



Kombinatsiyalashgan chulg'am qo'llash orqali asinxron mashinalar energiya samaradorligini oshirish

Maxsud Q. Bobojanov^{1,a)}, Furqat N. Tuychiev¹, Nuralibek X. Rashidov^{1,b}

^{1,a)} DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; mbobojanov@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-0244-2932>

¹ PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; tuychievfn@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

^{1,b} Tayanch doktorant, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; nuralibekrashidov@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-5003-6664>

Dolzarblig: Elektr mashinalar sohasida olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, energiya samaradorlikni oshirish yuqori miqdordagi material sarf xarajatlari yoki yaxshilangan xususiyatlarga ega qimmatbaho elektrotexnik materiallar qo'llash hisobiga amalga oshirilishi mumkin. Bu esa o'z navbatida motor tannarxini oshishga olib keladi. Yuqoridagi usullardan farqli ravishda kombinatsiyalashgan chulg'amlarni qo'llash orqali elektr motorlarning energiya samaradorligini additiv texnologiya va qimmatbaho elektrotexnik materiallardan foydalanmasdan, oshirish mumkin. Shu bilan birga yuqori garmonikalar tarkibining yaxshilanishi mashinaning qo'shimcha isroflarining kamayishiga olib keladi.

Maqsad: Asinxron motor statorida standart chulg'am o'rniga kombinatsiyalashgan chulg'amni qo'llash oqarli stator chulg'amidagi qo'shimcha isroflarni kamaytirishga hamda MYuK taqsimlanish egri chizig'idagi yuqori garmonik tashkil etuvchilarning ulushini kamayishi hisobiga motor energiya samaradorligini oshirishdan iborat.

Usullari: Kombinatsiyalashgan chulg'amning elektromagnit xossalari standart chulg'amga nisbatan avvallilarini baholash uchun garmonik tahlillar o'tkazildi va chulg'am ko'effitsientlari hisoblandi.

Natijalar: Kombinatsiyalashgan chulg'am uchun MYuK dagi yuqori garmonik tashkil etuvchilar amplitudasi standart chulg'amga nisbatan sezilari darajada yaxshilandi. Bunda asosiy garmonikaning umumiy garmonik tarkibiga nisbati 3% ga chulg'am ko'effitsienti esa taxminan 3,5% ga yaxshilandi. Ushbu turdagi maxsus chulg'amlarning standart chulg'amga nisbatan umumiy avzalliklari to'g'risida ma'lumot keltirilgan.

Kalit so'zlar: Kombinatsiyalashgan chulg'am, elektr mashinalar energiya samaradorligi, yuqori garmonikalar, MYuK egri chizig'i, Gyorges diagrammasi.

For citation: Bobojanov M.K., Tuychiev F.N., Rashidov N.Kh. Improving the energy efficiency of induction machines through combined windings. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 3, pp. 135-140.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16935394>

Received: 02.05.2025
Revised: 14.06.2025
Accepted: 10.07.2025
Published: 23.08.2025

Copyright: © Maxsud K. Bobojanov, Furqat N. Tuychiev, Nuralibek Kh. Rashidov, 2025. 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/>).

Повышение энергоэффективности асинхронных машин путем применения комбинированных обмоток

Махсуд К. Бобожанов^{1,a)}, Фуркат Н. Туйчиев¹, Нуралибек Х. Рашидов^{1,b}

^{1,a)} DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; mbobojanov@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-0244-2932>

¹ PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; tuychievfn@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

^{1,b} Докторант, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; nuralibekrashidov@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-5003-6664>

Актуальность: Исследования в области электрических машин показывают, что повышение энергоэффективности может быть достигнуто за счет больших материальных затрат или применения дорогостоящих электротехнических материалов с улучшенными свойствами. Это, в свою очередь, приводит к увеличению стоимости двигателя. В отличие от вышеперечисленных методов, с помощью комбинированных обмоток можно повысить энергоэффективность электродвигателей без использования аддитивной технологии и дорогостоящих электротехнических материалов. В то же время улучшение содержания высших гармоник приводит к снижению дополнительных потерь машин.

Цель: Использование комбинированной обмотки вместо стандартной в статоре асинхронного двигателя снижает дополнительные потери в обмотке статора и повышает энергоэффективность за счет снижения доли высших гармонических составляющих в кривой распределения МДС.

Методы: Для оценки преимуществ электромагнитных свойств комбинированной обмотки по сравнению со стандартной были проведены гармонические анализы и рассчитаны обмоточные коэффициенты.

Результаты: Амплитуда высших гармонических составляющих в МДС для комбинированной обмотки значительно улучшилась по сравнению со стандартной обмоткой. При этом отношение основной гармоники к общему гармоническому составу улучшилось на 3%, а обмоточный коэффициент - примерно на 3,5%. Приведены общие преимущества этого типа специальных обмоток по сравнению со стандартной обмоткой.

Ключевые слова: Комбинированная обмотка, энергоэффективность электрических машин, высшие гармоники, кривая МДС, диаграмма Гергеса.

Improving the energy efficiency of induction machines by using combined windings

Makhsud K. Bobojanov^{1,a)}, Furqat N. Tuychiev¹, Nuralibek Kh. Rashidov^{1,b}

^{1a)} DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; mbobojanov@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0002-0244-2932>

¹ PhD., assoc.prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tuychievfn@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-1031-3460>

^{1,b} PhD Student, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; nuralibekrashidov@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-5003-6664>

Relevance: Research in the field of electrical machines shows that energy efficiency is improved by higher material costs or by more expensive electrotechnical materials with improved properties. This, in turn, leads to an increase in the cost of the engine. Unlike the methods mentioned above, combined windings can be used to increase the energy efficiency of electrical machines without using additive technology or expensive electrotechnical materials. At the same time, improving the content of higher harmonics leads to a reduction in additional machine losses.

Aim: Using a combined winding instead of a standard winding in an induction motor stator reduces additional losses in the stator winding and increases energy efficiency by reducing the proportion of higher harmonic components in the MMF distribution curve.

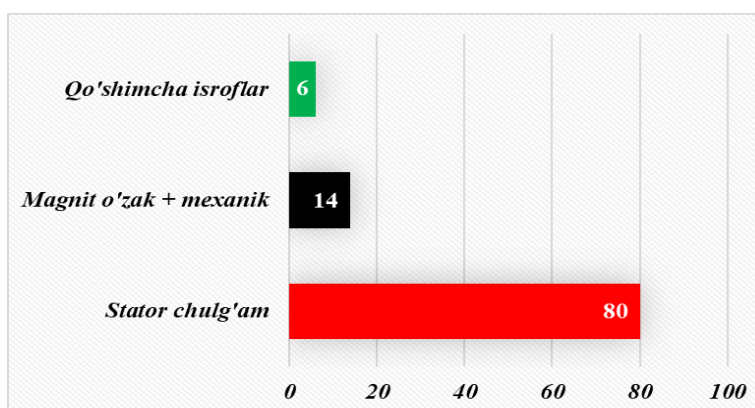
Methods: To evaluate the advantages of the electromagnetic properties of the combined winding compared to the standard one, harmonic analyses were carried out and winding factor were calculated.

Results: The amplitude of the harmonic components in the MMK for the combined winding has significantly improved compared to the standard winding. At the same time, the ratio of the main harmonic to the overall harmonic content improved by 3%, and the winding factor by approximately 3.5%. The general advantages of this type of special winding compared to standard winding are presented.

Keywords: Combined winding, energy efficiency of electric machines, high harmonics, MMF curve, Georges diagram.

1. Kirish (Introduction)

Elektr mashinalari samaradorligini oshirish uchun isroflarni kamaytirishda turli xil yondashuvlar mavjud. Bulardan biri kattaroq ko'ndalang kesimli o'tkazgichlardan foydalanish orqali chulg'amdagi isroflarni kamaytirishdir, ammo bu ko'proq materialni sarfini talab qiladi. Shu bilan birga rotordagi olmaxon qafasi aluminiy o'rni misdan tayyorlanishi mumkin [1]. Elektrotexnik po'lat o'zakdagi isroflarni kamaytirish uchun magnit maydon zichligini kamaytirish yoki magnitlanish uchun kam isrof bo'ladigan elektrotexnik po'latdan foydalanish mumkin. Mexanik isroflar boshqa isroflarga nisbatan ancha past bo'ladi. Ushbu sharhlar shuni ko'rsatadiki, samaradorlik yuqoriroq material xarajatlari yoki yaxshilangan xususiyatlarga ega qimmatroq materiallar bilan yaxshilanadi [2]. Stator uchun standart tarzda chulg'amda isroflar odatda asinxron mashinalardagi umumiy isroflarning 80% gacha qismini tashkil qiladi (1-rasm).



1-rasm. Asinxron motordagi umumiy isroflarning ulushlari (% da)

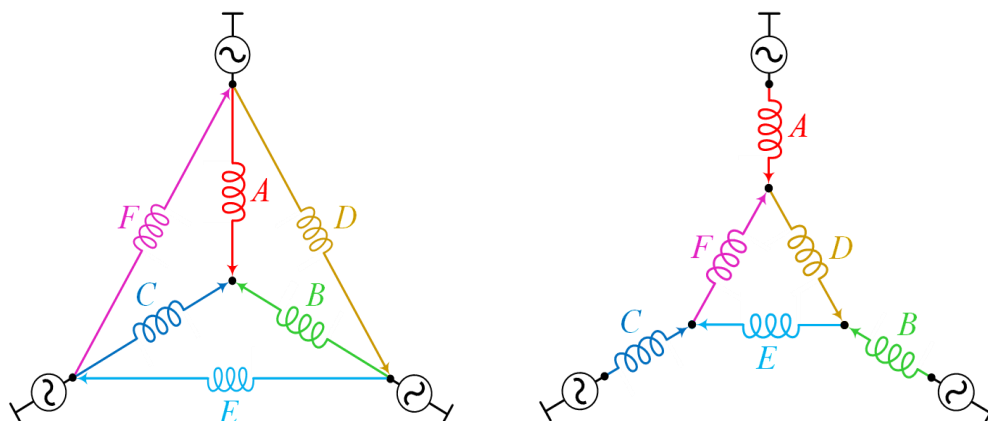
Fig.1. Share of the total losses on the induction motor (in %)

Ushbu isroflar ulushi boshqa isroflarga nisbatan katta bo'lgani uchun, chulg'amda materiallar sarfini oshirish orqali chulg'am qarshiligini va shuning bilan birga chulg'am isroflarini kamaytirish mumkin. Ushbu usulning kamchiliklaridan biri yuqori material sarf xarajatlardir. Shu bilan birga stator pazini to'ldirish koeffitsientining qiymati nisbatan kattaligi chulg'amni tayyorlash vaqtini uzaytiradi.

Elektr mashinalarda isroflarni kamaytirish uchun yuqoridagi usullarga muqobil variantlardan biri – qo‘shimcha materiallarni talab qilmasdan motorning energetik ko‘rsatgichlarini yaxshilaydigan kombinatsiyalashgan chulg‘amlardan foydalanish hisoblanadi [2,3]. Bundan tashqari, yuqori garmonik tashkil etuvchilarning kamayishi mashinaning qo‘shimcha isroflarining kamayishiga olib keladi.

2. Metodlar va materiallar (Methods and materials)

Kombinatsiyalashgan chulg‘amlarning strukturaviy tuzilishi odatdagi 6 zonali chulg‘amga qaraganda ko‘proq faza zonalarga ega bo‘ladi (2-rasm, a,b). Bunda "uchburchak" ulangan faza zonalari "yulduz" ning tegishli fazali zonalaridan 30 gradusga siljiydi va "uchburchak" faza zonadagi toklar ham "yulduz"dagi toklarga qaraganda 30 gradusga siljiydi (3-rasm, a,b).



2-rasm. Kombinatsiyalashgan chulg‘amning bazaviy sxemasi:

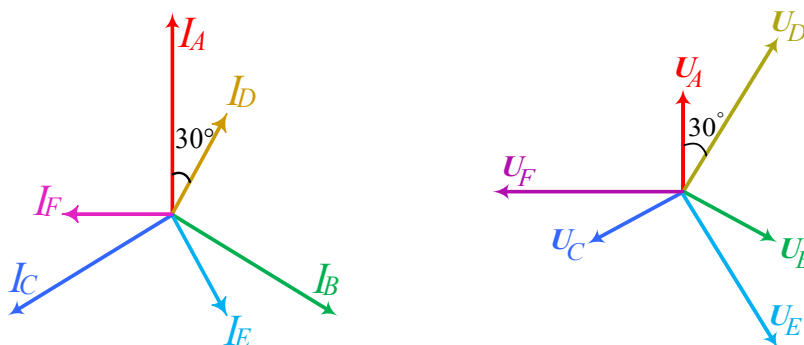
a) Uchburchakdagi yulduz bazaviy sxemasi

b) Qo‘shimcha shahobchali uchburchak bazaviy sxemasi

Fig.2. Basic scheme of combined winding:

a) Scheme of a star in a triangle

b) Scheme of a triangle with additional branches



3-rasm. Fazadagi tok va kuchlanish vektorlari:

a) fazadagi toklarning vektorlari

b) fazadagi kuchlanish vektorlari

Fig.3. Current and voltage vectors in phase:

a) Current vectors

b) Voltage vectors

Ko‘rinib turganidek, “uchburchak” qismdagi toklarning amplitudalari “yulduz” qismdagi toklarga nisbatan $\sqrt{3}$ marta kamayadi [3]. Bu holat olti fazali tizim aniq loyihalashtirilgan holdagina sodir bo‘ladi, yani yulduz va uchburchak qismlarda har bir paz uchun magnit oqim mutlaqo bir xil bo‘ladi. Agar chulg‘am o‘ramlar soni irratsional son bo‘lgan va shuning uchun uni roslash mumkin bo‘lmagan $\sqrt{3}$ nisbatga to‘liq mos keladigan bo‘lsa, bu tenglik o‘rinli bo‘ladi. Biroq, o‘ramlar soni $w > 10$ ga teng bo‘lganda, bu nisbat juda aniq rostlanishi mumkin. Bundan tashqari, olib borilgan tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, asosiy garmonika uchun chulg‘am koeffitsiyenti, hatto kichik sonli o‘ramlar soni bilan ham, haqiqiy nisbatga bog‘liq emas, bu nisbat faqat yuqori garmonikalar uchun ta‘sir qiladi.

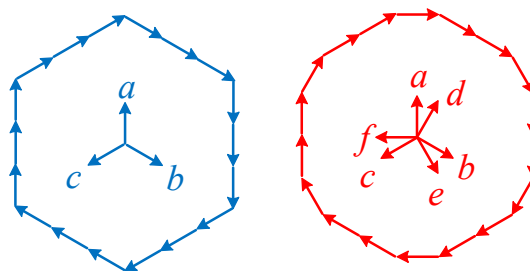
Yuqoridagi tahlillar kombinatsiyalashgan chulg‘amni olti fazali tizim deb nomlashga asos bo‘la oladi.

Kombinatsiyalashgan chulg‘amning garmonik tahlili. Bu usul uch fazali standart chulg‘amlarga qaraganda sinusoidal shaklga yana ham yaqinroq bo‘lgan magnitlanish egri chizig‘ini qurishga imkon

beradi. Bunday farqni MYuK dagi yuqori garmonik tarkibni Furiye qatoriga yoyganda yaqqol ko'rish mumkin (5-rasm). Buning uchun zaruriy shartlardan biri - har bir pazda deyarli bir xil tokni hosil qilish, o'z navbatida "uchburchak" qismidagi chulg'amning o'ramlar sonini $\sqrt{3}$ marta oshirish orqali erishiladi. Kichikroq tok va pazlarning cheklangan yuzasi tufayli chulg'am simlarining ko'ndalang kesimini mos ravishda kamaytirish talab etiladi. Bundan tashqari, bu holatda chulg'amda yuqori garmonik tarkib nisbatan yaxshilanadi. Chulg'am elektromagnit xususiyatlarini baholovchi faktorlardan yana biri bu Gyorges diagrammasidir. Gyorges diagrammasini qurish orqali elektr mashinalarining ko'p fazali chulg'amlarining turli xususiyatlarini o'rganish mumkin (4-rasm).

Gyorges diagrammasi MYuK egri chizig'idagi yuqori garmonikalarning umumiy tarkibi darajasidan kelib chiqib, ularning sifatini miqdoriy baholash imkonini beradi [4].

3. Natijalar va muhokama (Results and discussion)



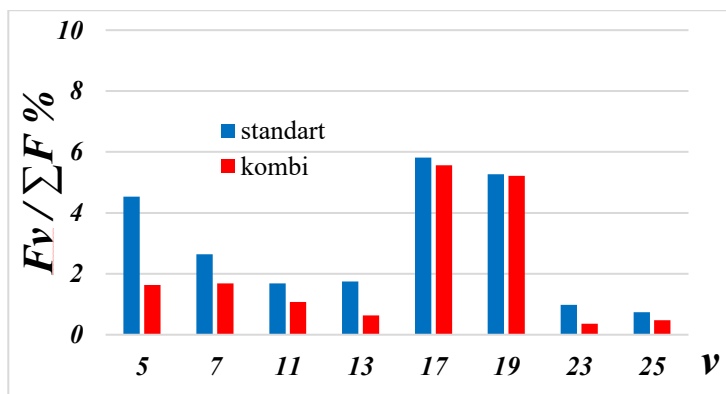
4-rasm. $Z = 36$ va $y = 9$ bo'lgan chulg'am uchun Gyorges diagrammasi:

- a) standart chulg'am; b) kombinatsiyalashgan chulg'am

Fig.4. Görges diagram for a winding with $Z = 36$ and $y = 9$:

- a) standard winding b) combined winding

Bunday uch fazali chulg'amlarning elektromagnit xususiyatlari olti fazali chulg'amlarning ko'rsatkichlariga ancha yaqin, ya'ni magnit yuritvchi kuch (MYuK) taqsimlanish egri chizig'idagi yuqori garmonikalarning umumiy garmonik tarkibga nisbatan ulushlari nisbatan kam (3-rasm).



5-rasm. MYuK dagi yuqori garmonik tarkib

Fig.5. High harmonic content in MMF

Ma'lumki, yuqori garmonikalar motorning ishlashiga salbiy tasir ko'rsatadi: shovqin va vibratsiyani keltirib chiqaradi, qo'shimcha (tormozlovchi) momentlarni, differentsial sochilishni va qo'shimcha isroflarni keltirib chiqaradi. Turli tadqiqotlarga ko'ra, qo'shimcha isroflar motor tomonidan iste'mol qilinadigan quvvatning 0,4 dan 6% gacha qismini tashkil qilishi mumkin [5, 6, 7]. Shu sababli, chulg'amning MYuK taqsimlanish egri chizig'idagi yuqori garmonikalar tarkibini kamaytirish motorning energetik xossalarni yaxshilashga yordam beradi. Odatda, standart elektr motorlar 6 zonali uch fazali chulg'amga ega bo'lib, bu birinchi navbatda 5-, 7-, 11-, 13-, 17- va 19-garmonikalarni hosil qilishga olib keladi.

Ta'kidlash kerakki, 6 zonali sistemada garmonikalar $v = 6n \pm 1$ formula bilan aniqlanadigan tartibga ega, bu yerda n -butun musbat son. Agar 12 zonali elektr motorlar loyihalash zarur bo'lsa, bunda 11-, 13-, 23-, 25-garmonikalar vujudga keladi va ular elektromexanik ta'sir jihatdan kamroq zararli hisoblanadi [8,9].

Ushbu afzalliklardan tashqari, bu turdagi chulg'amlarda asosiy garmonika uchun chulg'amning

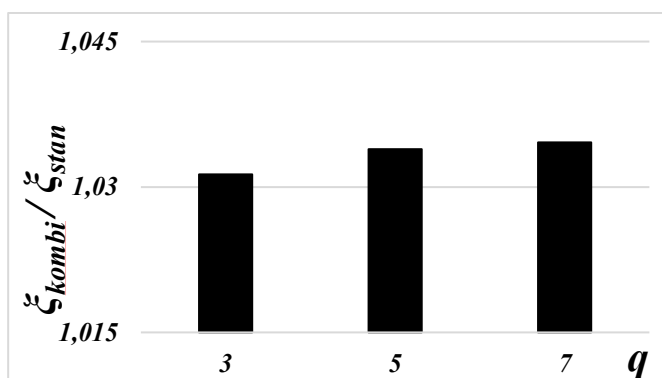


elektromagnit xususiyatlarini baholovchi asosiy faktorlardan chulg'am koeffitsienti (3-rasm) sezilarli darajada yaxshilanadi. Agar bitta qutb va fazaga mos keladigan pazlar soni $\{q\}$ juft bo'lsa, u holda asosiy garmonika uchun chulg'am koeffitsienti 3,5% ga oshadi (1).

$$\frac{\xi_{Y\Delta}}{\xi_{stan}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_{Y\Delta}}\right)}{q_{Y\Delta} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_{Y\Delta} \cdot q_{Y\Delta}}\right)} \cdot \frac{q_{stan} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_{stan} \cdot q_{stan}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2m_{stan}}\right)} =$$

$$= \frac{\sin\left(\frac{\pi}{12}\right)}{\frac{q_{stan}}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_{stan} \cdot q_{stan}}\right)} \cdot \frac{q_{stan} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_{stan} \cdot q_{stan}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)} = 1,035 \quad (1)$$

Agar bir qutbga va $\{q\}$ fazaga to'g'ri keladigan pazlar soni toq bo'lsa, u holda o'sish 3,5% ga nisbatan biroz kamayadi (6-rasm).



6-rasm. $\{q\}$ ning toq qiymatlarida chulg'am koeffitsiyentlari tahlili
Fig.6. Analysis of winding factors for odd values $\{q\}$

4. Xulosa (Conclusion)

Kombinatsiyalangan chulg'amlar sxemalarining tahlili ularning standart chulg'amlarga nisbatan quyidagi afzalliklarini ko'rsatadi: MYuK da yuqori garmonik tarkib va asosiy garmonika uchun chulg'am koeffitsientlari yaxshilanishi.

O'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatdiki, asinxron motorlarda kombinatsiyalangan chulg'amlardan foydalanish "parazit" garmonikalar amplitudalarini sezilarli darajada kamaytirish imkonini beradi (5, 7, 11, 13 tartib), bu esa isroflarni, tebranishlarni kamaytirishga va samaradorlikni oshirishga olib keladi.

Kombinatsiyalangan chulg'amlar garmonik buzilishlarni kamaytirish uchun istiqbolli yechim hisoblanadi. Ushbu sohadagi keyingi tadqiqotlar barcha turdagi isroflar va elektromagnit xalaqitlarni minimallashtirish nuqtai nazaridan motorlar samaradorligini oshirishga imkon yaratadi.

ADABIYOT

1. Kasten H. Wirkungs gradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz einer Wicklung mit Stern-Dreieck-Mischschaltung // *Jahresbercht.2010.* pp. 76-82.
2. Tobias Knapp, Wilfried Hofmann.: Combined star-delta windings in small induction machines for reducing no-load and additional losses. // *IEMDC23_000093_Combined_star_delta_windings_in_small_induction_machines.* pp 1-2.
3. Мартынов, К.В. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / К.В.Мартынов, Л.А.Пантелеева, И.А.Благодатских// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 109-118.
4. Геллер, Б. Высшие гармоники в асинхронных машинах // Б. Геллер, В. Гамата; под ред. З. Г. Каганова. – М. : Энергия, 1981. – 352 с.
5. Геллер, Б. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах // Б. Геллер, В. Гамата; под ред. Ф. М. Юферова. – М., Л.: Энергия, 1964. – 263 с.
6. Асинхронные двигатели общего назначения / [Е. П. Бойко и др.]; под ред. В. М. Петрова, А. Э. Кравчика. – М. : Энергия, 1980. – 488 с.
7. M.Q.Bobojanov, F. N. To'yuchiyev, N.X.Rashidov. Kombinatsiyalashgan chulg'am qo'llash or-



qali asinxron elektr mashinalarning samaradorligini oshirish. // *Konchilik mashinalari va texnologiyalari ilmiy texnik jurnali 2024*, issn 2181-3442, 68-72b

8. M.K.Bobojanov, F.N.Tuychiev, N.X.Rashidov. Dynamic model of an asynchronous motor with a three-phase combined winding. XXVIII-Symposium. // *Electromagnetic Phenomena in nonlinear circuit*. pp.1-2. <https://epnc.put.poznan.pl/wp-content/uploads/026.pdf>.

9. M.K.Bobojanov, N.X.Rashidov, (2024). Improving the energy efficiency of induction machines through combined windings. // *Anthology for the Workshop, Developments and Research Results of the Chair of Electrical Machines and Drive Systems 2024* December 5, Hamburg 2024, pp.22-24. <https://opensu.ub.hsu-hh.de/entities/publication/17399>.

REFERENCES

1. Kasten H. Wirkungs gradsteigerung von Asynchronmaschinen durch den Einsatz einer Wicklung mit Stern-Dreieck-Mischschaltung *Jahresbercht.2010*. pp. 76-82.

2. Tobias Knapp, Wilfried Hofmann.: Combined star-delta windings in small induction machines for reducing no-load and additional losses. *IEMDC23_000093_Combined_star_delta_windings_in_small_induction_machines*. pp 1-2.

3. Мартынов, К.В. Оценка энергетических характеристик асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой / К.В.Мартынов, Л.А.Пантелеева, И.А.Благодатских Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 109-118.

4. Геллер, Б. Высшие гармоники в асинхронных машинах // Б. Геллер, В. Гамата; под ред. З. Г. Каганова. – М. : Энергия, 1981. – 352 с.

5. Геллер, Б. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах // Б. Геллер, В. Гамата; под ред. Ф. М. Юферова. – М., Л. : Энергия, 1964. – 263 с.

6. Асинхронные двигатели общего назначения / [Е. П. Бойко и др.]; под ред. В. М. Петрова, А. Э. Кравчика. – М. : Энергия, 1980. – 488 с.

7. M.Q.Bobojanov, F. N. To'yuchiyev, N.X.Rashidov. Kombinatsiyalashgan chulg'am qo'llash orqali asinxron elektr mashinalarning samaradorligini oshirish. *Konchilik mashinalari va texnologiyalari ilmiy texnik jurnali 2024*, issn 2181-3442, 68-72b

8. M.K.Bobojanov, F.N.Tuychiev, N.X.Rashidov. Dynamic model of an asynchronous motor with a three-phase combined winding. XXVIII-Symposium. *Electromagnetic Phenomena in nonlinear circuit*. pp.1-2. <https://epnc.put.poznan.pl/wp-content/uploads/026.pdf>.

9. M.K.Bobojanov, N.X.Rashidov, (2024). Improving the energy efficiency of induction machines through combined windings. *Anthology for the Workshop, Developments and Research Results of the Chair of Electrical Machines and Drive Systems 2024* December 5, Hamburg 2024, pp.22-24. <https://opensu.ub.hsu-hh.de/entities/publication/17399>.