



ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С СОВМЕЩЁННОЙ ОБМОТКОЙ

Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Благодатских И.А.

Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, г. Ижевск, Россия
nebelll@bk.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Асинхронные электродвигатели являются основными потребителями электрической энергии. Повышение их энергетических характеристик может способствовать значительному снижению электропотребления в целом. Использование в асинхронном двигателе совмещённой 12-зонной обмотки, вместо стандартной 6-зонной, теоретически может привести к снижению электрических потерь в обмотке статора, а также к снижению добавочных потерь, вызванных высшими пространственными гармониками. Основной целью работы является оценка влияния применения совмещённой обмотки статора на энергетические характеристики асинхронного двигателя. МЕТОДЫ. Исследование проводилось на двух электродвигателях АИР71В4, в одном из которых была уложена стандартная обмотка, а в другом совмещённая. В опыте к двигателям подводилось номинальное напряжение, а нагрузка осуществлялась с помощью электромагнитного нагрузочного устройства. Двигатели испытывались в диапазоне нагрузок от холостого хода до номинальной. Проводимый опыт имел пятикратную повторяемость. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе приводятся зависимости силы тока, потребляемой активной и реактивной мощности, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности от нагрузки двигателя. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования показали, что асинхронный двигатель с совмещённой обмоткой на всём исследуемом интервале нагрузок имеет меньшее потребление как активной, так и реактивной мощности, по сравнению с двигателем со стандартной обмоткой, при этом коэффициенты мощности данных двигателей практически не отличаются. Наибольшая разница в коэффициентах полезного действия наблюдалась при нагрузках ниже номинальной в пользу усовершенствованной модели двигателя, но и при номинальной нагрузке двигатель с совмещённой обмоткой обладает большим КПД на 3,1%.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель; совмещённая обмотка; энергетические характеристики; энергоэффективность.

Для цитирования: Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Благодатских И.А. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 109-118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-109-118.

ESTIMATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A COMBINED WINDING

KV Martynov, LA Panteleeva, IA Blagodatskih

Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia
nebelll@bk.ru,

Absrtact: PURPOSE. Asynchronous motors are the main consumers of the electrical energy. Increasing their energy performance can contribute to a significant reduction in energy consumption in general. Using a combined 12-zone winding instead of the standard 6-zone one theoretically can lead to a decrease in electrical losses in the stator winding of the asynchronous motor and to reduce additional losses caused by the higher spatial harmonics. The main purpose of the work is to assess the effect of using a combined winding stator on the energy characteristics of the induction motor. METHODS. The study was performed on two AIR71V4 electric motors, one of which had a standard winding and the other had a combined winding. In the experiment, the engines were rated voltage, and the load was carried out using an electromagnetic loading

device. The engines were tested in the range of loads from idle to the nominal. The experiment was performed five times. **RESULTS.** The work under analysis shows the dependences of the current strength, consumed active and reactive power, efficiency, and power factor from engine load. **CONCLUSION.** The results of the study showed that an asynchronous motor with the combined winding over the entire investigated range of loads has a lower consumption of both active and reactive power, compared to a motor with a standard winding, while the power factors of these motors are practically the same. The greatest difference in efficiency was observed at loads lower than the nominal in favor of an improved engine model, but also at rated load, the motor with a combined winding has the higher efficiency of 3,1%.

Keywords: asynchronous electric motor; combined winding; energy characteristics; energy efficiency.

For citation: Martynov KV, Panteleeva LA, Blagodatskih IA. Estimation of energy characteristics of the asynchronous motor with a combined winding. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(6):109-118. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-109-118.

Введение

Ежегодное наращивание производственных мощностей сопровождается увеличением потребления электроэнергии, а учитывая повсеместный рост тарифов на электроэнергию и повышение стоимости электрооборудования вопрос энергосбережения, является весьма актуальным [1].

Основными потребителями электрической энергии в промышленности и сельском хозяйстве являются асинхронные электродвигатели, на их долю приходится около 70-75% от всего энергопотребления [2, 3]. Повышение энергетических характеристик данных двигателей способно привести к значительному снижению затрат электрической энергии в целом по энергосистеме.

Асинхронные электродвигатели обладают высокой надёжностью, однако на её показатели влияют множество факторов, которые могут приводить к возрастанию вероятности отказа [4], из-за чего двигатели выводятся в капитальный ремонт с дальнейшей заменой обмотки. При этом после капитального ремонта может происходить снижение энергетических характеристик электродвигателей [5]. Вследствие этого целесообразно применять способы и методы, способствующие улучшению энергетических характеристик асинхронных двигателей, которые возможно осуществить не только при их изготовлении, но и при их ремонте.

Одним из таких возможных направлений повышения КПД и коэффициента мощности электродвигателя является использование в нём совмещённой 12-зонной обмотки статора, взамен стандартной 6-зонной. Совмещённая обмотка состоит из двух трёхфазных обмоток, в одной из которых фазы соединены по схеме «звезда», а в другой по схеме «треугольник». Между собой они могут подключаться либо параллельно, либо последовательно (рис. 1).

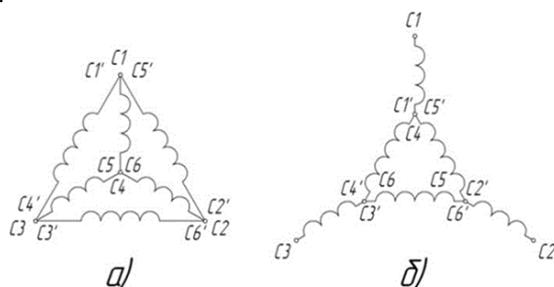


Рис. 1. Схемы соединения частей совмещённых обмоток: а) параллельное соединение; б) последовательное соединение

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].

Известно, что высшие гармоники оказывают негативное влияние на работу двигателя: вызывают шум и вибрации, создают добавочные (тормозящие) моменты, дифференциальное рассеяние и добавочные потери. Добавочные потери по различным данным могут составлять от 0,4 до 6% от потребляемой машиной мощности [16, 17]. По этой причине снижение содержания высших гармоник в МДС обмотки может способствовать повышению энергетических характеристик двигателя.

Электрические потери в обмотке статора зависят от нагрузки двигателя и при номинальных условиях могут вносить наибольший вклад в сумму всех потерь. Так, например, для двигателя АИР71В4 их доля составляет около 55% [18].

Исходя из результатов предыдущих исследований [11-15], можно предположить, что применение в асинхронном двигателе совмещённой обмотки, вместо стандартной, позволит снизить электрические потери в статоре, а также добавочные потери, вызванные высшими гармониками.

Цель исследования – оценить влияние применения совмещённой обмотки в асинхронном электродвигателе на его энергетические характеристики.

Материалы и методы

Исследования проводились на двух асинхронных двигателях АИР71В4 с номинальной мощностью 0,75 кВт, в одном из которых была уложена стандартная 6-зонная равносекционная обмотка, а во втором совмещённая 12-зонная обмотка (рис. 2). Перемотка двигателей проводилась на ЗАО «Удмуртский электроремонтный завод».

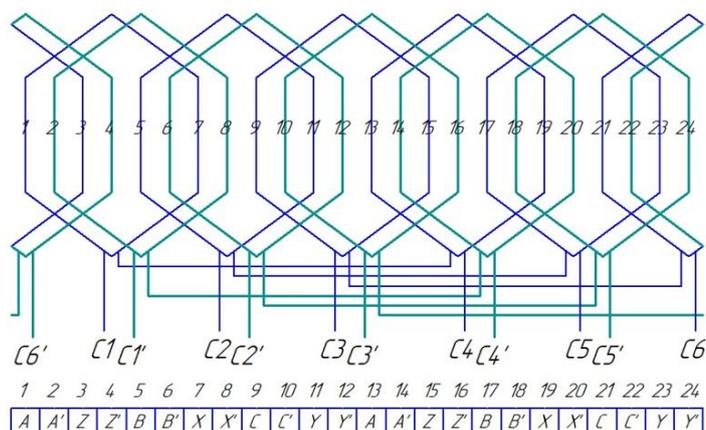


Рис. 2. Схема однослойной совмещённой 12-зонной обмотки экспериментального электродвигателя

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, полученные с помощью программы [19].

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 проводников в витке $n_{эл}$	1	1
Число параллельных ветвей a	1	1

Так как напряжение в сети может отличаться от своего номинального значения в течение дня, то для минимизации влияния этого фактора в исследованиях напряжение к двигателям подводилось от фазорегулятора, который выполнял функцию индукционного регулятора. Измерения значений силы тока I_l в линии, потребляемой активной мощности P_l

и величины питающего фазного напряжения U проводились с помощью комплекта измерительного К505. Электрическая схема лабораторной установки (рис. 3).

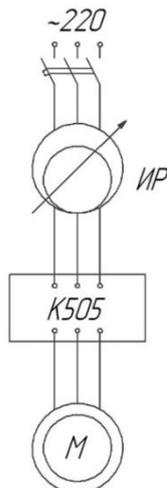


Рис. 3. Электрическая схема экспериментальной установки Fig. 3. Electrical diagram of the experimental installation

Для создания тормозящего момента существуют различные варианты нагрузочных устройств. В исследование использовалось электромагнитное нагрузочное устройство, эскиз которого изображён на рисунке 4.

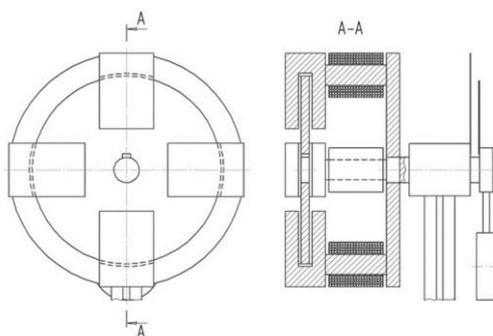


Рис. 4. Эскиз электромагнитного нагрузочного устройства Fig. 4. Sketch of the electromagnetic loading device

Нагрузка данным устройством регулируется посредством изменения силы тока в его катушках, в результате этого изменяется величина магнитного потока и электромагнитная сила, действующая на диск устройства. При этом такая же сила начинает действовать на индуктор и отклонять его на некоторый угол, зависящий от массы противовеса и момента на валу. По углу отклонения определялся момент нагрузки M на валу двигателя:

$$M = m_z \cdot l \cdot g \cdot \sin \theta ,$$

где $m_z=5$ кг – масса груза противовеса;

$l=0,11$ м – длина плеча груза;

$g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения;

θ – угол отклонения противовеса нагрузочного устройства от положения равновесия.

Для определения частоты вращения двигателей использовался стрелочный тахометр часового типа ТЧ 10-Р.

Испытания проводились при следующих углах отклонения груза нагрузочного устройства: 0°; 10°; 20°; 25°; 30°; 35°; 40°; 45°; 55°; 75°, что соответствует моментам на валу двигателей: 0; 0,94; 1,84; 2,28; 2,70; 3,09; 3,46; 3,81; 4,42; 5,21 Н·м. Эксперимент имел пятикратную повторность. За показания токов, потребляемой активной мощности и частоты вращения принималось среднее арифметическое значение всех замеров:

$$X = \frac{\sum_{k=1}^5 X_k}{5} ,$$

где X_k – среднее значение измеряемой величины силы тока I_k , А, активной мощности P_{Ik} , Вт или частоты вращения n_k , об/мин в k -ом замере;

k – количество замеров.

В свою очередь значение каждого замера силы тока определялось, как среднее арифметическое трёх фаз:

$$I_k = \frac{I_{Ak} + I_{Bk} + I_{Ck}}{3},$$

где I_{Ak} , I_{Bk} , I_{Ck} – значения силы тока в фазе А, В и С при k -ом замере, А.

Значение потребляемой активной мощности вычислялось, как сумма мощностей по трём фазам:

$$P_{Ik} = P_{Ak} + P_{Bk} + P_{Ck},$$

где P_{Ak} , P_{Bk} , P_{Ck} – значения потребляемой активной мощности в фазе А, В и С при k -ом замере, Вт.

Значение напряжений в каждой фазе и каждом замере оставались постоянными. Угол отклонения противовеса нагрузочного устройства подбирался во всех замерах одинаковым. Полученные результаты экспериментов заносились в таблицу программы *Microsoft Excel*, где и проводилась их дальнейшая обработка.

Перед проведением испытаний под нагрузкой двигатель обкатывался на холостом ходу в течение 10 минут.

Результаты и обсуждения

В таблице 2 приведены среднеарифметические значения линейного тока, суммарной потребляемой активной мощности, момента на валу двигателя, частоты вращения и механической мощности, которые были получены в результате исследования двигателей со стандартной и совмещённой обмотками. Для краткости оформления в таблице 2 данные, относящиеся к стандартной обмотке, будем обозначать Y , а к совмещённой $Y\Delta$.

Таблица 2

Результаты измерений в опыте под нагрузкой

№	Электрические величины				Механические величины					
	Сила тока I_l , А		Потребляемая активная мощность P_l , Вт		Момент на валу двигателя M , Нм		Частота вращения ротора n , об/мин		Мощность на валу двигателя P_2 , Вт	
	Y	$Y\Delta$	Y	$Y\Delta$	Y	$Y\Delta$	Y	$Y\Delta$	Y	$Y\Delta$
1	1,63	1,53	169,2	145,0	0,00	0,00	1499	1499	0,0	0,0
2	1,60	1,47	313,3	285,0	0,94	0,94	1480	1482	145,0	145,2
3	1,63	1,51	450,0	421,7	1,84	1,84	1460	1463	281,8	282,5
4	1,67	1,55	525,0	488,3	2,28	2,28	1450	1454	345,9	346,7
5	1,71	1,59	595,0	561,7	2,70	2,70	1440	1444	406,4	407,4
6	1,75	1,66	656,7	630,0	3,09	3,09	1430	1435	462,9	464,5
7	1,80	1,72	725,0	695,0	3,46	3,46	1420	1425	515,2	517,0
8	1,87	1,79	788,3	760,0	3,81	3,81	1411	1415	563,1	564,7
9	2,00	1,93	913,3	880,0	4,42	4,42	1393	1397	643,9	646,0
10	2,21	2,13	1071,7	1030,0	5,21	5,21	1366	1371	744,5	747,4

Как видно из таблицы 2 в асинхронном двигателе с совмещённой обмоткой протекает меньший ток не только на холостом ходу, но также и при нагрузке. При нагрузке близкой к номинальной процентная разница токов составляет 3,77%. На рисунке 5 изображена зависимость тока обмотки статора от мощности на валу двигателя.

На рисунке 5 можем наблюдать, что у обоих двигателей происходит снижение тока статора при небольшой нагрузке, по сравнению с холостым ходом. Ток статора зависит от потребляемой двигателем полной мощности:

$$S = 3 \cdot U \cdot I = \sqrt{P_1^2 + Q^2}$$

где Q – реактивная мощность, потребляемая двигателем, вар.

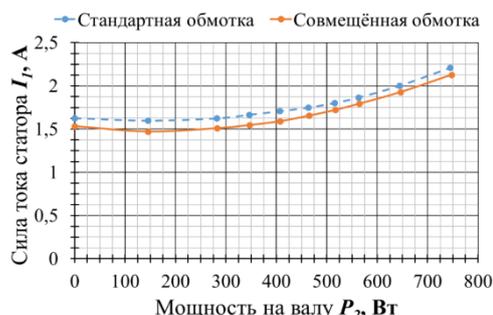


Рис. 5. Зависимость тока статора от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

Разобьём полную мощность на активную и реактивную составляющие. Результаты анализа представлены в таблице 3 и на рисунке 6.

Таблица 3

Потребляемые мощности двигателей в испытании под нагрузкой

№	Полная мощность S, VA		Активная мощность P ₁ , Вт		Реактивная мощность Q, вар		Процентная разница, %		
	Y	YΔ	Y	YΔ	Y	YΔ	ΔS	ΔP	ΔQ
1	1074,3	1012,9	169,2	145,0	1060,9	1002,5	5,72	14,29	5,51
2	1055,1	971,7	313,3	285,0	1007,5	928,9	7,91	9,04	7,80
3	1072,5	997,3	450,0	421,7	973,5	903,8	7,01	6,30	7,16
4	1100,0	1021,2	525,0	488,3	966,6	896,8	7,17	6,98	7,22
5	1127,5	1050,5	595,0	561,7	957,7	887,7	6,83	5,60	7,31
6	1155,0	1092,7	656,7	630,0	950,2	892,8	5,40	4,06	6,04
7	1189,8	1136,7	725,0	695,0	943,4	899,4	4,47	4,14	4,66
8	1232,0	1184,3	788,3	760,0	946,7	908,3	3,87	3,59	4,06
9	1321,8	1272,3	913,3	880,0	955,5	918,9	3,74	3,65	3,83
10	1459,3	1404,3	1071,7	1030,0	990,5	954,6	3,77	3,89	3,63

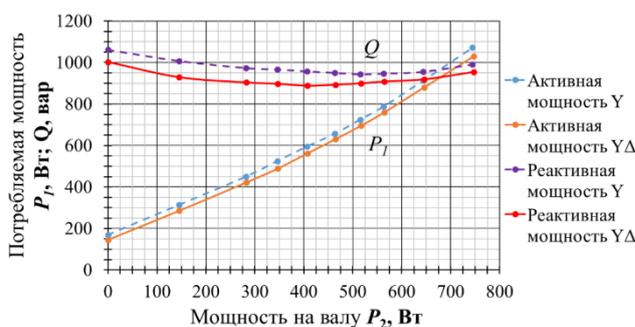


Рис. 6. Зависимость потребляемых активной и реактивной мощностей от нагрузки на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной

На рисунке 6 видно, что у обоих двигателей, по сравнению с холостым ходом, при низких нагрузках уменьшается потребление реактивной мощности, чем и объясняется уменьшения силы тока. Такое явление можно наблюдать в машинах малой мощности и, по всей видимости, причиной тому может являться уменьшение насыщения магнитопровода двигателя, вследствие небольшого снижения магнитной индукции. Однако с дальнейшим ростом нагрузки происходит увеличение магнитных потоков рассеяния, и потребляемая реактивная мощность вновь возрастает.

Оценим показатели энергоэффективности исследуемых асинхронных двигателей. К показателям энергоэффективности двигателей относят КПД и коэффициент мощности (отношение потребляемой активной мощности к полной). В исследовании к фазам

двигателей подводилось практически синусоидальной формы симметричное напряжение, в связи с этим коэффициент мощности K_m будет равен $\cos\varphi$. Результаты расчёта показателей энергоэффективности приведены в таблице 4, на рисунках 7 и 8.

Таблица 4

Показатели энергоэффективности двигателей в испытании под нагрузкой

№	КПД η , %		Коэффициент мощности K_m		Разность КПД $\Delta\eta$
	Y	Y Δ	Y	Y Δ	
1	0,0	0,0	0,157	0,143	0,0
2	46,3	51,0	0,297	0,293	4,7
3	62,6	67,0	0,420	0,423	4,4
4	65,9	71,0	0,477	0,478	5,1
5	68,3	72,5	0,528	0,535	4,2
6	70,5	73,7	0,569	0,577	3,2
7	71,1	74,4	0,609	0,611	3,3
8	71,4	74,3	0,640	0,642	2,9
9	70,5	73,4	0,691	0,692	2,9
10	69,5	72,6	0,734	0,733	3,1

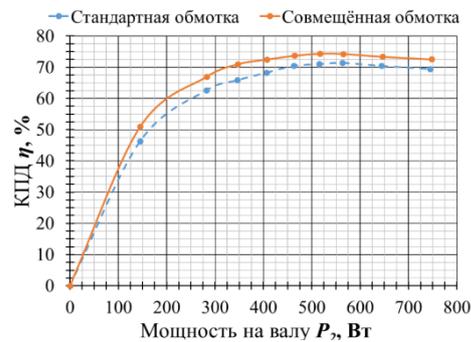


Рис. 7. Зависимость КПД от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной обмоткой. Fig. 7. Dependence of efficiency on shaft power: solid line - motor with a combined winding; dotted line – one with a standard winding

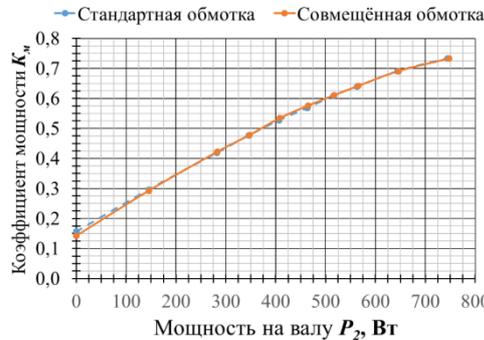


Рис. 8. Зависимость коэффициента мощности от мощности на валу: сплошной линией – двигатель с совмещённой обмоткой; пунктирной линией – со стандартной обмоткой. Fig. 8. Dependence of power factor on shaft power: solid line - motor with a combined winding; dotted line – one with standard winding

По полученным графикам можно сказать, что асинхронный двигатель с совмещённой обмоткой обладает большим КПД, чем двигатель со стандартной обмоткой на всём диапазоне рассматриваемых мощностей. Коэффициент мощности же у двух двигателей практически не отличается, при этом двигатель с совмещённой обмоткой потребляет меньше реактивной энергии, а отсутствие разницы в коэффициентах мощности объясняется снижением потерь.

Выводы

Результаты исследования показывают, что экспериментальная модель асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой обладает меньшими потерями мощности и меньшим потреблением реактивной энергии, чем аналогичный ему двигатель со стандартной обмоткой. При этом их коэффициенты мощности практически не отличаются.

КПД двигателя с совмещённой обмоткой выше, чем у двигателя со стандартной, притом наибольшая разность проявляется при его работе в недогруженном состоянии. Так при нагрузке двигателя в 46% от номинальной разность КПД составляет 5,1%, при номинальной же мощности выигрыш по КПД экспериментальной модели двигателя равняется 3,1%.

Литература

1. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В., Валтчев С. Алгоритмы оценки эквивалентных сопротивлений внутризаводских электрических сетей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-3-13.
2. 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.
3. 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
4. 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
5. Мугалимов Р.Г., Баранкова И.И., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Михайлова У.В., Никифоров Г.В. Техничко-экономическое обоснование целесообразности капитального ремонта асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. №2. С. 101-109
6. Vansompel H., Sergeant P., DupreL., 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. Cistelean 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, Napędowi Pomiarow Elektrycznych. 2011. N65. pp. 55-63.
10. Kasten H. Wirkungs gradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz einer Wicklung mit Stern-Dreieck-Mischschaltung // Jahresbercht. 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. Бойко Е.П., Ганицев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др. Асинхронные двигатели общего назначения / Под редакцией В. М. Петрова, А. Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980. 488 с.

17. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Перевод с англ. под редакцией З. Г. Каганова. М.: Энергия, 1981. 352 с.

18. Ванурин В.Н. Старторные обмотки асинхронных машин. СПб.: Лань, 2014. 176 с.

19. 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.

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.

Благодатских Иван Александрович – учебный мастер кафедры «Электротехника, электрооборудование и электроснабжение», Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

References

1. Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM, Tabachnikova TV, Valtchev S. Algorithms for estimating equivalent resistances of in-plant electrical networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(4):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-3-13.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Mugalimov RG, Barankova II, Zakirova RA, Mugalimova AR, Mikhaylova UV, Nikiforov GV. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye tselesoobraznosti kapital'nogo remonta asinkhronnykh dvigateley s povysheniye ikh energoeffektivnosti. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2017; 2:101-9.

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. Gwozdziejewicz 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 konstruktssii obmotki statora asinkhronnogo dvigatelya. *Vestnik VIESKH*. 2017;1(26):5-12.

12. Martynov KV., Noskov VA. Garmonicheskii analiz magneto dvizhushchey silya sinkhronnogo dvigatelya s sovmeshchonnoy obmotkoy. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Instituta agroinzhenarii «Razvitiye energosistem APK: perspektivnyy etekhnologii»; 03–06 Apr 2018; Chelyabinsk, Russia*. Troitsk: Yuzhno-Uralskiy GAU, 2018. pp. 94-101.

13. Martynov KV., Noskov VA. Garmonicheskii analiz magnitodvizhushchey sily asinkhronnogo dvigatelya s raspredelonnoy sovmeshchonnoy obmotkoy. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnyy etekhnologii dlya realizatsii programmy nauchno-tekhnicheskogo razvitiya selskogo khozyaystva»; 13–16 Feb 2018, Izhevsk, Russia*. Izhevsk: 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. Boyko YeP, Ganitsev YuV, Kovalev YuM etc.; Petrov VM, Kravchik AE., editors. *Asinkhronnyye dvigateli obshchego naznacheniya*. Moscow: Energiya; 1980. (In Russ).

17. Heller B, Hamata V. *Harmonic field effects in induction machines*. Prague: Academy of Sciences; 1977.

18. Vanurin VN. *Statornyye obmotki asinkhronnykh mashin*. Saint Petersburg: Lan'. 2014.

19. 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.

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.

Ivan A. Blagodatskikh – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Получено **16.11.2021 г.**

Отредактировано **22.11.2021 г.**

Принято **26.11.2021 г.**