

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З СУЦІЛЬНИМ ОСЕРДЬЯМ ЗАНУРЕНОГО СВЕРДЛОВИННОГО НАСОСУ ЗА ЗБІЛЬШЕНОЇ ЧАСТОТИ ЖИВЛЕННЯ

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

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: golovan_77@ukr.net; popovich1955@ukr.net.

² Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

Представлено результати оптимізаційного параметричного синтезу асинхронного двигуна з суцільним осердям зануреного свердловинного насоса за подвоєної частоти живлення. Запропонована методологія синтезу, що базується на слабкозв'язаній коло-польовій математичній моделі з ітераційною параметризацією результатів польового аналізу, яка дає змогу врахувати нелінійні магнітні властивості, наведені струми в роторі, додаткові втрати в масивному ферромагнітному роторі, взаємодію усіх елементів електромеханічної системи. За критерієм максимуму ККД асинхронного двигуна з суцільним осердям зануреного свердловинного насоса визначено оптимальні значення варіюємих конструктивних параметрів з урахуванням величини навантаження за частоти живлення 50 і 100 Гц. Результати дослідження свідчать про суттєве покращення ефективності системи: збільшення продуктивності водопідйому у 2,2 раза, підвищення ККД двигуна на 4 %, скорочення терміну окупності свердловини у 1,9 раза та зменшення кількості робочих коліс насоса у 3 рази. Обґрунтовано конструктивні рішення для АД із суцільним масивним ротором-валом та розбірним статором з порошкового матеріалу і закритими пазами, що сприяють зниженню втрат у міді, сталі та рідині. Запропоновані технічні рішення створюють передумови для проектування оптимізованих ЕМС занурених свердловинних насосів із покращеними показниками капітальних та експлуатаційних витрат. Бібл. 20, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: асинхронний двигун, свердловинний насос, суцільне осердя, слабкозв'язана коло-польова математична модель.

Асинхронні електричні машини є основним засобом перетворення електричної енергії до механічної завдяки сукупності позитивних властивостей: дешевизні й надійності, конструктивної простоти; можливості ефективної інтеграції як з елементами систем живлення, так і робочих механізмів; достатньо високій енергетичній ефективності у динамічних і статичних режимах роботи. Дані позитивні властивості є наслідком індукційного принципу безконтактного створення електричного струму у роторі, що супроводжується омичними втратами.

Коректний вибір та обґрунтування систем електромеханічного перетворення енергії доцільно здійснювати на основі комплексних критеріїв ефективності, які визначаються співвідношенням корисного результату функціонування системи і обсягів витрачених ресурсів [1]. При цьому можливі ситуації, коли асинхронна машина (АМ) програє у ефективності процесів перетворення електричної енергії у ній до механічної, але забезпечує кращу ефективність системи за комплексними критеріями, завдяки своїм конструктивним і режимним інтеграційним властивостям. Широке впровадження комплексних підходів до практики створення ефективних електромеханічних систем (ЕМС) з інтегрованими АМ потребує створення і залучення наукоємних засобів їх комплексного дослідження і проектування. Це стосується як комплексних моделей дослідження режимів ЕМС із визначенням величини комплексних критеріїв ефективності [1], так і ефективних засобів проектування АМ як елемента ЕМС з урахуванням широкого кола варіювання конструктивних і режимних параметрів.

© Головань І.В., Попович О.М., Шевчук С.П., 2026
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-5250-6981>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9238-5782>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-7517-0501>

© Видавець ВД «Академпериодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Прикладом ЕМС, що широко поширені і висувають високі вимоги до інтеграційних властивостей асинхронних двигунів (АД), є системи занурених свердловинних насосних агрегатів, наприклад, для водопостачання або нафтовидобування. Їхні специфічні особливості пов'язані із обмеженням зовнішніх діаметрів, збільшенням механічних втрат АД внаслідок тертя ротора о рідину, підвищених вимог до вібраційної стійкості ротора за його великої довжини, забезпеченням надійної роботи багатовиткової обмотки статора в умовах агресивного середовища, живлення АД від довгої лінії. Задля підвищення ефективності ЕМС занурених свердловинних насосів розробники намагаються знайти оптимум між тенденцією зниження діаметру свердловини (для зменшення її вартості) і збільшення зовнішнього діаметру АД (задля мінімізації його довжини за заданої потужності). Під час пошуку такого оптимуму можуть досліджуватися специфічні особливості конструкцій і режимів.

1) Підвищення частоти живлення і, відповідно, обертання магнітного поля забезпечує більшу потужність АД у габариті машини, продуктивність, напір робочого колеса насоса і дає можливість зменшення числа його ступенів. Недоліком такого рішення є ускладнення роботи упорного підшипнику в умовах підвищених швидкостей, хоча зменшення кількості ступенів зменшує вагу рухомої частини насосного агрегату, а також збільшення втрат на тертя о рідину [3, 4].

2) Суміщення конструктивних елементів АД і ярем магнітопроводів забезпечує зменшення зовнішнього діаметру, але погіршує електромагнітні характеристики двигуна традиційної конструктивної схеми.

3) Ізоляція багатовиткової обмотки від рідини за допомогою гільзи з аустенітної сталі або пазів статора закритої конструкції покращує надійність машини, але при цьому збільшується немагнітний проміжок між статором і ротором, величина потоку розсіювання.

Перспективним напрямом практичної реалізації з урахуванням перелічених особливостей є використання конструктивних схем АД із масивним ротором та суцільним магнітопроводом статора, виготовленим за технологією порошкової металургії [2]. Це відкриває нові можливості для оптимізації габаритно-вагових параметрів і зниження втрат у вузлах машини. Зокрема, масивний ротор ефективно інтегрується з валом, що дає змогу зменшити діаметр розточки статора. Для масивнороторних АД доцільне збільшення немагнітного проміжку [5], що також сприяє зменшенню гідродинамічних втрат від тертя ротора об рідину. Застосування порошкових матеріалів для виготовлення суцільного магнітопроводу статора дає змогу змінити традиційну конструктивну схему та адаптувати конструкцію АД до особливостей роботи у складі свердловинного насосного агрегату.

Ефективне проектування АД інноваційних конструкцій, у тому числі масивнороторних, можна здійснити із залученням слабкозв'язаних коло-польових моделей асинхронного двигуна [6], які забезпечують точність польових і швидкодію колових моделей завдяки ітераційним алгоритмам розв'язку систем рівнянь електричних кіл і електромагнітного поля і параметризації результатів польового аналізу [7].

Метою даної роботи є обґрунтування ефективності застосування АД з суцільним осердям за збільшеної частоти живлення у складі ЕМС зануреного свердловинного насоса в рамках комплексного дослідження. Задля досягнення даної мети буде: розроблено комплексну математичну модель ЕМС свердловинної насосної установки; визначено критерії ефективності системи; розроблено конструктивну схему АД та визначено сукупність варіативних конструктивних і режимних параметрів, що змінюються під час оптимізаційного параметричного синтезу; здійснено пошук оптимального варіанту та обґрунтовано його переваги з огляду на енергетичну ефективність і термін окупності капітальних вкладень.

Комплексна математична модель насосного агрегату свердловини складена, спираючись на серійний варіант системи: ЕЦВ6-4-100 з АД ПЕДВ 6-3. Відцентровий трифазний свердловинний занурений насосний агрегат ЕЦВ6-4-100 з АД ПЕДВ6-3 працює за внутрішнього діаметру обсадної труби $6 \times 25.4 = 152,4$ мм із каталоговими параметрами: подача $4 \text{ м}^3/\text{год.}$; напір 100 м; потужність АД 3 кВт. При цьому, за номінальної швидкості $n_n = 2850 \text{ об/хв}$ має подачу $5,4 \text{ м}^3/\text{год.}$, яка відповідає максимуму ККД насоса 0,575 і потужності приводного АД 2,87 кВт. За нульової подачі напір становить: $H_0 = 117 \text{ м}$. У припущенні, що довідникові дані надано за сталої швидкості, інформація для апроксимації напірних характеристик: на початку робочого відтинку координати ($y \text{ м}^3/\text{год}$ і m) становлять – ($Q'=3$; $H'=110$), а у кінця – ($Q''=6$; $H''=80$) із споживанням у цій точці номінальної

потужності АД, що має місце за величини ККД насосу 0,568. Апроксимаційні залежності напору насосу (H) і ККД (η) від подачі (Q) і швидкості (n) мають вигляд [8]

$$H = H_0(n/n_n)^2 + A Q n / n_n - B Q^2; \quad \eta = \eta_m \left(1 - \left| \frac{Q \cdot n_n}{q Q_n \cdot n} - 1 \right|^{2.3} \right) \begin{cases} \eta_m = \eta_n \left[1 - \left(\frac{n}{n_n} - 1 \right)^{2m} \right], n \leq n_n \\ \eta_m = \eta_n \left[1 - \frac{\eta_n - \eta''}{(n'' - n_n)^2} (n - n_n)^2 \right], n \geq n_n \end{cases}, \quad (1)$$

де константи: $A = \frac{(H' - H_0)Q''^2 - (H'' - H_0)Q'^2}{Q'Q''(Q'' - Q')}$; $B = \frac{(H' - H_0)Q'' - (H'' - H_0)Q'}{Q'Q''(Q'' - Q')}$; $m = \frac{\ln(1 - \eta'/\eta_n)}{\ln(n'/n_n - 1)^2}$;

інформація з каталогових характеристик: H_0 – величина напору за нульовій подачі; Q_n, η_n, n_n – номінальні подача, ККД, швидкість обертання; (Q' ; H'), (Q'' ; H'') – координати початку та кінця робочої ділянки напірної характеристики; η' , η'' – величини максимумів ККД насоса за швидкостях n' , n'' , меншій та більшій за номінальну відповідно; q – коефіцієнт налаштування апроксимаційних характеристик напору і ККД на перетин нуля за однакової подачі (у даному випадку $q = 0,942$).

Момент опору M_{on} на валу АД внаслідок впливу потоку рідини на робоче колесо насоса (визначається у H за подачі у м³/год., напору у метрах, швидкості обертання у об/хв.) і його початкова величина M_{on0} (задля подолання невизначеності відношення подачі до ККД на початку розрахунку задаються початкові значення Q_{01} ; η_{01}) розраховуються за виразами

$$M_{on} = \frac{\rho g Q H}{120 \eta \pi n}; \quad M_{on0} = \frac{\rho g Q_{01} H_0 (n/n_n)^2}{120 \eta_{01} \pi n}.$$

Підвищення ефективності конструктивних рішень і робочих режимів ЕМС напірного переміщення рідини потребує досліджень в умовах зміни швидкості обертання n , подачі Q і напорів H . Задля розв'язку таких задач за допомогою математичного моделювання використовуються апроксимаційні залежності напірних характеристик насосів (1) [8], у яких використано інформацію про величину напору за нульової подачі H_0 і констант A, B . Величина даних констант визначається за індивідуальними експлуатаційними характеристиками насосів, які побудовано для сталої швидкості обертання (1). У випадку дослідження моноблочних насосних агрегатів (наприклад, занурених свердловинних насосів) інформацію про залежність напору від подачі наведено в умовах зміни ковзання АД із завантаженням, що ускладнює визначення величини констант A, B . Для цього випадку за умови лінійності робочого відтинку механічної характеристики запишемо усталені співвідношення між швидкостями (n_0 – синхронна швидкість) і корисними моментами АД M у кН для номінального і поточного режимів, а також вираз у кВт споживаної потужності P насосу, який має k послідовно з'єднаних однакових робочих коліс, кожне з яких у i -му усталеному режимі (корисний момент двигуна M дорівнює моменту опору M_{on} , обумовленому насосом) за подачі Q_i створює напір H_{ki} і перетворює механічну енергію з валу до гідравлічної із ККД η_i

$$\frac{n_0 - n_n}{M_n} = \frac{n_0 - n}{M}; \quad P = \frac{g Q_i k H_{ki}}{3600 \eta_i}; \quad M_n = \frac{30 P_n}{n_n \pi}; \quad M = M_{on} = \frac{30 P}{n \pi} = \frac{g Q_i k H_{ki}}{120 n \pi \eta_i}. \quad (2)$$

Сумісний аналіз рівнянь (1)-(2) показує, що задля уточнення визначення величини констант H_0, A, B потрібно сумісно розв'язати для трьох режимів ($i=1,2,3$) наступні нелінійні рівняння (відносно даних констант, а також n_1, n_2, n_3):

$$\begin{cases} k H_{ki} = k H_{k0} (n_i / n_n)^2 + A Q_i n_i / n_n - B Q_i^2; \\ \frac{(n_0 - n_n) n_n \pi}{30 P_n} = \frac{n_i (n_0 - n_i) 120 \pi \eta_i}{g Q_i k H_{ki}}. \end{cases} \quad (3)$$

Для дослідження режимів роботи трифазного свердловинного зануреного насосного агрегату

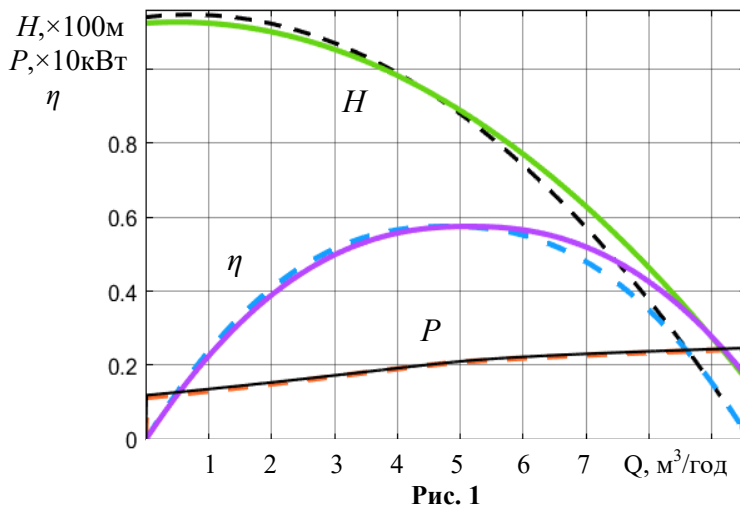


Рис. 1

Дані уточнені залежності (суцільні лінії) наведено на рис. 1 у порівнянні із результатами за (1), (пунктирні лінії), які не враховують зміну швидкості у вихідних даних. Видно, що за номінального режиму результати збігаються, а вагомість уточнення більша, чим більше режим відхиляється від номінального. Наприклад, за подачі $7 \text{ м}^3/\text{год}$ уточнення напору становить 10,2 %.

Комплексна математична модель ЕМС, що включає свердловинний насосний агрегат із зануреним АД, трубопровід та свердловину, повинна забезпечити порівняльне дослідження енергетичної ефективності технічних рішень свердловинних насосних агрегатів за зміни частоти мережі живлення [9–11]. Порівняльний аналіз здійснюється за результатами дослідження усталених режимів роботи ЕМС. Враховуючи складний нелінійний характер рівнянь її складових, розв'язок системи алгебраїчних рівнянь є складною задачею внаслідок проблем збіжності ітераційних розрахунків. Задля подолання даної проблеми у роботі результати розрахунку параметрів усталених режимів роботи визначаються за розв'язком диференціальних рівнянь електричної, механічної, гідравлічної рівноваги до усталеного стану, що ефективно здійснюється у системі імітаційного моделювання. Математичну модель насосу наведено вище. Кутова швидкість його обертання ($\omega_r = n\pi/30$) в усталеному режимі роботи визначається за розв'язком перехідних процесів до усталеного стану із використанням диференціального рівняння механічної рівноваги між корисним моментом АД і моментом опору насосу (2), який визначається його напором, продуктивністю і ККД із урахуванням зведеного до валу АД моменту інерції рухомих частин приводу (J)

$$\frac{d\omega_r}{dt} = (M - M_{on})/J. \quad (4)$$

Величина параметрів робочого режиму, яка залежить від співвідношення характеристик насосу і гідравлічної мережі (трубопроводу і свердловини), знаходиться за розв'язком рівняння рівноваги між напором насосу і втратами напору у мережі. Величина продуктивності, яка відповідає умовам даної рівноваги, визначається за розв'язком диференціального рівняння зміни продуктивності. Воно сформовано відповідно до другого закону Ньютона стосовно переміщення рідини трубопроводом. Оскільки на визначення параметрів усталеного режиму не впливає характер перехідних процесів, маса, що переміщується, визначається спрощеним виразом: $\rho L \pi d^2/4$ (де ρ , L , d – густина рідини, довжина і діаметр трубопроводу). Силовий вплив на дану масу, який є пропорційним різниці напору насосу (H) і втрат напору у мережі ($H_M = H_r + RQ^2$, де H_r , R – геодезичний напір і опір трубопроводу), становить: $\rho g(H - H_M) \pi d^2/4$. Враховуючи, що інтеграл від швидкості рідини за площею перетину трубопроводу є подачею, отримано вираз похідної від подачі

$$\frac{dQ}{dt} = g \pi d^2 (H - H_r - RQ^2) / 4L. \quad (5)$$

Величина геодезичного напору визначається відстанню від поверхні до рівня води у свердловині. За нульової подачі даний рівень відповідає рівню ґрунтових вод. Із збільшенням подачі величина геодезичного напору буде збільшуватися внаслідок зниження рівня води у свердловині на

з $k = 9$, ЕЦВ 6-4-100 із АД ПЕДВ 6-3 визначимо величини констант апроксимаційної залежності напірної характеристики за наступними режимами: ($Q_1=3$; $H_{k1}=110/9$; $\eta_1=0,479$); ($Q_2=5,4$; $H_{k2}=87,6/9$; $\eta_2=0,575$); ($Q_3=6$; $H_{k3}=80/9$; $\eta_3=0,568$). При цьому: $n_0=3000$; $n_n=2850$; $P_n=3$. Результати розв'язку системи нелінійних рівнянь (3) за наведеними вихідними даними із залученням засобів системи МАТЛАБ (блок *Algebraic Constraint*) використано під час побудови розрахункових експлуатаційних характеристик насосу ЕЦВ 6-4-100 за номінальної швидкості.

величину падіння напору за фільтрації води у ґрунті. Якщо у номінальному режимі це зниження і геодезичний напір дорівнюють ΔH_{cn} і $H_{Гн}$, то у загальному випадку, за припущення сталості гідравлічного опору фільтрації, можна отримати

$$H_{Г} = H_{Гн} + \Delta H_{cn} (Q^2 / Q_n^2 - 1). \quad (6)$$

Дослідження свердловинної насосної установки виконаємо із урахуванням співвідношення у номінальному режимі між напором насоса і геодезичним: $H_{Гн} = \eta_m H_n$, де ККД трубопроводу η_m , який враховує втрати напору у мережі, приймемо на рівні 0,9. За даних умов у сталому режимі роботи за рівності напору насоса і втрат напору у мережі визначимо опір гідравлічної мережі

$$R = (1 - \eta_m) H_n / Q_n^2. \quad (7)$$

З урахуванням (6), (7) рівняння (5) набуває виду

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{g\pi d^2}{4L} \left(H - \eta_m H_n + \Delta H_{cn} - \frac{\Delta H_{cn} + (1 - \eta_m) H_n}{Q_n^2} Q^2 \right). \quad (8)$$

Комплексна математична модель системи побудована за наступних величин параметрів у (8): $\eta_m = 0,9$; $\Delta H_{cn} = 1$ м; $Q_n = 5,4$ м³/год.; $H_n = 87,6$ м; $L = \eta_m H_n + 10$, з урахуванням глибини занурення

насосу під воду у свердловині і відстані до зливу; $d = 0,0508$ м (за продуктивності 6 м³/год. швидкість потоку буде становити 0,82 м/с). Програмну реалізацію комплексної моделі у системі імітаційного моделювання наведено на рис. 2, де представлено частину розрахунку параметрів робочих режимів насоса, мережі, свердловини, яка складається з блоків розв'язку диференціальних рівнянь (4), (8) задля визначення значень продуктивності та кутової швидкості і з блоку апроксимації характеристики робочого колеса насоса *PEDW6-4-100* у відповідності з (1), (3). Кількість робочих коліс враховано блоком даних *kk*. На виході даної частини моделі отримується інформація про кутову швидкість, яка визначається рівнянням (4) за інформацією про моменти: механічних і додаткових опорів *Mmex*, *Mdob*, момент насоса (2), електромагнітний *Мем*. Останній визначається у показаній на рис. 2 частині розрахунку параметрів робочих режимів АД, до якої входить блок *AD* з реалізацією слабкозв'язаної колопольової моделі. У ньому розв'язуються колові рівняння АД електромеханотронної системи [8] відповідно до напруги, кутової швидкості, електромагнітних параметрів за результатами польового аналізу. Величина електромагнітного моменту з виходу блоку використовується для (4), а струмів фаз *i1*, *i2*, *i3* – для імітаційного моделювання фаз статора АД у системі імітаційного моделювання із використанням блоків керованих джерел струмів. У паралель до входу цих блоків підключений блок опорів втрат у сталі із вхідною інформацією про ці втрати *Pst*.

Комплексний критерій ефективності ЕМС характеризує співвідношення обсягів виробленого корисного продукту і спожитих ресурсів. За оцінки експлуатаційних витрат це в основному співвідношення за час роботи *T* обсягів видобутої води і спожитої системою електроенергії або у сталому режимі це Q/P_1 . Задля оцінки ефективності капітальних вкладень врахуємо вартість води c_w і електроенергії c_e в грн./м³ та грн./кВт*год. Приймемо, що у базовому варіанті (живлення від промислової мережі) термін окупності витрат на спорудження свердловини становить $T_{o\delta}$, який залежить від годинного прибутку $c_w Q_{\delta} - c_e P_{1\delta}$, де одиниці продуктивності і потужності – м³/год. і кВт. За умови незмінної вартості свердловини зміна режиму роботи

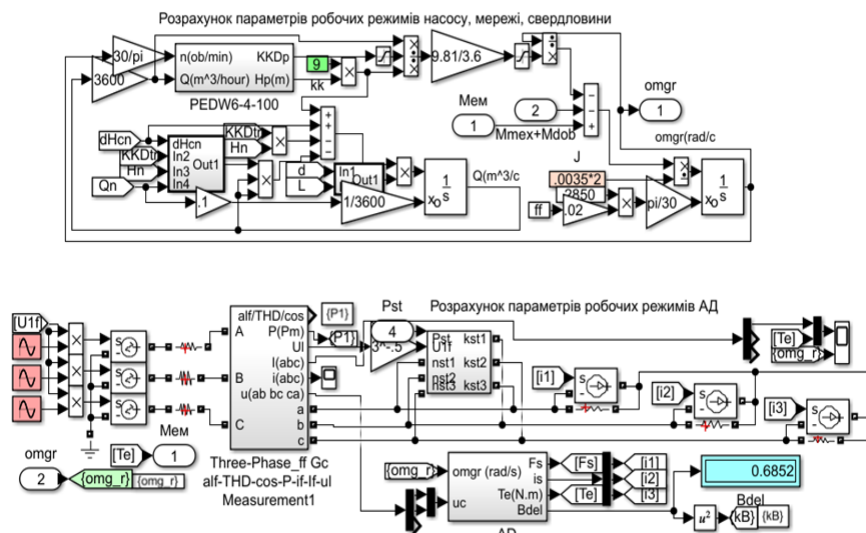


Рис. 2

(наприклад, перехід на частоту живлення ЕМС 100 Гц) супроводжується зміною терміну окупності капітальних вкладень відносно базового варіанту

$$\frac{T_o}{T_{o.\delta}} = \frac{c_w Q_{\delta} - c_e P_{1\delta}}{c_w Q - c_e P_1} \quad (9)$$

Вираз відносного терміну окупності капітальних вкладень (9) забезпечує у першому наближенні порівняльну оцінку варіантів ЕМС водопостачання з урахуванням співвідношення експлуатаційних і капітальних витрат. Задля визначення (9) треба розрахувати параметри робочого режиму у варіантах, що досліджується і базовому. За зміни параметрів робочого режиму із часом потрібна інтегральна оцінка за час циклу роботи t_u

$$\frac{T_o}{T_{o.\delta}} = \int_0^{t_u} (c_w Q_{\delta} - c_e P_{1\delta}) dt / \int_0^{t_u} (c_w Q - c_e P_1) dt \quad (10)$$

Задля вирішення задачі оптимального параметричного синтезу АД за комплексними критеріями ефективності системи математичну модель АД зануреного насосного агрегату задля дослідження його режимів роботи побудовано на основі слабозв'язаної коло-польової математичної моделі і реалізовано засобами Simulink у блоці АД (рис. 2.).

Даний підхід до моделювання із визначенням параметрів заступної схеми відповідно до [7] використано для проведення тестового чисельного експерименту з дослідження робочого режиму зануреного асинхронного двигуна ПЕДВ 2.8-140 (з подальшим порівнянням отриманих характеристик із характеристиками згідно з даними в [5] (табл. 1, кол. 2, 3) за умови потужності на валу АД 2,8 кВт), а також задля дослідження перспективних режимів АД у складі насосного агрегату.

Таблиця 1

Параметри режиму роботи АД		потужність на валу 2,8 кВт		АД у складі насосного агрегату			
		АД ПЕДВ 2.8-140					МФР, МО
		δ=0.0006				δ=0.0011	
		f=50 Гц, (технічна документація)	f=50 Гц, (чисельний експеримент)	f=50 Гц	f=100 Гц	f=100 Гц	f=100 Гц, (C=13мкф)
1		2	3	4	5	6	7
потуж. на валу P ₂ , Вт		2800	2810	2193	6255	6354	6639
ККД, %		74.5	74.6	77.0	66.5	76.0	81
cosφ		0.82	0.837	0.78	0.85	0.76	54 (1)
I _s , А		7.0	6.8	5.53	8.34	8.36	12.6 (I _л =6.88)
U _ф , В		220	220	220	440	440	400
ω _г , рад/с		-	296	300.7	606.3	609.1	616.9
M _{ем} , Н·м			10.47	8.2	-	11.8	12.1
Втрати, Вт	механічні, P _{мех}	266	262	271	1869	815	752
	в обмотці статора	376	310	214	461	467	330
	в обмотці ротора, P _р	110	187	111	297	228	138
	Додаткові, P _д	20	19	14	47	45	95
	в сталі P _{ст}	180	173	185	481	459	244
	Гріючі, ΣP	952	951	795	3155	2014	1560
Q, м ³ /год		-	-	5.3	-	11.1	11.4
Q/P ₁ , (T _о /T _{о.δ})		-	-	1.85, (1)	-	1.3, (0.55)	1.4, (0.53)
I _п , А		-	38	-	-	60	79 (I _{п.л} =70; cosφ=0.56)
M _{п.ем} , Н·м		-	30	-	-	35	56

Низька розбіжність енергетичних параметрів свідчить про достатньо високу точність і достовірність опису фізичних процесів в машині за допомогою коло-польової ММ.

Механічні втрати розраховувалися за методикою [5], яка враховує втрати на тертя об воду та в підшипниках. Додаткові втрати визначалися як 0.5% від потужності, що споживається машиною. Втрати в сталі розраховувалися за середньквадратичною індукцією окремо для ділянок ярма та

зубців магнітопроводу статора. Оскільки на етапі оптимізаційного параметричного синтезу тепловий розрахунок машини інноваційної конструкції не проводився, задля врахування теплових обмежень у заданих габаритах досліджуваної машини було використано значення допустимого рівня втрат, що відповідає серійному АД. Припускається, що всі втрати, які виділяються в машині, сприяють її нагріванню. Для серійного двигуна загальна величина втрат становить 952 Вт, які можна приймати за допустимі значення втрат у заданих габаритах. В табл. 1 кол. 4 приведені параметри режиму роботи АД з шихтованим осердям за частоти живлення 50 Гц у разі роботи з насосом. Гріючи втрати в даній машині знаходяться в допустимих межах і становлять 795 Вт.

Відповідно до напірної характеристики насоса (рис. 1) і характеристики мережі з гідравлічним опором (7) АД розвиває електромагнітний момент 8,2 Н·м, а насос забезпечує подачу 5,3 м³/год. У разі підвищення частоти живлення двигуна до 100 Гц подача насоса (у випадку зменшення кількості його коліс до 3) зростає приблизно до 11 м³/год. Збільшення швидкості потоку води сприяє зростанню тепловіддачі. Якщо теплообмін покращується, тоді можна допустити більші втрати в обмотці без перегріву. Так, в задачах конвективного теплообміну, до якої можна віднести і охолодження двигуна водою, задля оцінки інтенсивності тепловіддачі використовується число Нуссельта [12]. У разі турбулентного режиму потоку рідини число Нуссельта в функції швидкості потоку рідини зростатиме нелінійно, а саме $Nu \sim Re^{0.8}$, де $Re^{0.8}$ – це число Рейнольдса, яке є прямо пропорційне швидкості потоку рідини, але в степені 0.8, який відповідає турбулентному режиму потоку. Тоді підвищення швидкості потоку в 2 рази, а отже і в 2 рази числа Re , призведе до збільшення інтенсивності теплообміну (коефіцієнта тепловіддачі) в 1.74 рази. Відповідно, допустимі втрати, які спричиняють нагрів двигуна, за частоти 100 Гц також можуть бути збільшені приблизно у 1.74 рази, що становитиме 1654 Вт.

У табл. 1 кол. 5 наведено параметри режиму роботи АД із традиційною конструкцією в складі насосного агрегату (висота немагнітного проміжку $\delta=0.6$ мм) за частоти живлення 100 Гц. Подвійне збільшення частоти живлення призводить до подвоєння швидкості обертання ротора АД та забезпечення необхідного напору насоса меншою кількістю робочих коліс. Зменшимо їхнє число з дев'яти до трьох, що забезпечує потрібну величину напору насоса для подолання статичних і динамічних втрат напору за подвоєної подачі.

За живлення серійного асинхронного двигуна частотою 100 Гц спостерігається перевищення втрат [13–15], що спричиняють нагрівання обмотки на 1500 Вт (табл. 1). Значні механічні втрати у розмірі 1869 Вт знижують ККД машини до 66,5%.

Результати дослідження свідчать про необхідність адаптації конструкції електричних машин до нових умов експлуатації. Аналіз таблиці втрат показує, що найбільші з них припадають на механічні, втрати від вихрових струмів у сталі магнітопроводу та втрати в обмотці статора. З метою підвищення енергоефективності та надійності електричної машини в умовах підвищеної частоти живлення адаптована конструктивна схема асинхронного двигуна має передбачати зменшення зазначених втрат за рахунок: оптимізації висоти немагнітного проміжку – для зниження механічних втрат; застосування матеріалу магнітопроводу статора з меншими втратами на вихрові струми; оптимізації обмоткових даних з метою мінімізації омичних втрат.

Реалізація зазначених вимог може бути забезпечена конструктивною схемою асинхронного двигуна з монолітним осердям. Монолітне осердя ротора представляє собою масивний феромагнітний ротор (МФР) з валом, виготовлений за технологією литої металургії з подовжніми прорізами заданої глибини [16]. Осердя статора виконане у вигляді суцільного магнітопроводу за технологією порошкової металургії. З метою підвищення коефіцієнта заповнення пазів міддю пропонується розділити осердя статора на дві частини: зубцеву зону з закритими пазами з боку немагнітного проміжку та ярмову зону. Розбірна конструкція осердя забезпечує прямий доступ до пазів з боку ярма, що дає змогу ефективно встановлювати обмотку з литою ізоляцією.

Враховуючи, що коефіцієнт заповнення обмотки з литою ізоляцією може сягати 0.5 і більше [17], в математичній моделі асинхронного двигуна з монолітним осердям цей коефіцієнт було підвищено з 0.14 (у серійному виконанні) до 0.5. Асинхронний двигун за такою конструктивною схемою потребує оптимізації параметрів, тому було реалізовано оптимізаційний проектний синтез АД з монолітним осердям за частоти живлення 100 Гц за критерієм максимального ККД. Параметри оптимізації з діапазоном варіювання і їх величина, наведено в табл. 2.

Додаткові втрати у АД відповідають додатковим втратам за вищими гармоніками поля, що визначаються за поліноміальною залежністю, яка, в свою чергу, формується за результатами серії

розрахунків електромагнітного квазістаціонарного і нестационарного полів в 2D-постановці розрахункової області АД за зміни модуля обертового магнітного поля на середній лінії повітряного проміжку асинхронного двигуна та ковзання ротора.

За результатами проведеного пошуку екстремуму, реалізованого на основі методу градієнтного спуску за алгоритмом послідовного квадратичного програмування [18, 19], отримано оптимальну, за критерієм максимуму ККД, конструкцію АД з монолітним осердям, параметри якого наведено в табл. 2. На рис. 3 показано конструктивну схему асинхронного двигуна з монолітним осердям, що отримана за результатами оптимізаційного параметричного синтезу в комп'ютерних середовищах Matlab/Simulink та Comsol Multiphysics за порівняльного дослідження із зміною частоти живлення із використанням комплексної моделі рис. 2.

Таблиця 2

Конструктивні параметри	Діапазон зміни параметрів	Традиційна конструкція АД	Оптимізована конструкція АД з монолітним осердям
Глибина прорізів, м	$0.02 \leq h_z \leq 0.034$	-	0.024
Кількість прорізів, м	32, 42, 64	-	42
Ширина прорізів, м	$0.0005 \leq b_z \leq 0.0012$	-	0.00052
Радіус розточки, м	$0.023 \leq R \leq 0.035$	0.0345	0.034
Висота ярма статора, м	$0.0105 \leq H_z \leq 0.02$	0.011	0.016
Висота не магнітного проміжку, м	$0.006 \leq h_\delta \leq 0.0014$	0.0006	0.0011
Висота зубцевого мостика, м	$0.0005 \leq h_{zp} \leq 0.002$	-	0.001
Кількість витків	$15 \leq W \leq 30$	25	20
Діаметр проволочки, м	$0.00085 \leq D_{np} \leq 0.002$	0.00104	0.0017
Матеріал магнітопроводу статора	Somaloy 130i 5P, Somaloy h1000 5P, [20]	-	Зубцева зона - Somaloy 130i 5P Ярмова зона – Somaloy h1000 5P
Матеріал ротора	Сталь Ст 3, СМ20	-	Сплав СМ20

Можна бачити, що найбільшого зниження втрат в оптимізованій машині досягнуто в частині: механічних втрат – завдяки збільшенню висоти немагнітного проміжку; втрат в обмотці статора – завдяки кращому заповненню міддю паза; втрат в сталі магнітопроводу статора – завдяки вико-

ристанню порошкових матеріалів сердечника з меншими питомими втратами. Окремо варто відзначити лише вдвічі вищий рівень додаткових втрат у застосованому масивному феромагнітному роторі порівняно з асинхронним двигуном традиційної конструкції, що зумовлено оптимальним співвідношенням висоти немагнітного проміжку, висоти зубцевого мостика та однорідністю матеріалу в зоні зубець – зубцевий місток. Зазвичай, додаткові втрати у АД з МФР збільшуються у 4...9 разів у порівнянні з короткозамкнутим ротором. У підсумку: гріючі втрати на рівні 1560 Вт (табл. 1, кол. 7) є задовільними, оскільки не перевищують гранично допустиме значення 1654 Вт.

Враховуючи визначальний вплив висоти немагнітного проміжку на величину гріючих втрат, проведено дослідження асинхронного двигуна традиційної конструкції з висотою немагнітного проміжку $\delta = 0,0011$ м за частоти живлення 100 Гц.

Таке підвищення немагнітного проміжку дало можливість зменшити гріючі втрати з 3155 Вт до 2014 Вт (табл. 1, кол. 6). Проте, незважаючи на загальне покращення, гріючі втрати залишаються завищеними на 360 Вт порівняно з допустимими значеннями.

За результатами оптимізаційного параметричного синтезу АД з монолітним осердям за частоти живлення 100 Гц отримано його ККД на рівні 81%. При цьому комплексний критерій ефективності

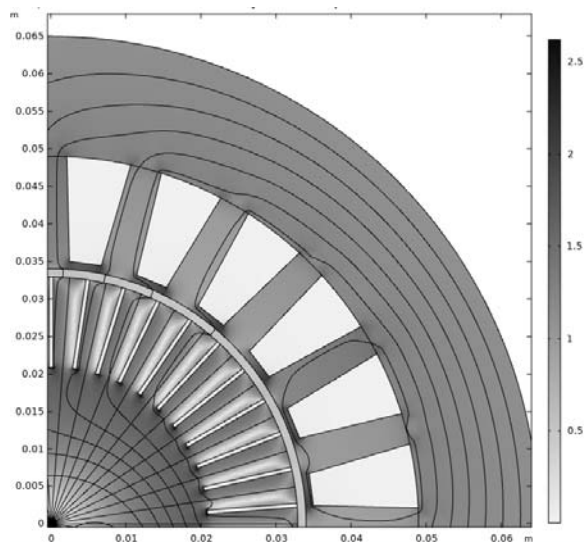


Рис. 3

ЕМС на базі даного двигуна, а саме термін окупності, виявився майже у 2 рази меншим у порівнянні з ЕМС на базі АД з традиційною конструкцією за частоти живлення 50 Гц (табл. 1, кол. 7).

До недоліку АД з монолітним осердям, який є традиційним, можна віднести високий рівень споживання реактивної потужності, який в даному випадку компенсується конденсаторною батареєю з ємністю у 13 мкф. За наявності такої батареї значення струму лінії I_d в робочому режимі відмічається на рівні струму АД з традиційною конструкцією (табл. 1, кол. 7).

Висновки.

1. Параметричний синтез АД з монолітним осердям зануреного свердловинного насосу в умовах подвоєння частоти живлення забезпечив (порівняно із базовим серійним варіантом) покращення показників ефективності: збільшення продуктивності у 2,2 рази; зменшення терміну окупності свердловини у 1,9 рази і кількість робочих коліс насосу у 3 рази; збільшення ККД АД на 4 %. Збільшення продуктивності за незмінного діаметру труби свердловини збільшує втрати напору і призводить до зменшення енергетичної ефективності системи (відношення продуктивності до споживаної потужності) на 30 %. Наявність масивних елементів магнітопроводу АД знижує коефіцієнт потужності, що компенсується постійно підключеним конденсатором ємністю 13 мкф (за базової потужності АД 3 кВт).

2. Обґрунтовано, що подвоєння частоти живлення дає можливість очікувати двократне зростання продуктивності та зменшення терміну окупності капітальних вкладень для свердловинного водопідйому. Це формує передумови для побудови оптимальних ЕМС, збалансованих за капітальними та експлуатаційними витратами.

3. Розроблено комплексну математичну модель ЕМС зануреного свердловинного насосного агрегату, яка дає змогу визначати параметри режимів роботи з урахуванням взаємодії насоса, АД та трубопроводу. Дана модель забезпечує можливість параметричного синтезу АД за узагальненими критеріями ефективності такими, як співвідношення між обсягом видобутої води та спожитою електроенергією, а також відносний термін окупності капітальних вкладень у свердловину. При цьому враховується вплив подачі на зміну параметрів робочої точки насосу та моменту навантаження АД з урахуванням динамічних втрат напору в трубопроводі, статичного напору, а також падіння рівня води у свердловині та втрат за фільтрації у ґрунті. Розроблений алгоритм визначення коефіцієнтів апроксимації характеристик насоса залежно від швидкості обертання та подачі дає змогу уточнити напірну характеристику більш ніж на 10 %, що забезпечує коректне врахування впливу зміни швидкості за довідниковими параметрами моноблочних насосних агрегатів.

4. Використання методології параметричного синтезу АД на основі слабкозв'язаної колопольової моделі з ітераційними циклами параметризації результатів польового аналізу забезпечило визначення оптимальних конструктивних параметрів АД з МФР і статором на основі порошкових матеріалів. При цьому були враховані нелінійні властивості магнітопроводів; наведені струми у роторі; додаткові втрати в МФР; взаємний вплив асинхронного двигуна, насосу, трубопроводу та свердловини на параметри робочих режимів.

5. Обґрунтовано конструкцію АД зануреного свердловинного насосу з суцільними масивним ротор-валом і розбірним магнітопроводом статора з закритими пазами і окремими деталями ярма та зубцевої зони, яка забезпечує зниження додаткових втрат у МФР у кілька разів завдяки оптимізації конструктивних параметрів зубцевої зони з закритими пазами статора; втрат на тертя ротора об рідину через зменшення його діаметру; зменшення втрат у міді статора завдяки збільшенню величини коефіцієнту заповнення пазу статора за його розбірної конструкції; зменшення втрат у сталі статора завдяки порошковим матеріалам.

1. Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>.

2. Bo Zhang. Soft Magnetic Composites in Novel Designs of Electrical Traction Machines Paperback. Dissertation. 2017. 294 p. DOI: <https://doi.org/10.5445/KSP/1000064348>.

3. Khayatzaheh F., Ghafouri J. Dynamical modeling of frequency controlled variable speed parallel multistage centrifugal pumps. *Archive of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 62. No 3. Pp. 347–361. DOI: <https://doi.org/10.1515/meceng-2015-0020>.

4. Shang L., Cao J., Wang Z., Liu X. Hydraulic Characterization of Variable-Speed Pump Turbine under Typical Pumping Modes. *Processes*. 2023. Vol. 11(10). Article no: 2903. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11102903>.

5. Счастливый Г.Г., Семаков В.Г., Федоренко Г.М. Погружные асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1983. 178 с.
6. Golovan I., Popovych O. Circuits-Field Approach to Mathematical Modeling of Induction Motors for the Purposes of Optimal Design. IEEE 5th International Conference on *Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 27-30 September 2023. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402409>.
7. Попович О.М., Головань І.В. Визначення параметрів заступної схеми асинхронного двигуна та їх нелінійних залежностей за результатами польового аналізу. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 31. С. 38–48.
8. Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>.
9. Szafraniec A. Mathematical model of asynchronous pump drive with distributed mechanical parameters. *Przegląd elektrotechniczny*. 2018. No 6. Article no: 114182. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2018.06.32>.
10. Bordeasu D., Proștean O., Filip I., Drăgan F., Vașar C. Modelling, Simulation and Controlling of a Multi-Pump System with Water Storage Powered by a Fluctuating and Intermittent Power Source. *Mathematics*. 2022. Vol. 10(21). Article no: 4019. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10214019>.
11. Sperlich A., Pfeiffer D., Burgschweiger J., Campbell E., Beck M., Gnirss R., Ernst M. Energy Efficient Operation of Variable Speed Submersible Pumps: Simulation of a Ground Water Well Field. *Water*. 2018. Vol. 10(9). Article no: 1255. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10091255>.
12. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th ed. John Wiley&Sons, 2007. 1070 p.
13. Klíma J., Víték O. Analysis of high-speed induction motor. Proceedings of the 16th International Conference on *Mechatronics – Mechatronika 2014*, Brno, Czech Republic, 03-05 December 2014. Pp. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018240>.
14. Hong D.-K., Choi J.-H., Han P.-W., Chun Y.-D., Woo B.-C., Koo D.-H. Analysis of high speed induction motor for spindle made by copper die casting process. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2012. No 13. Pp. 2251–2257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0299-5>.
15. Bordeasu D., Proștean O., Filip I., Vașar C. Adaptive Control Strategy for a Pumping System Using a Variable Frequency Drive. *Machines*. 2023. Vol. 11(7). Article no: 688. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11070688>.
16. Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором. К.: Наукова думка, 1984. 167 с.
17. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall, 2001. 738 p.
18. MATLAB. The Language of Technical Computing. Getting Started with MATLAB. The Math Works, Inc. USA, 2005.
19. Liao W., Zhang Q., Meng H. An SQP Algorithm for Structural Topology Optimization Based on Majorization–Minimization Method. *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12(13). Article no: 6304. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12136304>.
20. Somaloy[®] 5P. Material data. URL: https://www.hoganas.com/globalassets/downloads/library/somaloy_somaloy-5p-material-data_2274hog.pdf (дата звернення 25.06.2025)

EFFECTIVENESS OF USING A SOLID-CORE INDUCTION MOTOR IN A SUBMERSIBLE BOREHOLE PUMP UNDER INCREASED SUPPLY FREQUENCY

I.V. Golovan¹, O.M. Popovych¹, S.P. Shevchuk²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine,
E-mail: golovan_77@ukr.net; popovich1955@ukr.net.

² National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
37, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine.

The article presents the results of the optimization-based parametric synthesis of an induction motor with a solid core for a submersible borehole pump operating at doubled supply frequency. The proposed synthesis methodology is based on a weakly coupled circuit-field mathematical model with iterative parameterization of field analysis results. This approach makes it possible to account for nonlinear magnetic properties, rotor-induced currents, additional losses in the solid ferromagnetic rotor, and the interaction of all elements of the electromechanical system. According to the criterion of maximum efficiency, the optimal values of the variable design parameters of the induction motor with a solid core for the submersible borehole pump were determined, taking into account the load magnitude at supply frequencies of 50 and 100 Hz. The results demonstrate a significant improvement in system performance: a 2.2-fold increase in water lifting capacity, a 4% increase in motor efficiency, a 1.9-fold reduction in the payback period of the

borehole, and a threefold reduction in the number of impellers in the pump. Design solutions are substantiated for the induction motor with a solid rotor-shaft and a dismountable stator made of powder material with closed slots, which contribute to reducing copper, steel, and fluid losses. The proposed technical solutions lay the groundwork for designing optimized electromechanical systems for submersible borehole pumps with improved capital and operational cost indicators. References 20, figures 3, tables 2.

Key words: induction motor, borehole pump, solid core, weakly coupled circuit-field mathematical model.

1. Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>.
2. Bo Zhang. Soft Magnetic Composites in Novel Designs of Electrical Traction Machines Paperback. Dissertation. 2017. 294 p. DOI: <https://doi.org/10.5445/KSP/1000064348>.
3. Khayatzaadeh F., Ghafouri J. Dynamical modeling of frequency controlled variable speed parallel multistage centrifugal pumps. *Archive of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 62. No 3. Pp. 347–361. DOI: <https://doi.org/10.1515/meceng-2015-0020>.
4. Shang L., Cao J., Wang Z., Liu X. Hydraulic Characterization of Variable-Speed Pump Turbine under Typical Pumping Modes. *Processes*. 2023. Vol. 11(10). Article no: 2903. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11102903>.
5. Schastlivy G.G., Semakov V.G., Fedorenko G.M. *Submersible Induction Electric Motors*. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 178 p. (Rus)
6. Golovan I., Popovych O. Circuits-Field Approach to Mathematical Modeling of Induction Motors for the Purposes of Optimal Design. IEEE 5th International Conference on *Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 27-30 September 2023. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402409>.
7. Popovych O.M., Golovan I.V. Determination of equivalent circuit parameters of an induction motor and their nonlinear dependencies based on field analysis results. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2012. Vyp. 31. Pp. 38–48. (Ukr)
8. Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Energy-efficient operation modes of the electromechanical system of a multi-storey building pumping unit. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>. (Ukr)
9. Szafraniec A. Mathematical model of asynchronous pump drive with distributed mechanical parameters. *Przegląd elektrotechniczny*. 2018. No 6. Article no: 114182. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2018.06.32>.
10. Bordeasă D., Proștean O., Filip I., Drăgan F., Vașar C. Modelling, Simulation and Controlling of a Multi-Pump System with Water Storage Powered by a Fluctuating and Intermittent Power Source. *Mathematics*. 2022. Vol. 10(21). Article no: 4019. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10214019>.
11. Sperlich A., Pfeiffer D., Burschweiger J., Campbell E., Beck M., Gnirss R., Ernst M. Energy Efficient Operation of Variable Speed Submersible Pumps: Simulation of a Ground Water Well Field. *Water*. 2018. Vol. 10(9). Article no: 1255. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10091255>.
12. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. John Wiley&Sons, 2007. 1070 p.
13. Klíma J., Vítek O. Analysis of high-speed induction motor. Proceedings of the 16th International Conference on *Mechatronics – Mechatronika 2014*, Brno, Czech Republic, 03-05 December 2014. Pp. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018240>.
14. Hong D.-K., Choi J.-H., Han P.-W., Chun Y.-D., Woo B.-C., Koo D.-H. Analysis of high speed induction motor for spindle made by copper die casting process. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2012. No 13. Pp. 2251–2257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0299-5>.
15. Bordeasă D., Proștean O., Filip I., Vașar C. Adaptive Control Strategy for a Pumping System Using a Variable Frequency Drive. *Machines*. 2023. Vol. 11(7). Article no: 688. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11070688>.
16. Lishchenko A.I., Lesnik V.A. *Induction Machines with a Massive Ferromagnetic Rotor*. Kyiv: Naukova Dumka, 1984. 167 p. (Rus)
17. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall, 2001. 738 p.
18. MATLAB. *The Language of Technical Computing. Getting Started with MATLAB*. The Math Works, Inc. USA, 2005.
19. Liao W., Zhang Q., Meng H. An SQP Algorithm for Structural Topology Optimization Based on Majorization–Minimization Method. *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12(13). Article no: 6304. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12136304>.
20. Somaloy[®] 5P. Material data. URL: https://www.hoganas.com/globalassets/downloads/library/somaloy_somaloy-5p-material-data_2274hog.pdf (accessed at 25.06.2025).

Надійшла 07.07.2025

Прийнята 24.07.2025