

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-25>

УДК 621.3

О. Ю. Юрченко, PhD, доцент

Г. В. Барсукова, канд. техн. наук, доцент

К. В. Мороз, зав. навч. лаб.

М. С. Новіков, студент

М. О. Щебетенко, студент

Сумський національний аграрний університет

e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3047-6654

ORCID: 0000-0002-4261-2182

ORCID: 0009-0004-9665-6908

ORCID: 0009-0004-8033-3127

ORCID: 0009-0007-4902-5056

ТЕОРЕТИЧНО ПРО КОНСТРУКТИВ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ З МОЖЛИВІСТЮ ПОКРАЩЕННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

Анотація. Покращення характеристик електричних двигунів є можливим шляхом зміни конструкції їх обмоток. Збільшення рівня використання електричних двигунів у різних галузях на різних режимах роботи вимагає підходу, спрямованого на раціональне використання ресурсів. У роботі на прикладі конкретно обраного електричного двигуна представлено аналіз можливості підвищення його потужності шляхом зменшення довжини петлі в лобовій частині обмотки електричного двигуна. Як наслідок, зменшення довжини петлі в лобовій частині з 70 мм до 20 мм для конкретного електричного двигуна призводить до зменшення довжини витка обмотки в 1,8 раза, що дає змогу зменшити опір котушок, що встановлені в пазах електричного двигуна. Зменшення опору дає змогу збільшити силу струму, а отже, і потужності цього електродвигуна, а також раціонального використання габаритів двигуна та проводу у витках котушок його обмоток.

Ключові слова: електричний двигун, котушка, обмотка, активна сталь, провід, статор, ротор, пари полюсів, потужність, сила струму, опір, напруга, питомий опір, довжина провідника, площа поперечного перерізу, габаритні розміри, раціональне використання, підвищення ефективності.

Постановка проблеми. Структура електричного двигуна є досить відомою. Основні його елементи мають різний характер руху. Зокрема, статор є нерухомою частиною електричного двигуна, а ротор – рухомою. У статорі реалізовано укладку обмоток. Такі обмотки виконано окремим котушками. Кожна з них має власний набір витків проводу визначеного діаметра.

Виконання статора електричного двигуна, зокрема котушок його обмотки, різняться в неонакових двигунів. Якщо вести мову про довжину витка проводу в котушці електричного двигуна, то можна зробити висновок, що на потужність, отримувану із цього електродвигуна, впливає довжина витка проводу, площа його поперечного перерізу та матеріал, що визначатиметься згодом як питомий опір того чи іншого провідникового матеріалу.

Котушки, укладені в пази статора, окремо є можливістю розглядати, як матеріал поза активною сталлю структурних елементів електродвигуна. Тому внесення змін в конструкцію обмоток шляхом зміни довжини витка має своє продовження при зміні потужності безпосередньо електричного двигуна.

У такому разі раціональне використання габаритів електродвигуна та проводу, що використовується для його котушок, спрямоване на зменшення довжини витка котушки, що викликано окремими випадками аналізу конструкції конкретного електродвигуна з великими розмірами петлі в лобовій частині котушки електричного двигуна.

Аналіз останніх досліджень. Понад 80 % усіх споживачів електроенергії є електродвигунами. Електродвигуни різної потужності та напруги є ключовими елементами багатьох про-

мислових та технологічних процесів. Контроль стану електродвигуна необхідний для забезпечення стабільної роботи широкого спектра виробничих установок. Пошкодження обмоток є однією з причин відмов електродвигунів. Тому серед перспектив ресурсоефективних технологій в енергетиці є контроль стану електрообладнання, що обертається. Надійний контроль стану обмоток є актуальним завданням сучасної технології електротехніки [1].

Високошвидкісні асинхронні двигуни широко використовують у промисловості та сільському господарстві [2]. Втрати високошвидкісного двигуна безпосередньо впливають на ефективність перетворення енергії. Для реалізації швидкого та точного розрахунку втрат у роботі [2] на етапі проектування двигуна встановлено аналітичні моделі втрат змінного струму обмотки та втрат ротора високошвидкісного двигуна, що живиться інвертором. Ґрунтуючись на принципі еквівалентності площ, прийнятий пошаровий метод для обліку впливу типу паза статора та нерівномірного розподілу провідників у пазі. Крім того, аналітична модель втрат змінного струму обмотки може враховувати вплив радіального магнітного поля та просторових гармонік. Ефект вихрових струмів, гістерезису та насичення ротора можуть бути враховані за допомогою методу пошарового аналізу. Гармонійний розподіл фазної напруги та фазного струму виходить шляхом схемного моделювання. На цій основі розраховуються втрати змінного струму обмотки та втрати ротора за умови живлення інвертора. Крім того, вивчається вплив частоти струму, діаметра провідника та коефіцієнта несучої частоти на втрати змінного струму в обмотці, а також вплив довжини повітряного зазору та коефіцієнта несучої частоти на втрати в роторі. Крім того, у роботі [2] створено експериментальну платформу для визначення характеристик втрат і наростання температури високошвидкісного двигуна, а також перевірено точність аналітичних розрахунків та кінцевоелементного моделювання за допомогою експерименту з наростання температури в обмотці та експерименту з втрат у роторі.

Двигуни з ротором, що обертається, широко цінують за високу швидкість, підхід у конструктивному виконанні заповнення пазів, низький опір струму тощо [3]. Для досягнення високої продуктивності необхідно ретельно контролювати робочу температуру ЕД, оскільки висока температура може прискорити зменшення ресурсу двигуна й навіть призвести до його відмови [4]. Тому в роботі [5] запропоновано новий підхід до керування тепловим режимом обмоток електричних машин в умовах високих навантажень.

У статті [6] розглядається співвідношення між електричними та магнітними навантаженнями для конструкції повністю надпровідного електричного двигуна. На підставі отриманих результатів автори припускають, що машини з більш високим електричним навантаженням можуть мати вищу щільність вихідної потужності при нижчому ККД та коефіцієнт потужності. Тому економічна та ефективна конструкція електродвигуна вимагає знання точних значень теплопровідності всіх компонентів. Теплопровідність обмотки – складний параметр для визначення та покращення [7]. Сучасні технології дають змогу регулювати перебіг процесів автоматично без втручання персоналу для різних електричних двигунів [8]. Тому для збільшення рівня можливостей, зокрема крутного моменту, у роботі [9] використовуючи один і той самий магнітний контур, об'єднано два різні типи обмоток. Одна з них – обмотка з повітряним зазором, яка встановлюється безпосередньо на задній стінці статора, використовуючи магнітне поле в повітряному зазорі для створення сил Лоренца, що діють на обмотку й забезпечують одну частину моменту, що крутить. Інша – пазова обмотка, яка фіксується всередині невеликих пазів задньої стінки статора, створюючи магнітні сили і вносячи другу частину моменту, що крутить. Це призводить до надлегкої, ефективної, динамічної та високомоментної електричної машини для широкого спектра застосування.

Як наслідок зі сказаного, дослідження обмоток електричного двигуна є актуальними з метою покращення вольт-амперних та тягових характеристик.

Формулювання мети статті. Метою статті є аналіз можливості зміни конструкції обмоток електричного двигуна з метою:

- збільшення його потужності;
- раціонального використання габаритних розмірів електричного двигуна.

Визначена проблематика дослідження стосується безпосередньо конкретних варіантів електричних двигунів, де довжина петлі на виході з активної сталі є досить великою. З метою раціонального використання ресурсів та потужності дослідження спрямовано на аналіз можливості покращення характеристик електродвигуна шляхом внесення змін у конструкцію (довжину петлі) витка котушки електричного двигуна.

Основна частина. Конструкція електродвигуна, представленого в дослідженні, є класичною. З метою проведення конструктивного аналізу виконання обмоток електричного двигуна з погляду довжини витка використано електричний двигун АИУ100L2У2,5 (рис. 1) потужністю 5,5 кВт зі швидкістю обертання вала 2856 об./хв.



Рис. 1. Електричний двигун АИУ100L2У2,5

Електричний двигун, що має досить високу потужність, використовують з метою приведення в дію різного устаткування в сільськогосподарському та промисловому виробництві. Габаритні розміри електричного двигуна становлять 385 мм довжини, 215 мм висоти та 205 мм ширини. З погляду конструктиву, такий електричний двигун має у своєму складі обмотки з мідного проводу. Класифікацією на маркування електричного двигуна указано:

- АИУ – тип електродвигуна;
- 100 – умовний габарит;
- L – позначення довжини сердечника;
- 2 – число полюсів (1 пара полюсів);
- У2 – категорія розміщення.

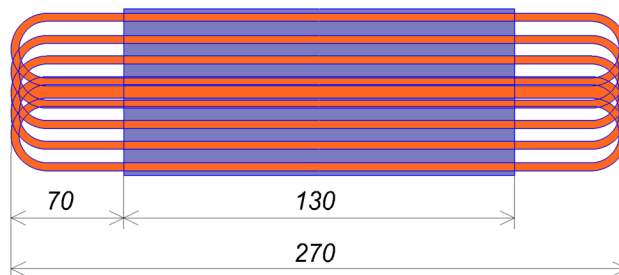


Рис. 2. Розміри активної сталі та обмоток електричного двигуна АИУ100Л2У2,5

Виконання статора електричного двигуна вказаної марки має певні конструктивні особливості. Зокрема, довжина активної сталі в статорі та роторі електродвигуна становить 130 мм. Лобова частина обмоток становить 70 мм. З огляду на розташування обмоток у статорі електричного двигуна, стає помітним нераціональне використання габаритів електричного двигуна.

Виконання обмотки електричного двигуна, зокрема, довжина витка обмоток у варіанті довжини активності сталі 130 мм та лобової частини (петлі котушки) 70 мм, згідно з рис. 2, становить 700 мм. З урахуванням великого розміру лобової частини обмотки (70 мм), раціональне використання габаритів електричного двигуна доцільно реалізовувати шляхом зменшення петлі витка обмотки електричного двигуна. Унаслідок цього стандартне значення довжини сталі буде незмінним – 130 мм, лобова частина витка буде зменшеною в розмірі. З огляду на це, зі зменшенням довжини витка обмотки електричного двигуна відбиватиметься зменшення опору провідника за виразом:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

де R – електричний опір, Ом;

ρ – питомий опір, Ом·м;

l – довжина провідника, м;

S – площа поперечного перерізу провідника, мм².

Зменшуючи опір витка обмотки електричного двигуна завдяки незмінній напрузі, є можливість збільшити струм за законом Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \text{ А}, \quad (2)$$

де U – напруга, В.

Так, склавши вирази 1 та 2, збільшення сили струму для електричного двигуна відбуватиметься за виразом 3:

$$I = \frac{US}{\rho l}, \text{ А}, \quad (3)$$

Зміна конструкції витків обмотки електричного двигуна призводитиме до зменшення довжини витків за їх незмінної кількості. Заводського виконання указаний електричний двигун має одну пару полюсів, звідси – швидкість обертання вала електродвигуна 3 000 об./хв відповідно до виразу 4:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (4)$$

де: n – синхронна частота, об./хв;

f – частота струму, Гц;

p – кількість пар полюсів.

Виконання котушок електричного двигуна реалізовано в кількості 12 одиниць відповідно до 24 пазів у статорі (2 пази на 1 котушку обмотки електродвигуна). Кількість витків котушки становить 68 одиниць з діаметром проводу 1,25 мм. Довжина одного витка обмотки електричного двигуна становить суму двох довжин активної сталі та двох довжин півкіл (для лобової частини обмотки). Так, довжина витка математичним способом визначатиметься відповідно до виразу 5:

$$l = 2L_a + 2L_p, \quad (5)$$

де: L_a – довжина активної сталі, мм;

L_p – довжина петлі, мм.

$$l_1 = 2 \cdot 130 + 2 \cdot 220 = 700 \text{ мм}$$

У такому разі довжина одного витка для електричного двигуна становить 700 мм. Унаслідок цього зі зменшенням розміру петлі для лобової частини обмотки електричного двигуна, скажімо, до 20 мм (рис. 3), довжина витка становитиме 386 мм відповідно до виразу 5:

$$l_2 = 2 \cdot 130 + 2 \cdot 63 = 386 \text{ мм}$$

Шляхом зменшення довжини петлі на виході з активної сталі в обмотці електричного двигуна з 70 до 20 мм за незмінної довжини витка в активній сталі статора та ротора електричного двигуна довжина витка зменшується із 700 мм до 386 мм, що становить показник в 1,8 раза.

Зменшення довжини витка обмотки електричного двигуна призводитиме, відповідно до виразу 3, до збільшення сили струму за незмінної напруги електричної мережі. Унаслідок цього збільшення сили струму матиме наслідок збільшення потужності електричного двигуна відповідно до виразу 6:

$$P = U \cdot I, \quad (6)$$

Так, зменшення довжини витка обмотки електричного двигуна в 1,8 раза призводитиме до зменшення його опору в стільки разів. Використовуючи закон пропорційності, збільшення сили струму в 1,8 раза призведе до збільшення потужності з 5,5 кВт до 9,9 кВт.

Враховуючи можливість зменшення довжини витка обмотки електричного двигуна шляхом зменшення довжини петлі на виході з активної сталі, що призводить до збільшення потужності, відкритим залишається питання стійкості до перегріву електродвигуна. Збільшення потужності без внесення коректив у структуру статора та ротора (зі збереженням стандартного набору заліза, тобто маси), найімовірніше, призводитиме до збільшення робочої температури електричного двигуна.

Здійснені розрахунки стосуються безпосередньо указаної марки електричного двигуна. Також важливо відмітити, що зменшення довжини петлі на виході з робочої сталі електродвигуна може бути реалізованим на різну довжину. У такому разі розрахунок проведено зі зменшенням довжини петлі з 70 до 20 мм, що призводить за незмінної довжини активної сталі, тобто довжини проводу у витку обмотки активної сталі, із 700 до 386 мм, що становить показник 1,8 раза.

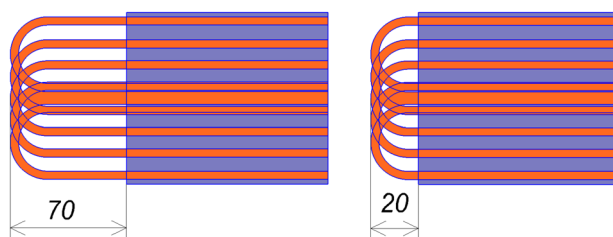


Рис. 3. Зміна розмірів петлі котушки електричного двигуна

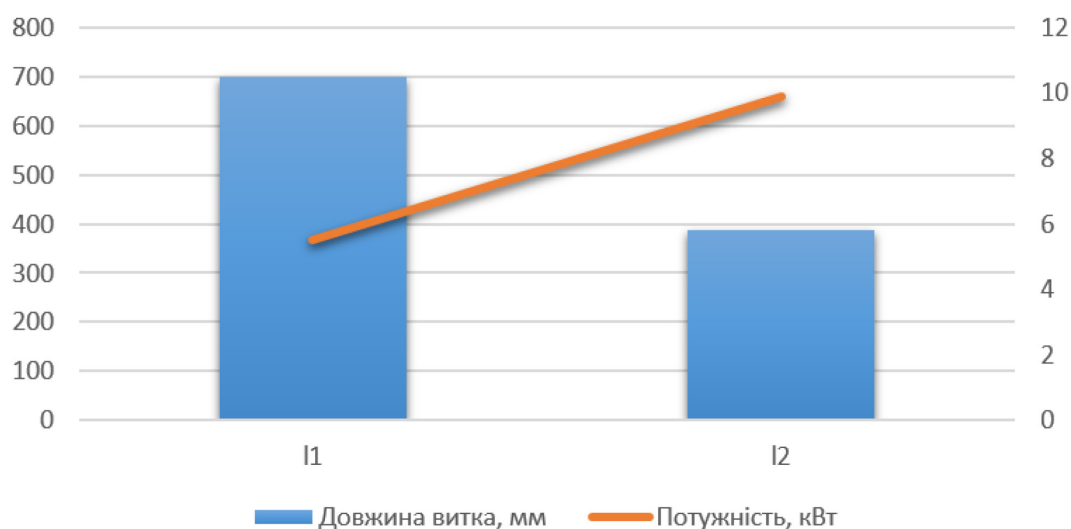


Рис. 4. Діаграма зміни потужності залежно від зміни довжини витка обмотки.

l_1 – стандартна довжина витка; l_2 – видозмінена довжина витка

Висновки. Внесення змін у конструктив електричного двигуна можливе завдяки довжині витка обмотки, що вкладається в пази. З виконанням аналізу конструктивних характеристик обмоток електродвигуна на прикладі конкретного двигуна потужністю 5,5 кВт з однією парою полюсів у роботі розглянуто можливість раціонального використання габаритів електродвигуна, а також потужності, що дається на виході з нього. Установлено, що одна довжина петлі (лобової частини обмотки конкретно обраного електродвигуна) становить більше значення за довжину активної сталі. Унаслідок цього раціональне використання габаритів та ресурсу електродвигуна може бути спрямованим на зменшення петлі в котушці обмотки. Зі зменшення петлі (одразу двох) в кожному з витків котушки обмотки є можливість зменшення опору проводу. Наслідком цього є збільшення сили струму за незмінної напруги електричної мережі відповідно до закону Ома. Збільшення сили струму призводить до збільшення потужності. Подальші дослідження тематики доцільно було б спрямувати на визначення температурних показників електричного двигуна, що будуть змінюватися зі збільшенням сили струму, а отже, і потужності.

Список використаних джерел

1. Mytnikov A. V., Lavrinovich V. A., Evseeva A., Stepanov I. Development of advanced winding condition control technology of electric motors based on pulsed method. *Resource-Efficient Technologies*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.08.001>
2. Xu H., Zhao J., Xion Y., Duan Y. Analysis and calculation of the winding loss and rotor loss of solid rotor induction motors for flywheel energy storage system considering the influence of inverter power supply. *Journal of Energy Storage*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117224>
3. Feng, J., Sun, P., Wei, D., Shi, W., Yang, S., & Zhao, Z. Study on radial Oil Spray Cooling of end windings with Hairpin Motors. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105675>
4. Li X., Zhao X., Zhang Z., Avelin A., Liu S., Li H. Selecting cooling methods for electric motors. *Applied Thermal Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126554>
5. Broumand M., Yun S., Hong Z. A novel phase change material-based thermal management of electric machine windings enabled by additive manufacturing. *Applied Thermal Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122802>
6. Terao Y., Okumura S., Ohsaki H. Study on Electric and Magnetic Loadings in Fully Superconducting Motor Design. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2023.1354399>
7. Stock M., Lohmeyer Q., Meboldt M. Increasing the Power Density of e-motors by Innovative Winding Design. *Procedia CIRP*, 36, 2015. 236–241. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.078>



8. Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В. Особливості вмикання електродвигунів на паралельну роботу при автоматизації процесів у сільському господарстві. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*, 2024. (3 (57), 79–85. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.10>

9. Kasper R., Borchardt N. Boosting Power Density of Electric Machines by Combining Two Different Winding Types. *IFAC-PapersOnLine*, 49, 2016. 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.576>

Стаття надійшла до редакції 20.09.2025

Стаття прийнята 05.10.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



O. Yurchenko, H. Barsukova K. Moroz, M. Novikov, M. Shchebetenko
Sumy National Agrarian University

THEORETICALLY ABOUT THE DESIGN OF ELECTRIC MOTOR WINDINGS WITH THE POSSIBILITY OF IMPROVING THEIR CHARACTERISTICS

Summary

Improving the characteristics of electric motors is possible by changing the design of their windings. Increasing the level of use of electric motors in different industries in different operating modes requires an approach aimed at rational use of resources. In this paper, using the example of a specifically selected electric motor, an analysis of the possibility of increasing its power by reducing the length of the loop in the frontal part of the winding of the electric motor is presented. As a result, reducing the length of the loop in the frontal part from 70 mm to 20 mm for a specific electric motor leads to a reduction in the length of the winding turn by 1.8 times, which thereby makes it possible to reduce the resistance of the coils installed in the slots of the electric motor. Reducing the resistance makes it possible to increase the current strength, and, consequently, the power of this electric motor, as well as rational use of the dimensions of the motor and the wire in the turns of the coils of its windings. Making changes to the design of an electric motor is possible due to the length of the winding turn that is inserted into the grooves. By performing an analysis of the design characteristics of the windings of an electric motor on the example of a specific 5.5 kW motor with one pair of poles, this work considers the possibility of rational use of the dimensions of the electric motor, as well as the power given at its output. It has been established that one loop length (of the frontal part of the winding of a specifically selected electric motor) is greater than the length of the active steel. As a result, rational use of the dimensions and resource of the electric motor can be aimed at reducing the loop in the winding coil. By reducing the loop (two at once) in each of the turns of the winding coil, it is possible to reduce the resistance of the wire. Further research on the topic would be advisable to focus on determining the temperature indicators of an electric motor, which will change with increasing current strength, and therefore power.

Keywords: electric motor, coil, winding, active steel, wire, stator, rotor, pole pairs, power, current, resistance, voltage, resistivity, conductor length, cross-sectional area, overall dimensions, rational use, efficiency improvement.