завод», а обмоточные данные рассчитывались с помощью программы [16]. Из-за округления сечений обмоточных проводов до стандартных значений активное сопротивление фаз «треугольника» получилось немного меньше теоретического, а опытное отношение активных сопротивлений «треугольника» и «звезды» меньше теоретического на 7%.

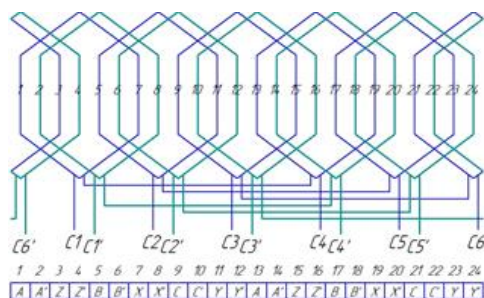


Рис. 2. Схема однослойной совмещённой 12-зонной обмотки экспериментального электродвигателя

Fig. 2. Scheme of a single-layer combined 12-zone winding of an experimental motor

В таблице 1 приведены некоторые обмоточные данные совмещённой обмотки экспериментального электродвигателя

Таблица 1

Обмоточные данные экспериментального электродвигателя

	Фазы «звезды»	Фазы «треугольника»
Число витков фазы $w$	384	664
Число пазов, приходящихся на полюс и фазу $q$	1	1
Число эффективных проводников в пазу $u_n$	192	332
Диаметр проводника без изоляции $d$ , мм	0,4	0,315
Число параллельных проводов в витке $n_{эл}$	1	1
Число параллельных ветвей $a$	1	1

Исследования проводились в двух крайних режимах работы электродвигателя: на холостом ходу и при коротком замыкании. Схема испытания изображена на рис. 3. С помощью приборов измерительного комплекта K505 совершались измерения линейных и

фазных токов «звезды» и «треугольника». В опыте холостого хода измерения проводились при значениях фазных напряжений 180-230 В с шагом 10 В, а в опыте короткого замыкания при значениях 30-70 В с таким же шагом. Измеренные токи были получены в результате пятикратной повторности контролируемого эксперимента. За показания токов принималось среднее арифметическое значение всех замеров:

$$I = \frac{\sum_{k=1}^5 I_k}{5},$$

где  $I_k$  – среднее арифметическое значение силы тока в  $k$ -ом замере, А;  $k$  – количество замеров измеряемого тока.

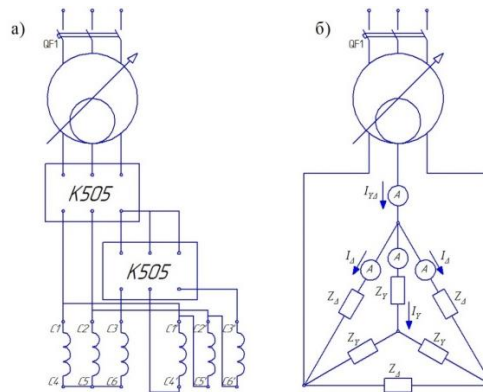


Рис. 3. Схема испытания по определению распределения токов в асинхронном электродвигателе с совмещённой обмоткой:

Fig. 3. Test scheme for determining the distribution of currents in an induction motor with a combined winding: a) a real scheme; b) equivalent circuit

а) схема проведения эксперимента;  
б) эквивалентная схема

Для определения распределения токов по фазам электродвигателя, в случае обрыва одного из линейных проводов, проводился опыт короткого замыкания по схеме, изображённой на рис. 4.

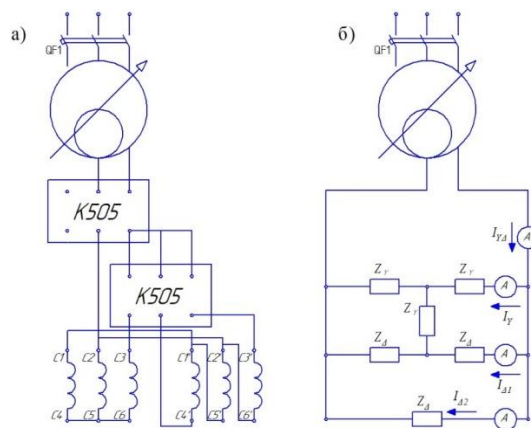


Рис. 4. Схема испытания по определению распределения токов в асинхронном электродвигателе с совмещённой обмоткой при обрыве одного линейного провода:

Fig. 4. Test scheme for determining the distribution of currents in an induction motor with a combined winding when one line wire is broken:

а) схема проведения эксперимента;  
б) эквивалентная схема

Для определения процентной разницы между токами, протекающими по фазам «треугольника» и «звезды», использовалась следующая формула:

$$\Delta I_{Y\Delta} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\Delta} - I_{Y\Delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{\Delta}} \cdot 100\% .$$

Процентную разницу между токами фаз «треугольника» и «звезды», полученными в эксперименте и в результате расчёта (в расчёте  $I_{Y\Delta}$  берётся из эксперимента) определим по формулам:

$$\Delta I_Y = \frac{I_Y - I_{Yтеор}}{I_Y} \cdot 100\%;$$

$$\Delta I_{\Delta} = \frac{I_{\Delta} - I_{\Deltaтеор}}{I_{\Delta}} \cdot 100\%,$$

где  $I_{Yтеор}$  и  $I_{\Deltaтеор}$  – соответственно действующие значения токов, протекающих по фазам «звезды» и «треугольника», полученные в результате расчёта, А.

### Результаты и обсуждения

В таблице 2 приведены результаты испытаний электродвигателя на холостом ходу.

Таблица 2

Результаты исследования распределения токов по фазам электродвигателя с совмещённой обмоткой на холостом ходу

Напряжение $U$ , В	Линейный ток $I_{Y\Delta}$ , А	Ток «звезды»		Ток «треугольника»		Разница $\Delta I_{Y\Delta}$ , %
		$I_Y$ , А	$\Delta I_Y$ , %	$I_{\Delta}$ , А	$\Delta I_{\Delta}$ , %	
230	1,77	0,88	-0,81	0,52	2,47	3,25
220	1,55	0,77	-0,77	0,46	2,38	3,12
210	1,35	0,67	-0,86	0,40	2,19	3,03
200	1,19	0,59	-0,88	0,35	2,12	2,98
190	1,06	0,52	-1,02	0,31	2,12	3,11
180	0,94	0,47	-0,98	0,28	2,19	3,14

По данным опыта видно, что ток фаз «треугольника» превышает ожидаемое (теоретическое) значение, при этом с ростом напряжения разница возрастает.

Режим короткого замыкания характеризует работу электродвигателя во время пуска. Опыт короткого замыкания проводился при пониженном напряжении до 70 В. Это сделано с целью ограничения критических значений токов, которые могут возникнуть при больших напряжениях. Однако, для практики важны значения токов при номинальном напряжении. Для решения этой задачи к полученным зависимостям токов короткого замыкания от напряжения (рис. 5) была применена линейная аппроксимация и построены линии тренда до напряжения 220 В.

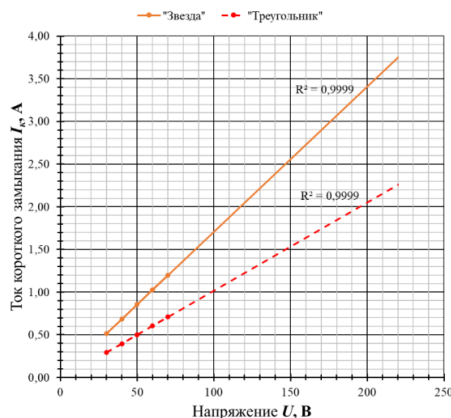


Рис. 5. Аппроксимированная зависимость токов короткого замыкания от напряжения для фаз электродвигателя с совмещённой обмоткой: сплошная линия – ток в фазах «звезды»; пунктирная линия – ток в фазах «треугольника»

Fig. 5. Approximate dependence of short-circuit currents on voltage for motor phases with a combined winding: solid line - current in «star» phases; the dotted line - in the phases of the «delta»

В таблице 3 приведены результаты испытаний электродвигателя в режиме короткого замыкания.

Таблица 3

Результаты исследования распределения токов по фазам электродвигателя с совмещённой обмоткой, работающего в режиме короткого замыкания

Напряжение $U$ , В	Линейный ток $I_{Y\Delta}$ , А	Ток «звезды»		Ток «треугольника»		Разница $\Delta I_{Y\Delta}$ , %
		$I_Y$ , А	$\Delta I_Y$ , %	$I_{\Delta}$ , А	$\Delta I_{\Delta}$ , %	
30	1,04	0,52	-0,40	0,30	-1,24	-0,84
40	1,38	0,68	-0,61	0,40	-0,28	0,33
50	1,73	0,85	-0,98	0,50	0,41	1,37
60	2,08	1,03	-1,01	0,60	0,66	1,65
70	2,43	1,20	-1,57	0,71	1,00	2,53
220	7,65	3,75	-2,00	2,25	1,85	3,77

Так же, как и для режима холостого хода, в режиме короткого замыкания измеренный ток «треугольника» превосходит расчётное значение, при этом с ростом напряжения эта разница становится более заметной. Причиной может являться возможность существования в замкнутой цепи «треугольника» токов гармоник кратных трём, которые появляются вследствие насыщения магнитной цепи [17]. А также на это могло частично повлиять заниженное активное сопротивление «треугольника».

На практике не редко встречаются случаи обрыва одного из линейных проводов, от которых запитан электродвигатель. При этом, если электродвигатель не работал в момент обрыва, то при включении в сеть от двух фаз, он не запустится, а по его обмотке будут протекать токи короткого замыкания. В этом случае для определения распределения токов по фазам совмещённой обмотки, а также для определения относительных значений токов по сравнению с трёхфазным режимом, был проведён опыт короткого замыкания по схеме, изображённой на рисунке 4. Результаты исследования приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результата исследования распределения токов по фазам двигателя с совмещённой обмоткой, работающего в режиме короткого замыкания при обрыве одного из линейных проводов ( $U=30$  В)

	Линейный ток $I_{Y\Delta}$	Ток «звезды» $I_Y$	Ток «треугольника»	
			$I_{\Delta 1}$	$I_{\Delta 2}$
Значение, А	0,91	0,45	0,15	0,30
Относительно 3-х фазного	0,88	0,88	0,51	1,02

Из схемы на рис. 4б получены теоретические выражения для токов через значения напряжения и сопротивления «треугольника» (считая  $z_{\Delta}=3 \cdot z_Y$ ):

$$\begin{cases} I_{Y\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{\frac{2 \cdot z_Y \cdot z_{\Delta}}{3 \cdot z_Y + z_{\Delta}}} = 3 \cdot \frac{U_{\Delta}}{z_{\Delta}}; \\ I_Y = \frac{U_{\Delta}}{2 \cdot z_Y} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{\Delta}}{z_{\Delta}}; \\ I_{\Delta 1} = \frac{U_{\Delta}}{2 \cdot z_{\Delta}}; \\ I_{\Delta 2} = \frac{U_{\Delta}}{z_{\Delta}}, \end{cases}$$

где  $U_{\Delta}$  – значение линейного напряжения, А;  $z_{\Delta}$  и  $z_Y$  – комплексные сопротивления «треугольника» и «звезды» соответственно, Ом.

Из полученных уравнений и схемы, изображённой на рисунке 4б видно, что при обрыве одного из линейных проводов, ток в двух фазах «звезды» меньше линейного значения в два раза, при этом в оставшейся третьей фазе ток отсутствует. В двух фазах «треугольника» ток меньше линейного значения в 6 раз, а в третьей фазе меньше в 3 раза.

В случае же питания электродвигателя от трёх фаз уравнения для токов будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} I_{Y\Delta} = 2\sqrt{3} \cdot \frac{U_{\Delta}}{z_{\Delta}}; \\ I_Y = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3} \cdot z_Y} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{\Delta}}{z_{\Delta}}; \\ I_{\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{z_{\Delta}}. \end{cases}$$

Сравнивая между собой полученные уравнения, видим, что при обрыве одного из линейных проводов линейный и фазный токи «звезды» отличаются в 0,866 от токов при работе электродвигателя в трёхфазном режиме. Ток в одной из фаз «треугольника» равняется току при работе от трёхфазного напряжения, а в двух других фазах будет отличаться в меньшую сторону в два раза. Полученные теоретические выводы совпадают с результатами экспериментального исследования (таблица 4).

### Выводы

Исследование проводилось на электродвигателе с совмещённой обмоткой, в которой экспериментальное отношение активных сопротивлений «треугольника» и «звезды» меньше теоретического. Для такого электродвигателя разность измеренного и теоретического тока «треугольника» при номинальном напряжении составляет 1,85% в режиме короткого замыкания и 2,38% в режиме холостого хода в большую сторону. В «звезде» ситуация складывается совершенно другим образом, ток меньше на 2,00% и 0,77% соответственно. При уменьшении подводимого напряжения наблюдается тенденция к уменьшению отклонений токов «треугольника».

Для более точного объяснения причины такого отклонения и степени влияния активного сопротивления на результат необходимо провести дополнительные исследования.

### Рекомендации

Результаты исследования могут быть использованы для выбора способа подключения главных контактов теплового реле. Возможны три варианта: к линейным проводам (как для стандартного электродвигателя); в фазы «звезды» и «треугольника» (для этого потребуются два тепловых реле); только в фазы «треугольника». На рисунке 6 изображены варианты схемы подключения главных контактов теплового реле в фазы «звезды» и «треугольника» и только в фазы «треугольника».

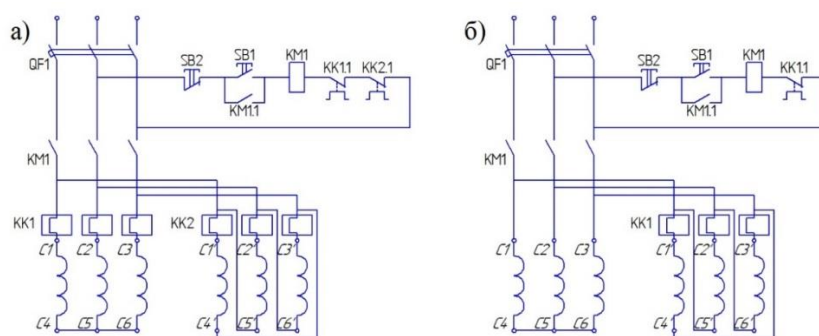


Рис. 6. Схема подключения теплового реле для асинхронного электродвигателя с совмещённой обмоткой: а) подключение главных контактов в фазы «звезды» и «треугольника»; б) только в фазы «треугольника».

Fig. 6. Connection diagram of a thermal relay for an asynchronous motor with a combined winding:

a) connecting the main contacts to the «star» and «delta» phases; b) only in the "delta" phases

В схемах предлагается установить трёхполюсное тепловое реле, так как в случае обрыва одной из питающих линий токи в фазах «треугольника» отличаются, при этом, как и для электродвигателя со стандартной обмоткой [18], ток в наиболее нагруженной фазе возрастает сильнее, чем в линейных проводах.

Результаты исследования показывают, что при небольшой разнице эмпирического и теоретического (в опыте 7%) отношений активных сопротивлений фаз «треугольника» к фазам «звезды», ток между обмотками распределяется не равномерно. При номинальном напряжении в режиме холостого хода и короткого замыкания измеренные токи «треугольника» больше, чем их теоретические значения. Из этого следует, что вариант



включение нагревательных элементов теплового реле в фазы «треугольника» (рис. 6б) является наиболее предпочтительным.

### Литература

1. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С., Валтчев С., Грачева Е.И. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т.23. №3. С. 116-126. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.
2. Иванова В.Р., Киселев И.Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 59-70. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.
3. Романова В.В., Хромов С.В., Суслов К.В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. №3. С. 80-89. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89.
4. Хорольский В.Я. Эксплуатация электрооборудования сельскохозяйственных предприятий. Ставрополь, 1996. 58 с.
5. Ермолаев С.А., Масюткин Е.П., Яковлев В.Ф. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве / Под редакцией С. А. Ермолаева. Киев: Инкос, 2005. 670 с.
6. Vansompel H., Sergeant P., Dupre L., et al. A Combined Wye-Delta Connection to Increase the Performance of Axial-Flux PM Machines with Concentrated Windings // IEEE Trans. Energy Convers. 2012. N2. pp. 403-410.
7. Chen JY., Chen CZ. Investigation of a new AC electrical machine winding // IEE Proceedings - Electric Power Applications. 1998. N2. pp. 125-132.
8. Cistelecan MV., Ferreira FJTE., Popescu M. Adjustable Flux Three-Phase AC Machines with Combined Multiple-Step Star-Delta Winding Connections // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2010. N2. pp. 348-355.
9. Gwozdziwicz M., Gawron S. Application of star-delta mixed stator winding in synchronous machine, with permanent magnets on the rotor surface // Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych. 2011. N. 65. pp. 55-63.
10. Kasten H. Wirkungsgradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz einer Wicklung mit Stern-Dreieck-Mischschaltung // Jahresbericht. 2010. pp. 76-82.
11. Мартынов К.В., Носков В.А., Пантелеева Л.А. Совершенствование конструкции обмотки статора асинхронного двигателя // Вестник ВИЭСХ. 2017. №1(26). С. 5-12.
12. Мартынов К.В., Носков В.А. Гармонический анализ магнитодвижущей силы асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой // Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии «Развитие энергосистем АПК: перспективные технологии»; 03–06 апреля 2018 г., Челябинск. Троицк: Южно-Уральский ГАУ, 2018. С. 94-101.
13. Мартынов К.В., Носков В.А. Гармонический анализ магнитодвижущей силы асинхронного двигателя с распределённой совмещённой обмоткой // Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства»; 13–16 февраля 2018 г., Ижевск. Ижевск: Ижевская ГСХА, 2018. С. 151-156.
14. Носков В.А., Пантелеева Л.А., Мартынов К.В. Повышение эффективности обмоток машин переменного тока // Электротехника. 2018. №1. С. 39-43.
15. Мартынов К.В., Носков В.А., Пантелеева Л.А. и др. Перспективы применения совмещённой обмотки для снижения электрических потерь в статоре // АгроЭкоИнфо. 2020. №1(39). С. 18.
16. Мартынов К.В., Носков В.А., Благодатских И.А. Программа перерасчёта обмотки статора машины переменного тока со стандартной 6-зонной на совмещённую 12-зонную. Программа для ЭВМ №2020662822. 28.10.2020, Бюл. № 11.
17. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2010. 350 с.
18. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты. М.: Колос, 1979. 112 с.



### Авторы публикации

**Мартынов Кирилл Владимирович** – старший преподаватель кафедры «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение», Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

**Пантелеева Лариса Анатольевна** – канд.техн.наук., доцент, заведующая кафедрой «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение», Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

**Васильев Даниил Александрович** – старший преподаватель кафедры «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение», Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

**Дресвянникова Елена Владимировна** – канд.техн.наук., доцент, доцент кафедры «Энергетики и электротехнологии», Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

### References

1. Meshcheryakov VN, Sibirtsev DS, Valtchev S, Gracheva EI. Control system for a frequency synchronized asynchronous electric drive *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):116-126. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.
2. Ivanova VR, Kiselev IN. Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):59-70. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.
3. Romanova VV, Khromov SV, Suslov KV. Analysis of influencing factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):80-89. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89.
4. Khorolskiy VYa. *Ekspluatatsiya elektrooborudovaniya selskokhozyaystvennykh predpriyatiy*. Stavropol; 1996.
5. Ermolaev SA, Masyutkin EP, Yakovlev VF, Ermolaev SA, editors. *Ekspluatatsiya energooborudovaniya v selskomk hozyaystve*. Kiev: Inkos; 2005.
6. Vansompel H, Sergeant P, Dupre L, et al. A Combined Wye-Delta Connection to Increase the Performance of Axial-Flux PM Machines with Concentrated Windings. *IEEE Trans. Energy Convers*. 2012;2:403-10.
7. Chen JY, Chen CZ. Investigation of a new AC electrical machine winding. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 1998;2:125-32.
8. Cistelecan MV, Ferreira FJTE, Popescu M. Adjustable Flux Three-Phase AC Machines with Combined Multiple-Step Star-Delta Winding Connections. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2010;2:348-55.
9. Gwozdziwicz M, Gawron S. Application of star-delta mixed stator winding in synchronous machine, with permanent magnets on the rotor surface. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędowi Pomiarow Elektrycznych*. 2011;65:55-63.
10. Kasten H. Wirkungs gradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz einer Wicklung mit Stern-Dreieck-Mischschaltung. *Jahresbercht*. 2010;76-82.
11. Martynov KV, Noskov VA, Panteleeva LA. Sovershenstvovaniye konstruktsii obmotki statora asinkhronnogo dvigatelya. *Vestnik VIESKH*. 2017;1(26):5-12.
12. Martynov KV, Noskov VA. Garmonicheskiy analiz magneto dvizhushchey silya sinkhronnogo dvigatelya s sovmeshchonnoy obmotkoy. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Instituta agroinzhenerii «Razvitiye energosistem APK: perspektivnyy etekhnologii»; 03–06 Apr 2018; Chelyabinsk, Russia*. Troitsk: Yuzhno-Uralskiy GAU, 2018. pp. 94-101.
13. Martynov KV, Noskov VA. Garmonicheskiy analiz magnitodvizhushchey sily asinkhronnogo dvigatelya s raspredelonnou sovmeshchonnoy obmotkoy. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnyy etekhnologii dlya realizatsii programmy nauchno-tehnicheskogo razvitiya selskogo khozyaystva»; 13–16 Feb 2018, Izhevsk, Russia*. Izhevskaya GSKHA, 2018. pp. 151-156.
14. Noskov VA, Panteleeva LA, Martynov KV. Improving the Efficiency of Alternating-Current Machine Windings. *Russian Electrical Engineering*. 2018;89(1):32-35. – doi:10.3103/S106837121801011X.
15. Martynov KV, Noskov VA, Panteleeva LA. et al. Perspektivy primeneniya sovmeshchonnoy obmotki dlya snizheniya elektricheskikh poter v statore. *AgroEcoInfo*. 2020;1(39).

16. Martynov KV, Noskov VA, Blagodatskikh IA. *Programma pereraschota obmotki statora mashiny peremennogo toka so standartnoy 6-zonnoy na sovmeshchonnuyu 12-zonnuyu*. Computer program №2020662822. 28.10.2020, Byul. № 11.

17. Voldek AI, Popov VV. *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka*. Saint Petersburg: Piter; 2010.

18. Musin AM. *Avariynnye rezhimy asinkhronnykh elektrodvigately i sposoby ikh zashchity*. Moscow: Kolos; 1979.

#### **Authors of the publication**

**Kirill V. Martynov** – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia. E-mail: nebelll@bk.ru

**Larisa A. Panteleeva** – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

**Daniil A. Vasiliev** – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

**Elena V. Dresvyannikova** – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

**Получено**

**18.10.2021г.**

**Отредактировано**

**26.10.2021г.**

**Принято**

**26.10.2021г.**