

ЗАСОБИ ПРОЕКТНОГО СИНТЕЗУ ЗАНУРЕНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ІННОВАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

І.В. Головань^{1*}, канд. техн. наук, **О.М. Попович**^{1**}, докт. техн. наук, **В.О. Поліщук**^{2***}

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

² – Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

E-mail: golovan_77@ukr.net; popovich1955@ukr.net; valemp@ukr.net

Обґрунтовано доцільність у проведенні досліджень у напрямку підвищення енергоефективності занурених асинхронних двигунів завдяки впровадженню комплексу засобів проектного синтезу їхніх інноваційних конструкцій. Розглянуто засоби проектного синтезу занурених асинхронних двигунів інноваційних конструкцій. Їхнє застосування під час реалізації проектування дасть змогу підвищити рівень удосконалення занурених асинхронних двигунів відповідно до вимог для сучасного обладнання в частині надійності, енергоефективності, економичності. Наведено результати реалізації оптимального проектного синтезу асинхронного двигуна зануреного насоса інноваційної конструкції на базі двигуна ПЭДВ 2.8-140 за критерієм максимуму коефіцієнта корисної дії. Бібл. 10, рис. 2, таблиця.

Ключові слова: занурений асинхронний двигун, проектний синтез, енергоефективність.

Застосування традиційних конструктивних схем асинхронних двигунів (АД), технологій виготовлення і проектування забезпечує високу ефективність створення й застосування АД для усереднених експлуатаційних умов. Це досягається завдяки багаторічному досвіду створення АД, корекції розрахункових методик за результатами дослідження натурних зразків АД. Така відпрацьована технологія створення АД ускладнює розробку високоефективних АД спеціалізованого виконання. Особливості застосування АД потребують використання спеціалізованих конструктивних схем і матеріалів, адаптованих до конкретики функціонування машини, а значна вартість створення АД в умовах обмеженого випуску (характерно для АД спеціалізованого виконання) заважає цьому. Прикладами АД за використання спеціалізованих конструктивних схем є АД з масивним ротором як потужних швидкісних машин приводу компресора, турбонасоса, нагнітачів і таке інше [1].

Із появою сучасних технологій, матеріалів та засобів математичного забезпечення проектного синтезу АД, зокрема із застосуванням параметризації польових моделей [2, 3], з'являються нові можливості щодо підвищення їхньої енергоефективності в умовах спеціалізації застосування. Зокрема це стосується занурених асинхронних двигунів насосів.

Під час роботи обладнання занурених насосів основні втрати енергії (у відсотках від спожитої енергії) припадають на втрати в насосі – близько 30 %, у зануреному асинхронному електродвигуні – 13 %, в кабелі – 10 %, близько 9 % енергії втрачається в трансформаторі, станції управління і насосно-компресорних трубах [4]. З огляду на це та задля підвищення енергоефективності видобутку нафти чи підземних вод і зниження втрат активної потужності в струмопровідних елементах електротехнічного комплексу залишається актуальним питання підвищення енергоефективності занурених електродвигунів [5].

Специфіка роботи таких машин пов'язана з умовами їхнього розміщення в трубопроводі обмеженого діаметра, заповнення немагнітного проміжку між статором і ротором рідиною, агресивного впливу цієї рідини на матеріали магнітопроводу й обмоток, вертикальним розміщенням осі обертання ротора та великими навантаженнями на упорний підшипник, живленням АД від довгого кабелю, розміщеного в свердловині. Тому, зважаючи на зазначені особливості роботи, окрім необхідності підвищення енергетичної ефективності, АД свердловинного насоса потребує зниження пускових струмів та механічних втрат на тертя поверхні ротора об воду, збільшення надійності обмотки й підшипника [6].



Метою цієї роботи є обґрунтування використання засобів проектного синтезу занурених асинхронних двигунів інноваційних конструкцій задля підвищення їхньої ефективності.

Під час розробки нової конструкції електродвигуна задля підвищення його енергоефективності необхідно прагнути до максимального використання його поперечного перерізу з урахуванням технологічних особливостей виготовлення, експлуатації, енергетичних параметрів і ступеню використання активних матеріалів.

Ротор існуючого зануреного АД у його поперечному перерізі характеризується низькими електромагнітними навантаженнями. Тобто більша частина площі поперечного перерізу ротора, що відноситься до валу, практично не бере участь у процесах електромеханічного перетворення енергії. З метою підвищення ефективності використання матеріалу ротора перейдемо від конструкції ротора з шихтованих листів електротехнічної сталі до конструкції у вигляді суцільного сталевго елемента. Суцільний сталевий ротор-вал забезпечить можливість ефективного використання як електричних, магнітних, так і механічних властивостей матеріалу в усьому його перерізі. Крім того, з'являється можливість зниження пускових струмів.

Враховуючи технологію отримання шихтованих листів магнітопроводу статора й ротора, що полягає у їхньому одночасному штампуванні, відмовитись також і від конструкції з шихтованих листів електротехнічної сталі в магнітопроводі статора. Альтернативою пакета з шихтованих листів електротехнічної сталі може стати конструкція статора з суцільного матеріалу, отриманого за технологією порошкової металургії.

Розрахунок характеристик АД з безшихтованими магнітопроводами статора та ротора ускладнюється специфікою процесів у ньому, зокрема, тривимірним розподілом магнітного поля, а саме: краєвими ефектами, витісненням магнітного потоку з магнітопроводу вихровими струмами, нелінійністю параметрів та несинусоїдністю процесів. Найбільш точно таку задачу можна розв'язати методом скінченних елементів (МСЕ) у тривимірній постановці. Але це потребує значних ресурсів обчислювальної техніки і в практиці проектування АД частіше використовується для тестування більш простих моделей. Навіть у разі використання розрахунку магнітного поля методом скінченних елементів у двовимірній постановці задачі безпосереднє визначення параметрів робочого режиму за результатами розв'язання польової задачі потребує великих витрат машинного часу, що пов'язано з великою кількістю ітерацій. Ефективність методів проектування можна суттєво покращити, якщо використовувати точні польові підходи для визначення залежностей зміни інтегральних параметрів АД і застосовувати їх під час розрахунків режимів роботи. У зв'язку з чим, для створення ефективних конструкцій АД з безшихтованими магнітопроводами та дослідження режимів їхньої роботи розроблена математична модель визначення параметрів ротора таких двигунів [2, 3].

Розроблена математична модель визначення параметрів ротора АД з безшихтованими магнітопроводами враховує параметри магнітного поля в роторі по боковій, торцевій поверхнях, у лобових зонах і дає змогу отримати квазітривимірний розв'язок задачі, який враховує особливості складного тривимірного розподілу магнітного поля. Ця модель дозволяє підвищити ефективність проектування таких АД завдяки достатньо точному визначенню параметрів магнітного поля ротора МСЕ і мінімізації кількості польових розрахунків у разі визначення нелінійних залежностей зміни параметрів ротора для подальшого їхнього використання під час розрахунків параметрів експлуатаційних режимів АД коловими методами.

Визначення параметрів АД з безшихтованими магнітопроводами виконується за застосування математичної моделі, в якій всі процеси в роторі, у тому числі й в масивному магнітопроводі з розподіленими вихровими струмами, еквівалентуються процесами в еквівалентних контурах струмів із зосередженими параметрами [2, 3]. Умовами еквівалентування є рівність втрат активної енергії та енергії магнітного поля за однакової величини магнітного потоку взаємної індуктивності статор-ротор та частоти.

Урахування нелінійних властивостей параметрів АД із безшихтованими магнітопроводами здійснено завдяки визначенню їхньої функціональної залежності від незалежних змінних за кожного значення ковзання. Параметри за основним полем є функціями коефіцієнта насичення магнітного поля, що залежить від сумарної МРС машини. Активний опір та

індуктивність розсіювання роторного контура за фіксованого ковзання залежать від роторного струму. Розрахунок параметрів магнітного кола за наявності двох шляхів потоку взаємної індуктивності (торцями та боковою поверхнею) здійснюється за умови їхнього паралельного з'єднання, тобто за однакових значень падіння магнітного потенціалу на цих ділянках. Для визначення параметрів еквівалентних контурів ротора з безшихтованим магнітопроводом під час розв'язання польової задачі в квазітривимірній постановці проводиться узгодження сформованих залежностей параметрів, що отримані без урахування взаємного впливу один на одного процесів в боковій і торцевій поверхнях та лобовій зоні.

Реалізація оптимізаційного проектного синтезу зануреного асинхронного двигуна з безшихтованим статором і ротором за критерієм максимуму ККД здійснена з використанням математичної моделі розрахунку параметрів асинхронного двигуна з безшихтованим магнітопроводом. За базову модель зануреного асинхронного двигуна візьмемо асинхронний двигун потужністю $P_2=2800$ Вт ПЭДВ 2.8-140. Геометричні параметри магнітопроводу статора та обмоточні дані АД, що підлягають оптимізації, залишаються незмінними [7]. Коефіцієнт заповнення міддю паза серійної машини $k_{3,п.} = 0.1536$.

Конструкція ротора являє собою суцільний сталевий масив з пропилами та мідними короткозамикаючими кільцями в лобових його частинах. Ротор виконаний з конструкційної сталі з електричною провідністю $\gamma=5e6$ Ом/м. Електромагнітні параметри ділянки короткозамикаючого кільця становлять активний опір $r_k=4.2e^{-7}$ Ом, індуктивність розсіювання $L_k=8.8e^{-9}$ Гн.

За параметри оптимізації прийняті параметри масивного феромагнітного ротора, а саме глибина $0.02 \text{ м} \leq h_z \leq 0.034 \text{ м}$ та ширина $0.0005 \text{ м} \leq b_z \leq 0.0012 \text{ м}$ прорізів. Кількість прорізів z не змінна і прийнята на рівні 42 од.

До умов оптимізації відноситься величина допустимих за нагрівом обмотки втрат, що відповідає гріючим втратам серійної машини $P_{гр} = 690$ Вт. До гріючих обмотку втрат були віднесені всі, за винятком механічних втрат в машині: в магнітопроводі та обмотці статора; в сталі ротора (яка є як магнітопроводом, так і струмопроводом); від вищих гармонік магнітного поля.

На відміну від серійної машини структура магнітопроводу статора, оптимізованого за критерієм максимуму ККД двигуна, характеризується закритими пазами та відсутністю ізолюючої труби на її внутрішній поверхні. Матеріал магнітопроводу статора – суцільний магнітом'який композит Somaloy 130i 5p [8] з електричним опором $20000 \mu\Omega\text{м}$ та магнітною характеристикою на рис. 1.

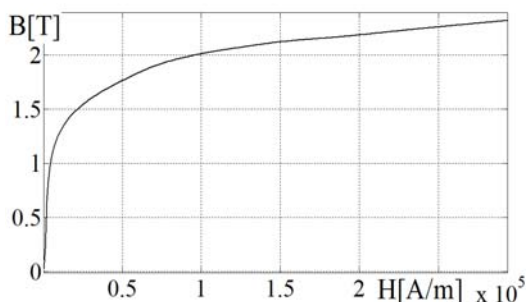


Рис. 1

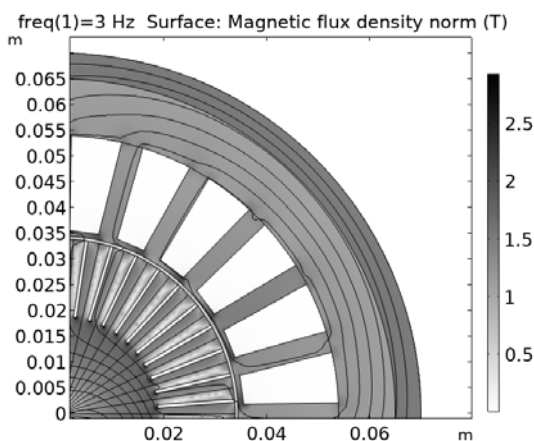


Рис. 2

З метою визначення величини додаткових втрат за вищими гармоніками поля проводилась, за зміни кутової швидкості ротора ω_r та модуля комплексу струму статора $|\dot{I}_s|$, серія розрахунків електромагнітного нестационарного поля в 2D-постановці розрахункової області АД [9]. Практичну відсутність додаткових втрат за вищими гармоніками поля можна пов'язати з наявністю достатньо великого повітряного проміжку й містка закриття пазу.

За результатами проведеного пошуку екстремуму, реалізованого на основі методу градієнтного спуску за алгоритмом послідовного квадратичного програмування, було отримано оптимальну за критерієм максимуму ККД асинхронного двигуна конструкцію ротора з параметрами $h_z=0.03$ м та $b_z=0.00062$ м.

На рис. 2 наведено конструкцію двигуна, оптимізованого за критерієм максимуму ККД, з розпо-

ділом магнітного поля в його поперечному перерізі, яка отримана за результатами проектного синтезу в комп'ютерному середовищі програм Matlab/Simulink [10] та Comsol Multiphysics.

У таблиці наведено режимні параметри як серійного двигуна ПЕДВ 2.8-140, так і оптимізованого за критерієм максимуму ККД асинхронного двигуна інноваційної конструкції. За проведенням оптимізаційним проектним синтезом на базі двигуна ПЕДВ 2.8-140 було спроектовано машину з ана-

Режимні параметри	Серійний двигун	Оптимізований за критерієм максимуму ККД
Робочий момент на валу (Nm)	10.3	10.3
ККД (%)	74.5	74.4
Cos φ	0.81	0.72
Струм робочого режиму (A)	7.0	7.9
Струм пускового режиму (A)	41	32
Пусковий момент на валу (Nm)	28	22
Гріючі втрати (W)	690	690
Механічні втрати (W)	267	252
Втрати в сталі (W)	180	90
Додаткові втрати від вищих гармонік поля (W)	19	≈ 0
Втрати в обмотці статора (W)	328	415

логічним серійній машині ККД – 74.5 %. Можна бачити, що найбільшого зниження втрат в оптимізованій машині було досягнуто в частині втрат у сталі. Зменшення втрат у сталі статора стало наслідком застосування магнітно-м'якого композиту з високим електричним опором. Через збільшення струму обмотки статора втрати в ній відповідно теж зросли (таблиця).

Завдяки характерним особливостям, які притаманні АД з масивним феромагнітним ротором, отримуємо зменшення пускового струму, величина якого має особливе значення через велику довжину живильного кабелю.

Слід зауважити, що отримана конструкція АД є оптимальною за критерієм максимального значення ККД за умови варіювання тільки двох параметрів оптимізації: h_z та b_z . Очевидно, що для отримання повноцінної оптимальної конструкції, що передбачатиме проведення оптимізаційного проектного синтезу вже за багатьма параметрами оптимізації, постає задача подальшого удосконалення розроблених математичних засобів проектного синтезу.

Висновки. На наведеному в роботі прикладі проектного синтезу зануреного асинхронного двигуна з безшихтованими магнітопроводами обґрунтовано доцільність застосування розроблених засобів проектного синтезу асинхронних двигунів інноваційних конструкцій для підвищення їхньої енергоефективності. Завдяки поєднанню під час реалізації проектування спеціалізованої конструктивної схеми виконання ротора, досягнень в області сучасних технологій та матеріалів, а саме використання суцільного магнітопроводу з магнітно-м'якого композиту Somaloy 130i 5p, виготовленого за технологією порошкової металургії, розроблених математичних засобів проектування зі створенням параметризованих польових математичних моделей асинхронних двигунів вдалося спроектувати занурений асинхронний двигун на базі ПЕДВ 2.8-140 з суттєвим покращенням його пускових властивостей і з ККД робочого режиму на рівні базового АД.

Роботу виконано за держбюджетною темою “Наукові засади та засоби комплексного проектного синтезу асинхронних машин енергоефективних і ресурсозберігаючих електромеханічних систем” (шифр «АСЕЛМА-К»). Державний реєстраційний номер 0117U00771., КПКВК 6541030.

1. Pyrhonen J., Nerg J., Kurrnen P. and Lauber U. High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression. in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Jan. 2010. Vol. 57. No 1. Pp. 272–280. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2021595>
2. Попович О.М., Головань І.В. Уточнення аналізу режимів роботи асинхронних двигунів у складі електромеханотронних систем еквівалентуванням їх польових моделей коловими. *Техн. електродинаміка*. 2014. № 5. С. 113–115.
3. Golovan I.V. The parametrization method of generalized induction motor using the field analysis for design. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techne2019.05.049>
4. Мартюшев Д.Н. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН. *Инженерная практика*. 2011. № 6. С. 72–77.

5. Bafghi B., Vahedi A. A Comparison of Electric Motors for Electrical Submersible Pumps Used in the Oil and Gas Industry. Proc. 2nd International Conference on Engineering Sciences. 2nd International Conference on Engineering Sciences. Kerbala, Iraq, March 26-27, 2018. Vol. 433. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/012091>.
6. Optimised water solutions. Pumps and systems for water supply and wastewater challenges. URL: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400718.pdf> (accessed: 15.05.2022).
7. Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.Г. Погружные асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1983. 168 с.
8. Somaloy, powders for electromagnetic applications. URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/soft-magnetic-composites/products/coated-powders-for-electromagnetic-applications/> (accessed: 15.05.2022).
9. Головань І.В. Визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками електромагнітного поля в асинхронному двигуні. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 44. С. 82–88.
10. Ramin S.E. Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB. Taylor&Francis Group, 2017. 471 p.

THE DESIGN SYNTHESIS TOOLS OF SUBMERSIBLE INDUCTION MOTORS OF INNOVATIVE CONSTRUCTURES

I.V. Golovan¹, O.M. Popovych¹, V.O. Polishchuk²

¹ – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

² – Institute of Energy Saving and Energy Management NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

E-mail: golovan_77@ukr.net, popovich1955@ukr.net, valemp@ukr.net

The expediency of conducting research in the direction of improving the energy efficiency of submersible induction motors due to the introduction of a set of tools for the design synthesis of their innovative designs was reasoned. Means of design synthesis of submersible induction motors of innovative designs are considered. The combination of which in the implementation of the design will allow to increase the level of improvement of submersible induction motors in accordance with the requirements for modern equipment, such as: reliability, energy efficiency, economy. The results of realization of the induction motor optimal design synthesis of the submersible pump of an innovative design on the basis of the ПЭДВ 2.8-140 motor by criterion of a maximum efficiency are resulted. Ref. 10, fig. 2, table.

Key words: submersible induction motor, design synthesis, energy efficiency.

1. Pyrhonen J., Nerg J., Kurrnen P. and Lauber U. High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression. in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Jan. 2010. Vol. 57. No 1. Pp. 272–280. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.202159>
2. Popovich O.M. Golovan I.V. Refinement of analysis operation of induction motors as part electromechanical systems using equivalent field models using electrical circuits. *Tekhnichna elektodynamika*. 2014. No 5. Pp. 113–115. (Ukr)
3. Golovan I.V. The parametrization method of generalized induction motor using the field analysis for design. *Tekhnichna elektodynamika*. 2019. No 5. Pp. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.05.049>
4. Martyushev D.N. An integrated approach to energy efficiency in oil production IECР. *Inzhenernaia praktika*. 2011. No 6. Pp. 72–77. (Rus)
5. Bafghi B., Vahedi A. A Comparison of Electric Motors for Electrical Submersible Pumps Used in the Oil and Gas Industry. Proc. 2nd International Conference on Engineering Sciences. Kerbala, Iraq, March 26-27, 2018. Vol. 433. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/433/1/012091>.
6. Optimised water solutions. Pumps and systems for water supply and wastewater challenges. URL: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400718.pdf> (accessed: 15.05.2022).
7. Schastlivyy G.G., Semak V.G., Fedorenko G.G. Submersible induction motors. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 168 p. (Rus)
8. Somaloy, powders for electromagnetic applications. URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/soft-magnetic-composites/products/coated-powders-for-electromagnetic-applications/> (accessed: 15.05.2022).
9. Golovan I.V. Determination of losses after ultraharmonic electromagnetic field in the induction motor. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2016. V. 44. Pp. 82–88.
10. Ramin S.E. Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB. Taylor&Francis Group, 2017. 471 p.

Надійшла: 15.09.2022

Прийнята: 28.09.2022

Submitted: 15.09.2022

Accepted: 28.09.2022