



Qutblari 8/4 nisbatli qutblar soni o'zgaruvchan chulg'amni ishlab chiqish va elektr magnit tahlil qilish

Dauletbek A. Rismuxamedov¹, Husniddin F. Shamsutdinov²

¹ t.f.n., prof., Olmaliq davlat texnika instituti, Olmaliq, 110104, O'zbekiston; shamsutdinovh83@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9458-0522>

² PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; shamsutdinovh83@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1075-1927>

Dolzarbli: ikki tezlikli asinxron motorlarni takomillashtirish texnologik jarayoni ikkita belgilangan aylanish tezligida ishlashni talab etadigan mexanizmlarning elektr yuritmalari uchun dolzarb vazifa hisoblanadi. Alohida stator chulg'amlaridan foydalanish paz bo'shlig'idan foydalanish imkoniyatlarini cheklaydi hamda chulg'am va izolyatsiya materiallari sarfini oshiradi. Shu bilan birga, bir chulg'amli konstruksiyalarda har ikkala qutblar sonida havo oralig'idagi magnit induksiya qiymatlarining o'zaro muvofiqligini, fazalar simmetriyasini va magnit yurituvchi kuchning maqbul garmonik tarkibini ta'minlash zarur. Bu esa motorning har ikkala tezlik rejimida uning aktiv qismidan samarali foydalanishni ta'minlaydigan, qutblari soni o'zgaruvchan chulg'amlarni ishlab chiqish zaruratini belgilaydi.

Maqsad: stator pazlar soni 48 ga teng, qutblar nisbati 8/4 bo'lgan, har ikkala qutbning havo oralig'idagi magnit induksiya qiymatlarining o'zaro muvofiqligini va fazalar simmetriyasini ta'minlaydigan uch fazali, qutblar soni o'zgaruvchan chulg'amni ishlab chiqish, hisob-kitob asosida asoslash hamda uni ikki tezlikli asinxron motorning tajriba namunasida amalga oshirish.

Usullar: qutblari soni o'zgaruvchan chulg'amlarning mavjud sxemalari tahlili hamda turli qutblar soniga ega chulg'amlardagi tok taqsimotlarini birgalikda ko'rib chiqishga asoslangan diskret berilgan fazoviy funksiyalar usulidan foydalanilgan. «Y-Δ/Y» bazaviy sxemasi asosida qutblar soni o'zgaruvchan chulg'am g'altaklarning bir qismini qo'shimcha shoxobchalarga ajratish orqali shakllantirilgan.

Natijalar: stator pazlar soni 48 ga teng, qutblar nisbati 8/4 bo'lgan uch fazali, qutblar soni o'zgaruvchan chulg'am sxemasi ishlab chiqilgan. Har ikkala qutblar sonida fazalar simmetriyasi ta'minlangan. Chulg'am koeffitsiyentlari to'rt qutbli rejimda 0,691 va sakkiz qutbli rejimda 0,876 ni, differensial sochilish koeffitsiyentlari esa mos ravishda 2,0 va 1,4 % ni tashkil etgan. Magnit yurituvchi kuchning fazoviy taqsimotlari sinusoidal shaklga yaqin bo'lib, garmonik tahlil natijalariga ko'ra, juft garmonikalar mavjud emasligi aniqlangan. Havo oralig'idagi magnit induksiya nisbati B₈₈/B₈₄=1,15 ni tashkil etgan. Hisoblash natijalari asosida «Energy Motors» xususiy korxonasida seriyali 4A200L4Y3 elektr mashinasining magnit o'tkazgichi negizida stator pazlar soni 48 ta, rotori 38 ta pazga ega, stator paketi uzunligi 215 mm bo'lgan ikki tezlikli motorning tajriba namunasi tayyorlangan. Tajriba namunasining tayyorlanishi taklif etilgan yechimni konstruktiv jihatdan amalga oshirish mumkinligini tasdiqlagan.

Kalit so'zlar: ikki tezlikli asinxron motor, qutblar soni o'zgaruvchan chulg'am, diskret berilgan fazoviy funksiyalar usuli, bazaviy sxema, magnit yurituvchi kuch, garmonik tahlil, chulg'am koeffitsiyenti, differensial sochilish.

For citation: Rismuxamedov D.A., Shamsutdinov H.F. Design and electromagnetic analysis of an 8/4-pole pole-changing winding. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3 (1), pp. 36-44.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23464456>

Received: 19.03.2026

Revised: 12.04.2026

Accepted: 24.05.2026

Published: 19.10.2026

Copyright: © Dauletbek A. Rismuxamedov, Husniddin F. Shamsutdinov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Разработка и электромагнитный анализ полюсопереключаемой обмотки на 8/4 полюса обмоток

Даулетбек А. Рисмухамедов¹, Хусниддин Ф. Шамсутдинов²

¹ к.т.н., проф., Алмалыкский государственный технический институт, Алмалык, 110104, Узбекистан; shamsutdinovh83@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9458-0522>

² PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; shamsutdinovh83@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1075-1927>

Актуальность: совершенствование двухскоростных асинхронных двигателей является актуальной задачей для электроприводов механизмов, технологический процесс которых предусматривает работу при двух фиксированных скоростях вращения. Применение отдельных обмоток статора ограничивает использование пазового пространства и увеличивает расход обмоточных и изоляционных материалов. Вместе с тем в однообмоточных конструкциях необходимо обеспечить согласование магнитных индукций в воздушном зазоре, симметрию фаз и приемлемый гармонический состав МДС при обеих полюсностях. Это обуславливает необходимость разработки полюсопереключаемых обмоток, обеспечивающих эффективное использование активной части двигателя в обоих скоростных режимах.

Цель: разработка и расчётное обоснование трёхфазной полюсопереключаемой обмотки с соотношением чисел полюсов 8/4 при 48 пазах статора, обеспечивающей согласование магнитных индукций в воздушном зазоре и симметрию фаз при обеих полюсностях, с последующей реализацией в экспериментальном образце двухскоростного асинхронного двигателя.

Методы: использованы анализ существующих схем полюсопереключаемых обмоток и метод дискретно-заданных пространственных функций, основанный на совместном рассмотрении токораспределений обмоток различной полюсности. Построение ППО выполнено на основе базовой схемы «Y-Δ/YY» с выделением части катушек в дополнительные ветви.

Результаты: разработана схема трёхфазной ППО с соотношением чисел полюсов 8/4 при 48 пазах статора. Обеспечена симметрия фаз при обеих полюсностях. Обмоточные коэффициенты составили 0,691 в четырёхполюсном режиме и 0,876 в восьмиполюсном режиме, коэффициенты дифференциального рассеяния - 2,0 и 1,4 % соответственно. Пространственные распределения МДС близки к синусоидальным; по результатам гармонического анализа чётные гармоники отсутствуют. Отношение магнитных индукций в воздушном зазоре $B_{\delta 8}/B_{\delta 4}$ составило 1,15. По расчётным данным на ЧП «Energy Motors» изготовлен экспериментальный образец двухскоростного двигателя на базе магнитопровода серийной машины 4A200L4Y3 с 48 пазами статора, 38 пазами ротора и длиной пакета статора 215 мм. Изготовление образца подтвердило конструктивную реализуемость предложенного решения.

Ключевые слова: двухскоростной асинхронный двигатель, полюсопереключаемая обмотка, метод дискретно-заданных пространственных функций, базовая схема, магнитодвижущая сила, гармонический анализ, обмоточный коэффициент, дифференциальное рассеяние.

Design and electromagnetic analysis of an 8/4-pole pole-changing winding

Dauletbek A. Rismuxamedov¹, Husniddin F. Shamsutdinov²

¹ c.t.s., prof., Almalik State Technical Institute, Almalik, 100095, Uzbekistan; shamsutdinovh83@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-9458-0522>

² PhD., assoc.prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; shamsutdinovh83@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1075-1927>

Relevance: improving two-speed induction motors is an important task for electric drives used in machinery whose operating processes require two fixed rotational speeds. Separate stator windings limit slot-space utilization and increase the consumption of winding and insulation materials. Single-winding designs, however, must ensure coordinated air-gap flux densities, phase symmetry, and an acceptable magnetomotive force (MMF) harmonic spectrum at both pole numbers. These requirements necessitate the development of pole-changing windings that enable effective utilization of the motor's active materials in both speed modes.

Aim: to develop and computationally substantiate a three-phase pole-changing winding with an 8/4 pole ratio in 48 stator slots, ensuring coordinated air-gap flux densities and phase symmetry at both pole numbers, followed by implementation in an experimental two-speed induction motor.

Methods: existing pole-changing winding configurations were analysed using the method of discretely specified spatial functions, based on the joint consideration of current distributions in windings with different pole numbers. The pole-changing winding was constructed using the basic Y-Δ/YY circuit, with selected coils assigned to additional branches.

Results: a three-phase pole-changing winding configuration with an 8/4 pole ratio in 48 stator slots was developed. Phase symmetry was achieved at both pole numbers. The winding factors were 0.691 in the four-pole mode and 0.876 in the eight-pole mode, while the corresponding differential leakage coefficients were 2.0% and 1.4%, respectively. The spatial magnetomotive force (MMF) distributions were approximately sinusoidal; harmonic analysis indicated the absence of even harmonics. The air-gap flux density ratio $B_{\delta 8}/B_{\delta 4}$ was 1.15. Based on the calculated design parameters, an experimental two-speed motor was manufactured at the private enterprise Energy Motors using the magnetic core of a standard 4A200L4Y3 motor, with 48 stator slots, 38 rotor slots, and a stator stack length of 215 mm. Prototype fabrication confirmed the feasibility of implementing the proposed design.

Keywords: two-speed induction motor, pole-changing winding, method of discretely specified spatial functions, basic winding circuit, magnetomotive force, harmonic analysis, winding factor, differential leakage.

1. Введение (Introduction)

В настоящее время наряду с частотно-регулируемыми электроприводами применяются электроприводы с двухскоростными двигателями (ДД), обеспечивающими ступенчатое изменение частоты вращения. К их преимуществам относятся относительно низкая стоимость, отсутствие необходимости в частотном преобразователе, простота управления и эксплуатации. В механизмах, не требующих плавного регулирования частоты вращения, применение ДД позволяет снизить потребление электроэнергии за счёт выбора скорости, соответствующей технологическому режиму работы [1]. Двухскоростные двигатели с соотношениями чисел полюсов 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 и 1:6 применяются в подъёмно-транспортных механизмах (тельферах, лифтовых установках), металлообрабатывающих станках (токарных, фрезерных, шлифовальных), а также в сельскохозяйственном оборудовании (транспортёрах, шнеках, дробилках и сушильных агрегатах типа АВМ). Для многих из перечисленных механизмов характерны напряжённые режимы эксплуатации с частыми пусками, число которых может достигать 200 в час.



Двухскоростные двигатели с соотношениями чисел полюсов 2:3, 3:4, 4:5, 5:6 и другими близкими соотношениями могут применяться в механизмах с вентиляторной характеристикой нагрузки, включая центробежные насосы, вентиляторы и центробежные компрессоры. Кроме того, такие двигатели могут использоваться в оборудовании горнодобывающей и перерабатывающей промышленности - конвейерах, питателях, дробилках и мельницах, а также в сельскохозяйственных машинах - сепараторах, барабанных мельницах и просеивающих установках.

Выбор соотношения чисел полюсов ДД определяется требуемыми рабочими скоростями и особенностями технологического процесса. Режим эксплуатации приводимого оборудования формируется под воздействием совокупности факторов, включая климатические и погодные условия, технологические требования и организацию производственного процесса. Изменение нагрузки и последовательность рабочих операций во времени описываются графиками работы оборудования или циклограммами отдельных технологических процессов [2].

Двухскоростные асинхронные двигатели также могут применяться для реализации ступенчатого пуска в тяжёлых условиях эксплуатации. При этом первоначальный разгон осуществляется в режиме большей полюсности, которому соответствует меньшая синхронная частота вращения, с последующим переключением на меньшую полюсность и переходом к более высокой скорости. Эффективность такого пуска определяется соотношением электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления механизма, приведённым моментом инерции электропривода, а также условиями переключения обмотки [3].

В существующих конструкциях двухскоростных асинхронных двигателей используются, в частности, две отдельные обмотки статора, каждая из которых предназначена для работы при соответствующем числе полюсов. По сравнению с однообмоточным исполнением такое решение усложняет размещение обмоток в пазах и увеличивает трудоёмкость изготовления. Поскольку в каждом скоростном режиме задействована только одна из обмоток, возможности использования пазового пространства ограничиваются, что может приводить к увеличению расхода активных материалов и ухудшению энергетических показателей двигателя. Это обуславливает целесообразность разработки двухскоростных двигателей с одной полюсопереключаемой обмоткой, используемой в обоих скоростных режимах.

Применение в ДД одной полюсопереключаемой обмотки (ППО) с группами выводов, соответствующими каждой полюсности, позволяет более эффективно использовать активную часть электрической машины, сократить расход обмоточной меди и изоляционных материалов, а также улучшить энергетические показатели двигателя. Такое конструктивное решение создаёт предпосылки для приближения двухскоростных двигателей по массогабаритным показателям к серийным односкоростным асинхронным двигателям [4].

Одна из первых схем ППО была разработана Даландером и Линдстремом в 1897 г. Её принцип действия основан на изменении направления тока в половине катушечных групп каждой фазы, обеспечивающем переключение числа полюсов в отношении 1:2 [5]. Обмотка, известная как обмотка Даландера, получила широкое практическое распространение благодаря простоте переключения и небольшому числу выводов. Вместе с тем для рассматриваемого варианта соединения обмотки соотношение магнитных индукций в воздушном зазоре при двух полюсностях составляет $B_2/B_1 = 1,41$. Такое различие затрудняет согласование электромагнитных нагрузок в обоих скоростных режимах и ограничивает использование активной части машины при одной из полюсностей.

Одним из наиболее известных методов построения ППО является метод полюсоамплитудной модуляции (ПАМ), разработанный Г. Роуклиффом и В. Фонгом в 1958 г. [6]. Метод основан на модуляции пространственного распределения магнитодвижущей силы (МДС) обмотки, в результате которой формируются пространственные гармоники с различными числами полюсов. Выбор закона модуляции и схемы соединения катушечных групп позволяет выделить требуемые гармонические составляющие и подавить нежелательные, обеспечивая формирование необходимых полюсностей с последующим симметрированием фаз обмотки.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Профессором Ташкентского государственного технического университета Х. Г. Каримовым предложен метод дискретно-заданных пространственных функций (ДЗПФ) для построения ППО. Метод основан на совместном рассмотрении токораспределений двух или более обычных обмоток, представленных в виде дискретно-заданных пространственных функций. Дискретным элементом такого представления является состояние проводника. Под ним понимается принадлежность катушечной стороны, представленной одним условным проводником, к определённой фазе обмотки с указанием направления тока или ЭДС. Состояния а, б и с соответствуют условным проводникам фаз А, В и С с единичными токами или ЭДС положительного направления в пазах («от наблюдателя»). Состояния -а, -б и -с обозначают проводники тех же фаз с противоположным

направлением тока или ЭДС («к наблюдателю»).

Построение ППО осуществляется с использованием специальных базовых схем (БС), имеющих две группы выводов. Переключение питания с одной группы выводов на другую обеспечивает изменение числа полюсов создаваемого магнитного поля: при подключении первой группы выводов формируется поле с числом полюсов $2p_1$, при подключении второй - $2p_2$.

При использовании БС «Y/Y» метод допускает совместное рассмотрение m -зонной и $2m$ -зонной обмоток либо двух $2m$ -зонных обмоток, где m - число фаз. Для БС «YYY/YYY» рассматриваются сочетания двух m -зонных или двух $2m$ -зонных обмоток. При этом совместное рассмотрение двух $2m$ -зонных обмоток нередко обуславливает необходимость перехода к БС «YYYY/YYYYY». Метод ДЗПФ позволяет получать ППО, близкие по электромагнитным и технологическим свойствам к обмоткам обычного исполнения [11, 12].

Рассмотрим последовательность построения ППО с соотношением чисел полюсов $8/4$ при 48 пазах статора. Для решения данной задачи совместно рассматриваются токораспределения m -зонной и $2m$ -зонной обмоток.

Построение выполняется на основе БС «Y-Δ/Y» (рис. 1), имеющей две группы выводов. Выводы A, B, C предназначены для подключения питания в четырёхполюсном режиме ($2p_1 = 4$), а выводы D, E, F - в восьмиполюсном режиме ($2p_2 = 8$).

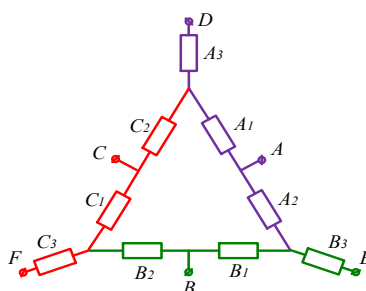


Рис.1. Базовая схема «Y-Δ/Y»

Fig.1. Basic winding circuit «Y-Δ/Y»

В качестве *исходной* обмотки возьмём m -зонную обмотку с $p_2=4$ и с числом пазов на полюс и фазу $q_2=4$, а в качестве *типовой* – нормальную $2m$ -зонную обмотку с $p_1=2$ и $q_1=4$. Запишем ДЗПФ нижнего слоя каждой обмотки друг под другом, тогда соответствие рядов будет иметь вид (табл.1):

Таблица 1. Дискретно заданная пространственная функция нижнего слоя обмоток

Table 1. Discretely specified spatial function of the lower winding layer

Пазы статора																								$2p$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
a	a	a	a	c	c	c	c	b	b	b	b	a	a	a	a	c	c	c	c	b	b	b	b	8
a	a	a	a	-c	-c	-c	-c	b	b	b	b	-a	-a	-a	-a	c	c	c	c	-b	-b	-b	-b	4

Пазы статора																								$2p$
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
a	a	a	a	c	c	c	c	b	b	b	b	a	a	a	a	c	c	c	c	b	b	b	b	8
a	a	a	a	-c	-c	-c	-c	b	b	b	b	-a	-a	-a	-a	c	c	c	c	-b	-b	-b	-b	4

Полученная схема полюсопереключаемой обмотки соответствует схеме Даландера. Для улучшения её электромагнитных свойств, согласования значений магнитной индукции в воздушном зазоре при обеих полюсностиах и обеспечения симметрии фаз целесообразно введение дополнительных ветвей [9, 10].

Количество катушек, выделяемых в дополнительные ветви, может составлять от 17 до 50 % их общего числа. В эти ветви включаются катушки, вклад которых в результирующую ЭДС фазы относительно невелик. Распределение катушек по дополнительным ветвям выполняется с учётом условия взаимной компенсации наводимых в них ЭДС. Соблюдение этого условия необходимо для ограничения уравнивающих токов при питании обмотки со стороны полюсности, для которой дополнительные ветви не предусмотрены. Катушки, которые могут быть выделены в дополнительные ветви, отмечены подчёркиванием в табл. 1.

С учётом выделения указанных катушек в дополнительные ветви сформируем ДЗПФ обмотки

для обеих полюсностей. Полученные распределения представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Дискретно заданная пространственная функция полюсопереключаемой обмотки при меньшем числе полюсов

Table 2. Discretely specified spatial function of the pole-changing winding for the lower pole number

Пазы статора																								2p
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
-c		b	b	b		-a	-a	-a		c	c	c		-b	-b	-b		a	a	a		-c	-c	
a	a	a		-c	-c	-c		b	b	b		-a	-a	-a		c	c	c		-b	-b	-b		4

Пазы статора																								2p
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
-c		b	b	b		-a	-a	-a		c	c	c		-b	-b	-b		a	a	a		-c	-c	
a	a	a		-c	-c	-c		b	b	b		-a	-a	-a		c	c	c		-b	-b	-b		4

Таблица 3. Дискретно заданная пространственная функция полюсопереключаемой обмотки при большем числе полюсов

Table 3. Discretely specified spatial function of the pole-changing winding for the higher pole number

Пазы статора																								2p
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
		-b				-a				-c				-b				-a				-c		
a	a	a	a	c	c	c	b	b	b	b	a	a	a	a	c	c	c	c	b	b	b	b		
-c	-c	-b	-b	-b	-b	-a	-a	-a	-a	-c	-c	-c	-b	-b	-b	-a	-a	-a	-a	-c	-c			
a				c				b					a			c				b				8

Пазы статора																								2p
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
		-b				-a				-c				-b				-a				-c		
a	a	a	a	c	c	c	b	b	b	b	a	a	a	a	c	c	c	c	b	b	b	b		
-c	-c	-b	-b	-b	-b	-a	-a	-a	-a	-c	-c	-c	-b	-b	-b	-a	-a	-a	-a	-c	-c			
a				c				b					a			c				b				8

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

На основе полученной ДЗПФ формируется схема соединений ППО с учётом свойства выбранной БС: при переключении полюсности направление тока в половине катушек изменяется на противоположное. Принадлежность каждой катушки к соответствующей ветви определяется путём сопоставления знаков состояний проводников в первом и третьем рядах ДЗПФ.

Таблица 4. Распределение катушек по ветвям базовой схемы обмотки

Table 4. Distribution of coils among the branches of the basic winding circuit

№ Катушки	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3
4,	12,	8,	13,	21,	5,	1,	9,	17,	
16,	24,	20,	14,	22,	6,	2,	10,	18,	
28,	36,	32,	15,	23,	7,	3,	11,	19,	
40	48	44	37,	45,	29,	25,	33,	41,	
			38,	46,	30,	26,	34,	42,	
			39	47	31	27	35	43	

Пространственные распределения магнитодвижущей силы, создаваемой ППО при обеих полюсностях, близки к синусоидальным (рис. 2). Обмоточные коэффициенты составляют $k_{об1}=0,691$ в четырёхполюсном режиме ($2p_1 = 4$) и $k_{об2}=0,876$ в восьмиполюсном режиме ($2p_2 = 8$). При подключении питания к каждой из двух групп выводов обеспечивается симметрия фаз обмотки.

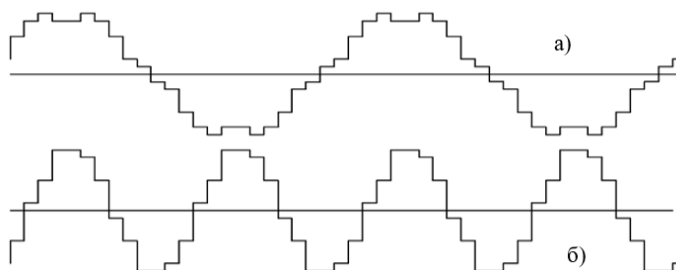


Рис.2. Пространственные распределения магнитодвижущей силы: а) при $2p=4$; б) при $2p=8$.
Fig.2. Spatial distributions of magnetomotive force: a) at $2p=4$; b) at $2p=8$.

В воздушном зазоре электрической машины наряду с основной пространственной гармоникой магнитного поля присутствуют высшие гармонические составляющие [13, 14]. Их возникновение обусловлено, в частности, дискретным размещением проводников в пазах статора и конечным числом фазных зон, вследствие чего пространственное распределение линейной токовой нагрузки отличается от синусоидального. Амплитуды отдельных гармоник определяются их порядком, параметрами обмотки и соответствующими обмоточными коэффициентами, поэтому их уменьшение с ростом порядка не обязательно является монотонным. Результаты электромагнитного анализа разработанной ППО для обеих полюсностей представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5. Результаты электромагнитного анализа ППО при $2p_1=4$

Table 5. Results of the electromagnetic analysis of the pole-changing winding at $2p_1=4$

ν	F_{nm}	$K_{обм}$	F_{nm} с учетом $K_{обм}$	$F_{nm}/F_{\Sigma}, \%, \text{ с}$ учетом $K_{обм}$
1	3,959	0,691	2,736	96,43%
3	0,000	0,569	0,000	0,00%
5	0,082	0,358	0,029	1,03%
7	0,093	0,228	0,021	0,75%
9	0,000	0,098	0,000	0,00%
11	0,114	0,220	0,025	0,89%
13	0,097	0,220	0,021	0,75%
15	0,000	0,098	0,000	0,00%
17	0,038	0,114	0,004	0,15%

Таблица 6. Результаты электромагнитного анализа ППО при $2p_2 = 8$

Table 6. Results of the electromagnetic analysis of the pole-changing winding at $2p_2 = 8$

ν	F_{nm}	$K_{обм}$	F_{nm} с учетом $K_{обм}$	$F_{nm}/F_{\Sigma}, \%, \text{ с}$ учетом $K_{обм}$
1	4,125	0,877	3,619	95,06%
3	0,000	0,250	0,000	0,00%
5	0,221	0,108	0,024	0,63%
7	0,158	0,224	0,035	0,93%
9	0,000	0,250	0,000	0,00%
11	0,075	0,877	0,066	1,73%
13	0,063	0,877	0,056	1,46%
15	0,000	0,250	0,000	0,00%
17	0,065	0,108	0,007	0,19%

Как следует из данных табл. 5 и 6, в гармоническом составе МДС разработанной ППО преобладает основная гармоника, относительное значение которой составляет 96,43 % в четырёхполюсном режиме ($2p_1 = 4$) и 95,06 % в восьмиполюсном режиме ($2p_2 = 8$). Чётные гармоники в обоих режимах отсутствуют.

Диаграммы Гёрреса для обеих полюсностей имеют форму, близкую к окружности (рис. 3). Коэффициент дифференциального рассеяния составляет $\sigma_0 = 2,0 \%$ в четырёхполюсном режиме ($2p_1 = 4$) и $\sigma_0 = 1,4 \%$ в восьмиполюсном режиме ($2p_2 = 8$).

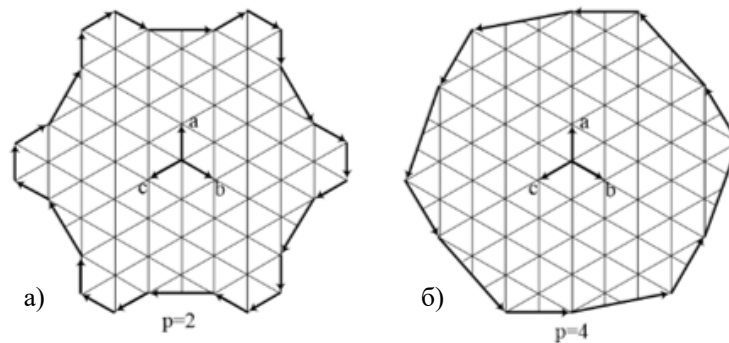


Рис.3. Диаграммы Гёргеса: а) при $2p = 4$; б) при $2p = 8$.

Fig.3. Gerges diagrams: a) at $2p = 4$; b) at $2p = 8$.

На рис. 4 представлена схема электрических соединений предлагаемой трёхфазной полюсопереключаемой обмотки с соотношением чисел полюсов 8/4.

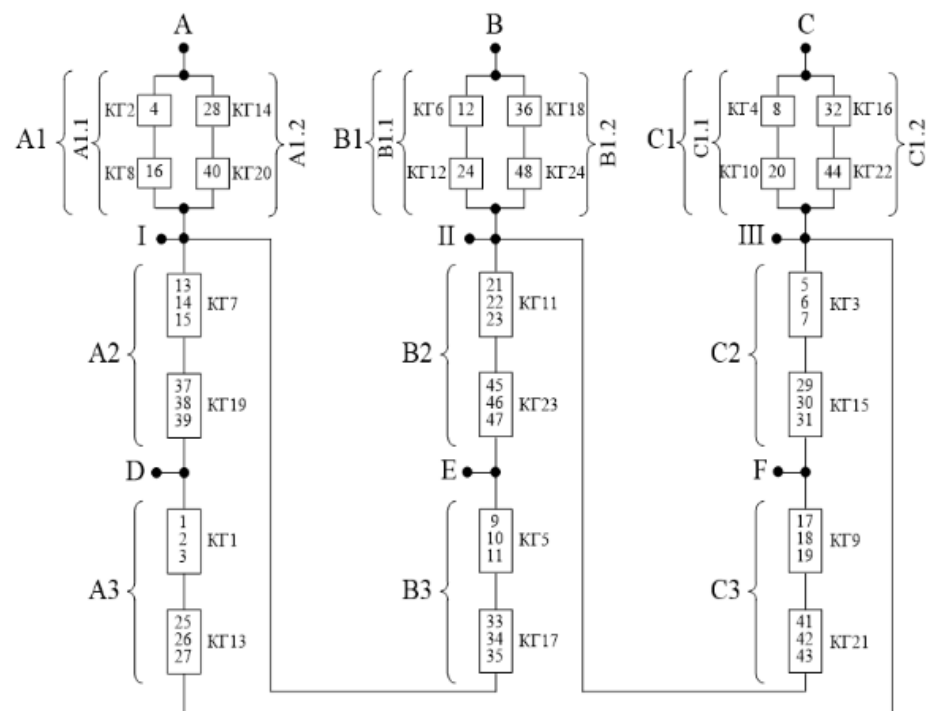


Рис.4. Схема электрических соединений предлагаемой трёхфазной полюсопереключаемой обмотки с соотношением чисел полюсов 8/4.

Fig.4. Connection diagram of the proposed three-phase pole-changing winding with a pole-number ratio of 8/4.

Катушки обмотки соединены по схеме «треугольник с дополнительными ветвями - двойная звезда». В пределах каждой части обмотки катушки включены последовательно-согласно. Их распределение по частям обмотки следующее: A1.1 - катушки № 4, 16; A1.2 - № 14, 20; B1.1 - № 12, 24; B1.2 - № 36, 48; C1.1 - № 8, 20; C1.2 - № 32, 44; A2 - № 13, 14, 15, 37, 38, 39; A3 - № 1, 2, 3, 25, 26, 27; B2 - № 21, 22, 23, 45, 46, 47; B3 - № 9, 10, 11, 33, 34, 35; C2 - № 5, 6, 7, 29, 30, 31; C3 - № 17, 18, 19, 41, 42, 43.

4. Заключение (Conclusion)

На основе разработанной схемы ППО с использованием программного комплекса ANSYS Maxwell спроектирован двухскоростной асинхронный двигатель с соотношением чисел полюсов 8/4. По результатам расчётов на ЧП «Energy Motors» изготовлен экспериментальный образец на базе магнитопровода серийного двигателя типа 4A200L4Y3. Число пазов статора составляет $z_1 = 48$, ротора - $z_2 = 38$, длина пакета статора $l_d = 215$ мм. Обмотка выполнена проводом ПЭТВ диаметром 1,18 мм с одинаковым числом проводников в каждом пазу $w_n = 18$. Число

последовательно соединённых витков фазы составляет $w_2 = 72$ при $p_1 = 2$ и $w_4 = 108$ при $p_2 = 4$. Для принятого исполнения обмотки отношение магнитных индукций в воздушном зазоре в восьмиполусном и четырёхполусном режимах составляет $B_{\delta 8}/B_{\delta 4} = 1,15$ [15, 16].

Электромагнитный анализ разработанной ППО показал, что пространственные распределения МДС при обеих полюсностях близки к синусоидальным, а коэффициент дифференциального рассеяния составляет 2,0 % в четырёхполусном режиме и 1,4 % в восьмиполусном режиме. При этом обеспечивается симметрия фаз обмотки в обоих вариантах подключения питания.

Таким образом, разработка и изготовление экспериментального образца подтверждают конструктивную реализуемость предложенной ППО на базе магнитопровода серийной электрической машины. Полученные результаты создают основу для экспериментальной оценки энергетических и пусковых характеристик двигателя, а также определения эффективности его применения в электроприводах, требующих двух рабочих скоростей вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каримов Х. Г., Тупогуз Ю. А. Метод построения электрически совмещённых обмоток переменного тока // *Электричество*. - 1987. - № 9. - С. 29-38.
2. A. V. Karpenko and I. Yu. Petrova, "Models of indoor microclimate control," *Fundamental Research*, no. 7-2, pp. 224–229 (2016). Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40488>
3. Kh. Shamsutdinov, "Study on improving the asynchronous electric drive of ball mills," *E3S Web of Conferences* 497, 01001 (2024). doi:10.1051/e3sconf/202449701001
4. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, Kh. F. Shamsutdinov, S. T. Ganiev, M. B. Peysenov, and S. D. Rismukhamedov, "Development of a pole-changing winding for close pole ratio," *AIP Conf. Proc.* 3152, 040034 (2024). doi:10.1063/5.0219624
5. Рисмухамедов Д. А. Полусопереключаемые асинхронные двигатели для турбомеханизмов: диссертация. - Ташкент, 2006. - 155 с.
6. M. van der Giet, K. Hameyer, and S. Risse, "Induction motor with pole-changing winding for variable supply frequency," in *IEEE IEMDC '07*, vol. 2, pp. 1484–1489 (2007). doi:10.1109/IEMDC.2007.383647
7. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, F. N. Tuychiev, Kh. F. Shamsutdinov, and S. T. Ganiev, "Construction methodology and analysis of electromagnetic properties of pole-changing winding," *AIP Conf. Proc.* 2552, 050013 (2025). doi:10.1063/5.0267444
8. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, Kh. F. Shamsutdinov, S. T. Ganiev, M. B. Peysenov, and S. D. Rismukhamedov, "Development of a pole-changing winding for close pole ratio," *AIP Conf. Proc.* 2764, 020034 (2024). doi:10.1063/5.0219624
9. D. Rismukhamedov, Kh. Shamsutdinov, Kh. Magdiev, M. Peysenov, and O. Nurmatov, "Construction of pole-switchable windings for two-speed motors of mechanisms with a stress operating mode," *AIP Conf. Proc.* 3331, 040059 (2025). doi:10.1063/5.0305963
10. D. Rismukhamedov, Kh. Shamsutdinov, Kh. Rozmetov, Sh. Khusanov, and S. Rismukhamedov, "Improvement of electromagnetic properties of pole-changing windings," *AIP Conf. Proc.* 3331, 040058 (2025). doi:10.1063/5.0305959
11. M. Bobojanov, D. Rismukhamedov, F. Tuychiev, and Kh. Shamsutdinov, "Development and research of pole-changing winding for a close pole ratio," *E3S Web of Conferences* 264, 03057 (2021). doi:10.1051/e3sconf/202126403057
12. G. Kovacs, "A 3Y/3Y pole-changing winding of high-power asynchronous motors," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 1367–1374 (2018).
13. G. Kovacs, "Pole-changing windings for close ratio and 1:N ratio using the 3//Y / 3//Y method," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 241–253 (2018).
14. D. A. Rismukhamedov, "Development and research of pole-changing windings with close pole ratios," *Problems of Energy and Resource Saving*, no. 1, pp. 74–84 (2021).
15. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, F. N. Tuychiev, and Kh. G. Magdiev, "Application of pole-changing windings for asynchronous motors of ventilation systems," *Problems of Energy and Resource Saving*, no. 4, pp. 158–164 (2022).
16. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, F. N. Tuychiev, and Kh. F. Shamsutdinov, "Development of new pole-changing winding for lifting and transport mechanisms," *E3S Web of Conferences* 365, 04024 (2023). doi:10.1051/e3sconf/202336504024

REFERENCES

1. G. Karimov and Yu. A. Tupoguz, "Method of constructing electrically combined windings of alternating current," *Elektrichestvo*, no. 9, pp. 29–38 (1987).

2. A. V. Karpenko and I. Yu. Petrova, "Models of indoor microclimate control," *Fundamental Research*, no. 7-2, pp. 224–229 (2016). Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40488>
3. Kh. Shamsutdinov, "Study on improving the asynchronous electric drive of ball mills," *E3S Web of Conferences* 497, 01001 (2024). doi:10.1051/e3sconf/202449701001
4. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, Kh. F. Shamsutdinov, S. T. Ganiev, M. B. Peysenov, and S. D. Rismukhamedov, "Development of a pole-changing winding for close pole ratio," *AIP Conf. Proc.* 3152, 040034 (2024). doi:10.1063/5.0219624
5. D. A. Rismukhamedov, *Pole-switching asynchronous motors for turbomechanisms*. PhD dissertation, Tashkent, 2006, 155 p.
6. M. van der Giet, K. Hameyer, and S. Risse, "Induction motor with pole-changing winding for variable supply frequency," in *IEEE IEMDC '07*, vol. 2, pp. 1484–1489 (2007). doi:10.1109/IEMDC.2007.383647
7. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, F. N. Tuychiev, Kh. F. Shamsutdinov, and S. T. Ganiev, "Construction methodology and analysis of electro-magnetic properties of pole-changing winding," *AIP Conf. Proc.* 2552, 050013 (2025). doi:10.1063/5.0267444
8. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, Kh. F. Shamsutdinov, S. T. Ganiev, M. B. Peysenov, and S. D. Rismukhamedov, "Development of a pole-changing winding for close pole ratio," *AIP Conf. Proc.* 2764, 020034 (2024). doi:10.1063/5.0219624
9. D. Rismukhamedov, Kh. Shamsutdinov, Kh. Magdiev, M. Peysenov, and O. Nurmatov, "Construction of pole-switchable windings for two-speed motors of mechanisms with a stress operating mode," *AIP Conf. Proc.* 3331, 040059 (2025). doi:10.1063/5.0305963
10. D. Rismukhamedov, Kh. Shamsutdinov, Kh. Rozmetov, Sh. Khusanov, and S. Rismukhamedov, "Improvement of electromagnetic properties of pole-changing windings," *AIP Conf. Proc.* 3331, 040058 (2025). doi:10.1063/5.0305959
11. M. Bobojanov, D. Rismukhamedov, F. Tuychiev, and Kh. Shamsutdinov, "Development and research of pole-changing winding for a close pole ratio," *E3S Web of Conferences* 264, 03057 (2021). doi:10.1051/e3sconf/202126403057
12. G. Kovacs, "A 3Y/3Y pole-changing winding of high-power asynchronous motors," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 1367–1374 (2018).
13. G. Kovacs, "Pole-changing windings for close ratio and 1:N ratio using the 3//Y / 3//Y method," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 241–253 (2018).
14. D. A. Rismukhamedov, "Development and re-search of pole-changing windings with close pole ratios," *Problems of Energy and Resource Saving*, no. 1, pp. 74–84 (2021).
15. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, F. N. Tuychiev, and Kh. G. Magdiev, "Application of pole-changing windings for asynchronous motors of ventilation systems," *Problems of Energy and Resource Saving*, no. 4, pp. 158–164 (2022).
16. M. K. Bobojanov, D. A. Rismukhamedov, F. N. Tuychiev, and Kh. F. Shamsutdinov, "Development of new pole-changing winding for lifting and transport mechanisms," *E3S Web of Conferences* 365, 04024 (2023). doi:10.1051/e3sconf/202336504024