

Оптимізація потужності втрат двигуна постійного струму регулюванням струму збудження

В. А. Войтенко¹, кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>; e-mail: voitenko@op.edu.ua

В. А. Водічев¹, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>; e-mail: vva@eei.opu.ua,

О. Г. Калінін¹, інженер електрик

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>; e-mail: agk@opu.ua

¹ Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. На підставі математичної моделі двигуна постійного струму з незалежним збудженням отримано рівняння залежності сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і обмотки збудження двигуна постійного струму від значення струму збудження і від значення електромагнітного моменту, який розвиває двигун. Також отримано формулу, яка визначає оптимальне значення струму збудження, при якому двигун постійного струму з незалежним збудженням розвиває потрібне значення електромагнітного моменту при мінімальному значенні сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і обмотки збудження. Побудовано діаграму залежності оптимального значення струму збудження від значення електромагнітного моменту. Отримано формулу яка визначає залежність значення сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і на активному опорі обмотки збудження двигуна постійного струму від значення електромагнітного моменту, який розвиває двигун, при номінальному значенні струму збудження і при оптимальному значенні струму збудження. Побудовано діаграми залежності значення сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і на активному опорі обмотки збудження двигуна постійного струму від значення електромагнітного моменту при номінальному значенні струму збудження і при оптимальному значенні струму збудження. Побудовано механічні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням при номінальному значенні струму збудження і при оптимальному значенні струму збудження.

Ключові слова: двигун постійного струму, незалежне збудження, потужність, втрати електричної енергії, активний опір, обмотка, якор, оптимальний струм, механічні характеристики.

Цитування статті: Войтенко В. А., Водічев В. А., Калінін О. Г. (2026). Оптимізація потужності втрат двигуна постійного струму регулюванням струму збудження. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.89-98. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.9>

Вступ

В Україні і в усьому світі приділяється велика увага підвищенню енергетичної ефективності електрообладнання, яке масово застосовується в промисловості, будівництві, транспорті, сільському господарстві.

В 2014 році весь Світ спожив майже $21,78 \times 10^{12}$ кВт·год електричної енергії [1]. Україна впродовж 2020 року спожила приблизно $0,151 \times 10^{12}$ кВт·год електричної енергії, з якої 38,1% припала на промисловість [2]. В Світі електричні двигуни споживають близько 70%

електричної енергії, яку споживає промисловість. В Україні цей показник - понад 60% електроенергії, спожитою промисловістю [2]. Тобто електричні двигуни є головними споживачами електроенергії в світі і в Україні.

Європейська директива 640/2009/ЕС для виробників і користувачів електродвигунів та засобів комутації і захисту компонентів набула чинності в січні 2015 року, а 15 вересня 2021 року Постанова № 157 Кабінету Міністрів України «Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для електродвигунів» [3].

© Войтенко В. А., Водічев В. А., Калінін О. Г., 2026

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Ці рішення спрямовані на зменшення споживання електроенергії та зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище в Україні.

Згідно з Технічним регламентом всі електродвигуни, які мають номінальну потужність від 0,75 кВт до 375 кВт повинні мати номінальний коефіцієнт корисної дії не нижче рівня ІЕЗ. Ці вимоги стосуються в основному двигунів змінного струму. Але в народному господарстві і в побуті використовується багато двигунів постійного струму (ДПС), які також споживають багато електроенергії. Двигуни постійного струму використовуються там, де необхідно забезпечити точне регулювання швидкості (металообробні верстати, промислові роботи), а також в електротранспорті, і в підйомних механізмах. В Україні двигуни постійного струму використовують переважно в електротранспорті (тролейбуси, трамваї, метрополітен) та в специфічних промислових установках (прокатні стани, крокуючі екскаватори). Точну глобальну та українську статистику споживання електроенергії саме двигунами постійного струму знайти складно, оскільки основні дані зосереджені на асинхронних двигунах, які домінують у промисловості. Однак, ДПС також споживають значну частину електричної енергії. Тому проблема підвищення енергоефективності ДПС є важливою проблемою сучасної світової економіки.

1 Мета дослідження

При оптимізації електроприводів постійного струму використовують, як правило, два напрями. Перший напрям – це подальше вдосконалення конструкції двигунів постійного струму. Деякі автори пропонують використовувати елементи магнітної системи електричних машин для проведення струму [6]. Інші автори пропонують використовувати частину осереддя головного полюса як електричні дроти компенсаційної обмотки [7].

Другий напрям – це оптимізація режимів роботи двигунів постійного струму. Так в статті [8] розглядається питання управління тяговим електроприводом постійного струму електропоїзда, яке дозволяє мінімізувати енергетичні витрати при розгоні поїзда. В роботах [9], [10] на базі математичної моделі розглянуто задачу оптимізації електропривода трамвая при сталому навантаженні. В роботі [11] розглянуто умови оптимізації гальмівних режимів ДПС.

Проте, в цих роботах не приділяється достатньо уваги дослідженню зв'язку між значенням потужності втрат енергії в ДПС і значеннями струмів в обмотках збудження і якоря ДПС, а

також значенням електромагнітного моменту, який розвиває ДПС. Це і визначило напрям дослідження.

Отже, метою даної роботи є мінімізація сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і на активному опорі обмотки збудження двигуна постійного струму з незалежним збудженням при будь-якому значенні електромагнітного моменту, який розвиває двигун, завдяки оптимізації значення струму збудження ДПС.

2 Матеріали та результати дослідження

Оптимізація струму збудження двигуна постійного струму з незалежним збудженням полягає в регулюванні струму збудження при зміні значення електромагнітного моменту, який розвиває ДПС так, щоб забезпечити мінімальне значення сумарної потужності втрат електричної енергії в обмотці збудження та в обмотці якоря ДПС. В результаті це має привести до підвищення ККД двигуна. Однак, надмірно велике значення струму збудження може призвести до перегріву обмотки збудження двигуна і до насичення магнітної системи ДПС. Тому в загальному випадку максимальне значення струму збудження ДПС має бути обмежено на допустимому рівні. Занадто мале значення струму збудження може привести до погіршення комутації колектора двигуна. Тому мінімальне значення струму збудження ДПС також має бути обмежено на допустимому рівні. Далі будемо вважати, що магнітна система ДПС є ненасиченою.

Сумарна потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря ДПС і на активному опорі обмотки збудження ДПС визначається рівнянням (1):

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{зб}}, \quad (1)$$

Потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря ДПС визначається рівнянням (2):

$$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}, \quad (2)$$

де $I_{\text{я}}$ – струм в обмотці якоря ДПС;

$R_{\text{я}}$ – активний опір обмотки якоря ДПС.

Потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки збудження ДПС визначається рівнянням (3):

$$\Delta P_{\text{зб}} = I_{\text{зб}}^2 R_{\text{зб}}, \quad (3)$$

де $I_{\text{зб}}$ – струм в обмотці збудження ДПС;

$R_{\text{зб}}$ – активний опір обмотки збудження ДПС.

Електромагнітний момент, який розвиває ДПС, визначається рівнянням (4):

$$M_{EM} = k_E \Phi I_{Я}, \quad (4)$$

де k_E – конструктивний коефіцієнт якірної обмотки ДПС;

Φ – магнітний потік збудження ДПС.

Будемо вважати, що магнітна система ДПС є ненасиченою, тому значення магнітного потоку є пропорційним значенню струму збудження і визначається рівнянням (5):

$$\Phi = k_{\Phi} I_{ЗБ}, \quad (5)$$

де k_{Φ} – коефіцієнт зв'язку між значенням струму збудження і значенням магнітного потоку збудження ДПС.

Після підстановки до рівняння (4) замість Φ правої частини рівняння (5) отримаємо рівняння (6), яке визначає електромагнітний момент ДПС:

$$M_{EM} = k_E k_{\Phi} I_{ЗБ} I_{Я}. \quad (6)$$

На підставі рівняння (6) отримаємо рівняння (7), яке визначає залежність значення струму в обмотці якоря ДПС від значення електромагнітного моменту, який розвиває ДПС і від значення струму збудження ДПС:

$$I_{Я} = \frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi} I_{ЗБ}}. \quad (7)$$

До рівняння (2) замість $I_{Я}$ підставимо праву частину рівняння (7). В результаті отримаємо рівняння (8) потужності втрат електричної енергії в обмотці якоря ДПС:

$$\Delta P_{Я} = \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi} I_{ЗБ}} \right)^2 R_{Я}. \quad (8)$$

До рівняння (1) замість $\Delta P_{Я}$ підставимо праву частину рівняння (8), а замість $\Delta P_{ЗБ}$ підставимо праву частину рівняння (3). В результаті отримаємо рівняння (9) сумарної потужності втрат електричної енергії в обмотках якоря і збудження ДПС:

$$\Delta P_{\Sigma} = \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi} I_{ЗБ}} \right)^2 R_{Я} + I_{ЗБ}^2 R_{ЗБ}. \quad (9)$$

Визначимо значення струму збудження ($I_{ЗБ,ОПТ.}$), при якому ДПС буде розвивати потрібне значення електромагнітного моменту при мінімальному значенні сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і на активному опорі обмотки збудження. Для цього треба взяти першу похідну від рівняння (9) по струму збудження ($I_{ЗБ}$) і прирівняти її нулю:

$$\frac{d\Delta P_{\Sigma}}{dI_{ЗБ}} = 0, \text{ при } I_{ЗБ} = I_{ЗБ,ОПТ.} \quad (10)$$

Визначимо похідну від правої частини рівняння (9) по струму збудження:

$$\frac{d\Delta P_{\Sigma}}{dI_{ЗБ}} = -2 \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \right)^2 R_{Я} I_{ЗБ}^{-3} + 2 I_{ЗБ} R_{ЗБ}. \quad (11)$$

Підставимо праву частину рівняння (11) до рівняння (10). В результаті при оптимальному значенні струму збудження має виконуватись рівняння (12):

$$-2 \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \right)^2 R_{Я} I_{ЗБ,ОПТ.}^{-3} + 2 I_{ЗБ,ОПТ.} R_{ЗБ} = 0. \quad (12)$$

Після перетворень рівняння (12) отримаємо рівняння (13), яке визначає оптимальне значення струму збудження ДПС, як функцію значень параметрів ДПС і значення електромагнітного моменту, який розвиває ДПС:

$$I_{ЗБ,ОПТ.} = \sqrt[4]{\left(\frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \right)^2 \frac{R_{Я}}{R_{ЗБ}}}. \quad (13)$$

Підставимо праву частину рівняння (13) до рівняння (3). В результаті отримаємо рівняння (14), яке визначає потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки збудження ДПС при оптимальному значенні струму збудження:

$$\Delta P_{ЗБ,ОПТ.} = \sqrt[2]{\left(\frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \right)^2 \frac{R_{Я}}{R_{ЗБ}}} R_{ЗБ} = \frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \sqrt[2]{R_{Я} R_{ЗБ}}. \quad (14)$$

Підставимо праву частину рівняння (13) до рівняння (8). В результаті отримаємо рівняння (15), яке визначає потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря ДПС при оптимальному значенні струму збудження:

$$\Delta P_{Я,ОПТ.} = \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \right)^2 \frac{1}{\sqrt[2]{\left(\frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \right)^2 \frac{R_{Я}}{R_{ЗБ}}}} R_{Я}. \quad (15)$$

Після перетворення рівняння (15) отримаємо рівняння (16):

$$\Delta P_{Я,ОПТ.} = \frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \sqrt[2]{R_{Я} R_{ЗБ}}. \quad (16)$$

При порівнянні рівняння (14) і рівняння (16) видно, що при оптимальному значенні струму збудження ДПС потужність втрат енергії в обмотці збудження і в обмотці якоря ДПС буде однаковою.

На підставі рівнянь (1), (14) і (16) запишемо рівняння (17), яке визначає сумарну потужність втрат енергії в обмотці збудження і в обмотці якоря ДПС при оптимальному значенні струму збудження:

$$\Delta P_{\Sigma,ОПТ.} = 2 \frac{M_{EM}}{k_E k_{\Phi}} \sqrt[2]{R_{Я} R_{ЗБ}}. \quad (17)$$

Поділемо рівняння (9) на рівняння (17). В результаті отримаємо рівняння (18), яке визначає співвідношення сумарної потужності втрат енергії в обмотці збудження і в обмотці якоря ДПС при поточному значенні струму збудження і при оптимальному значенні струму збудження:

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma, \text{опт.}}} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_E k_{\Phi}} \sqrt{\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{ЗБ}}}} \cdot \frac{M_{\text{ЕМ}}}{(I_{\text{ЗБ}})^2} + \frac{1}{2} \frac{1}{k_E k_{\Phi}} \sqrt{\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{ЗБ}}}} \cdot \frac{M_{\text{ЕМ}}}{(I_{\text{ЗБ}})^2}. \quad (18)$$

Для прикладу розглянемо двигун постійного струму типу ПН-205, технічні параметри якого наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри двигуна постійного струму типу ПН-205 (джерело: [12])

Найменування параметра	Значення
Номинальна потужність двигуна	35 кВт
Номинальна напруга якірної обмотки двигуна, $U_{\text{яН}}$	220 В
Номинальний струм якірної обмотки двигуна, $I_{\text{яН}}$	174 А
Номинальна напруга обмотки збудження двигуна, $U_{\text{ЗБН}}$	220 В
Номинальна частота обертання валу двигуна, $n_{\text{н}}$	1580 об/хв.
Сумарний активний опір якірної обмотки при роботі двигуна в номінальному режимі, $R_{\text{я}}$	0,0855 Ом
Активний опір обмотки збудження при роботі двигуна в номінальному режимі, $R_{\text{ЗБ}}$	143,52 Ом

Розрахункові параметри ДПС типу ПН-205:

1) Номінальне значення кутової швидкості валу двигуна:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2\pi n_{\text{н}}}{60}, \quad (19)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1580}{60} = 165,37 \text{ рад/с.}$$

де $n_{\text{н}}$ – номінальне значення частоти обертання валу двигуна типу ПН-205.

2) За формулою (20) коефіцієнт зв'язку між значенням кутової швидкості валу ДПС і значенням електрорушійної сили (ЕРС), яку номінальне магнітне поле збудження ($\Phi_{\text{н}}$) генерує в якірній обмотці ДПС:

$$C_{\text{ЕН}} = k_E \Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{яН}} - I_{\text{яН}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (20)$$

$$C_{\text{ЕН}} = \frac{220 - 174 \cdot 0,0855}{165,37} = 1,2404 \text{ Вс.}$$

де $U_{\text{яН}}$ – номінальна напруга якірної обмотки двигуна;

$I_{\text{яН}}$ – номінальний струм якірної обмотки двигуна;

$R_{\text{я}}$ – сумарний активний опір якірної обмотки двигуна при роботі двигуна в номінальному режимі (при номінальному значенні температури двигуна).

3) Номінальне значення струму збудження двигуна за формулою (21):

$$I_{\text{ЗБ.н.}} = \frac{U_{\text{ЗБ.н.}}}{R_{\text{ЗБ}}}, \quad (21)$$

$$I_{\text{ЗБ.н.}} = \frac{220}{143,52} = 1,533 \text{ А.}$$

де $U_{\text{ЗБ.н.}}$ – номінальна напруга обмотки збудження двигуна;

$R_{\text{ЗБ}}$ – сумарний активний опір обмотки збудження при роботі двигуна в номінальному режимі (при номінальному значенні температури двигуна).

4) На підставі рівняння (4) і рівняння (6) додаток конструктивних коефіцієнтів обмотки якоря і обмотки збудження двигуна за формулою (22):

$$k_E k_{\Phi} = \frac{C_{\text{ЕН}}}{I_{\text{ЗБ.н.}}}, \quad (22)$$

$$k_E k_{\Phi} = \frac{1,2404}{1,533} = 0,809 \text{ Вс/А.}$$

5) На підставі рівняння (6) номінальне значення електромагнітного моменту двигуна за формулою (22):

$$M_{\text{ЕМ.н.}} = C_{\text{ЕН}} I_{\text{яН}}, \quad (23)$$

$$M_{\text{ЕМ.н.}} = 1,2404 \cdot 174 = 215,8 \text{ Нм.}$$

6) На підставі рівнянь (1), (2) і (3) сумарна потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки збудження і обмотки якоря ДПС при номінальному значенні струму збудження і при номінальному значенні електромагнітного моменту ДПС типу ПН-205:

$$\Delta P_{\Sigma.н.} = 174^2 \cdot 0,0855 + 1,533^2 \cdot 143,52,$$

$$\Delta P_{\Sigma.н.} = 2588,6 + 337,3 = 2925,9 \text{ Вт.} \quad (24)$$

7) На підставі рівняння (17) сумарна потужність втрат енергії в обмотках збудження і якоря ДПС типу ПН-205 при оптимальному значенні струму збудження $I_{\text{ЗБ.н.}}$ і при номінальному значенні електромагнітного моменту $M_{\text{ЕМ.н.}}$ ДПС:

$$\Delta P_{\Sigma, \text{опт.н.}} = 2 \frac{215,8}{0,809} \sqrt{0,0855 \times 143,52},$$

$$\Delta P_{\Sigma, \text{опт.н.}} = 1868,8 \text{ Вт.} \quad (25)$$

На рис. 1 за рівнянням (21) побудовано діаграму 1 залежності номінального значення стру-

му збудження ДПС типу ПН-205 від значення електромагнітного моменту $I_{ЗБ.Н.} = f(M_{ЕМ})$, а за (13) - діаграму 2 залежності оптимального

значення струму збудження від значення електромагнітного моменту, $I_{ЗБ.ОПТ.} = f(M_{ЕМ})$.

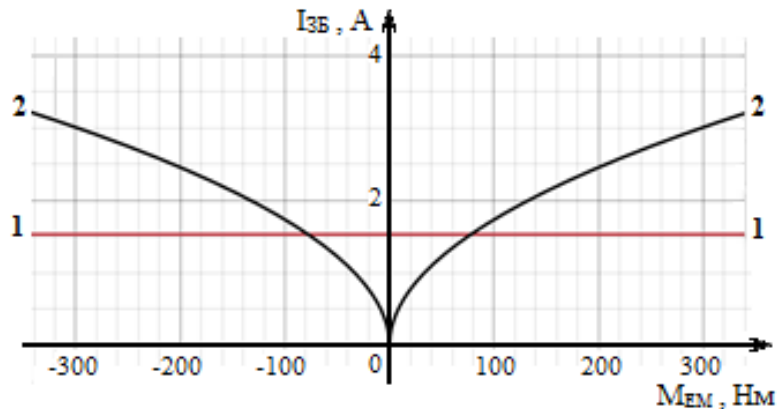


Рис. 1 – Діаграми залежності номінального значення струму збудження і оптимальних значеннях струму збудження ДПС ПН-205 від значення електромагнітного моменту

На рис. 2 за рівнянням (9) побудовано діаграму 1 залежності сумарної потужності втрат електричної енергії на активних опорах обмоток збудження та якоря ДПС типу ПН-205 при номінальному значенні струму збудження від значення електромагнітного моменту, $\Delta P_{\Sigma} =$

$f(M_{ЕМ})$, а за (17) - діаграму 2 залежності сумарної потужності втрат електричної енергії на активних опорах обмоток збудження та якоря ДПС типу ПН-205 при оптимальному значенні струму збудження від значення електромагнітного моменту ДПС, $\Delta P_{\Sigma.ОПТ} = f(M_{ЕМ})$.

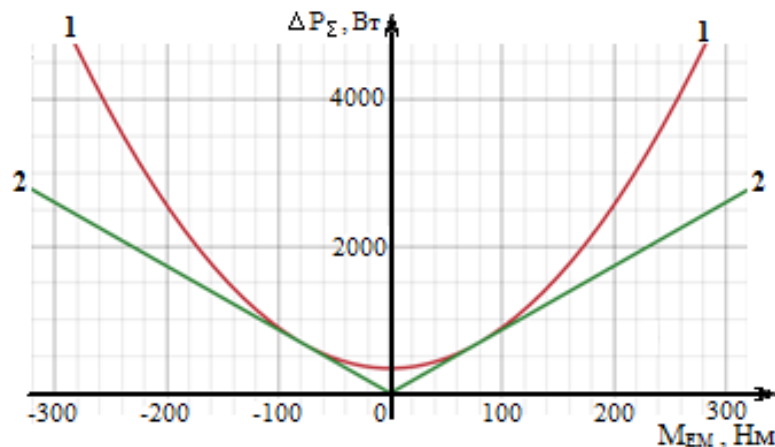


Рис. 2 – Діаграми залежності сумарної потужності втрат електричної енергії на активних опорах обмоток збудження і якоря ДПС ПН-205 від значення електромагнітного моменту

На рис. 3 за рівнянням (18) побудовано діаграму, яка визначає співвідношення сумарної потужності втрат енергії в обмотках збудження і якоря ДПС типу ПН-205 при номінальному та оптимальному значеннях струму збудження від значення електромагнітного моменту ДПС, $\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma.ОПТ.}} = f(M_{ЕМ})$.

Механічна характеристика ДПС типу ПН-205 при номінальному значенні струму збудження описується формулою (26):

$$\omega = \frac{U_{Я.Н.}}{C_{ЕН}} - \frac{M_{ЕМ} \cdot R_{Я}}{C_{ЕН}^2} \quad (26)$$

Механічна характеристика ДПС типу ПН-205 при оптимальному значенні струму збудження описується формулою (27):

$$\omega = \frac{U_{Я.Н.}}{\sqrt{M_{ЕМ} k_E k_{\Phi}} \times \sqrt{\frac{R_{Я}}{R_{ЗБ}}}} - \frac{R_{Я}}{k_E k_{\Phi} \sqrt{\frac{R_{Я}}{R_{ЗБ}}}} \quad (27)$$

На рис. 4 за рівняннями (26) і (27) побудовано механічні характеристики ДПС типу ПН-205 при номінальному значенні струму збудження (діаграма 1) і при оптимальних значеннях струму збудження (діаграма 2).

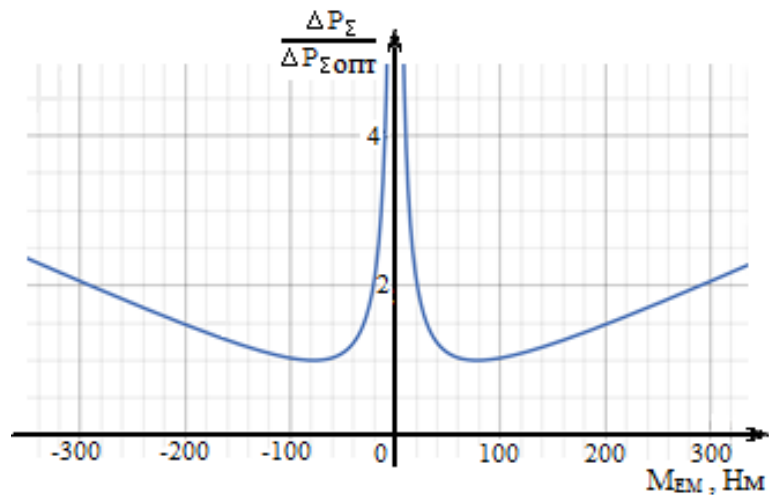


Рис. 3 – Співвідношення сумарної потужності втрат енергії в обмотках збудження і якоря ДПС ПН-205 при номінальному і оптимальних значеннях струму збудження від значення електромагнітного моменту

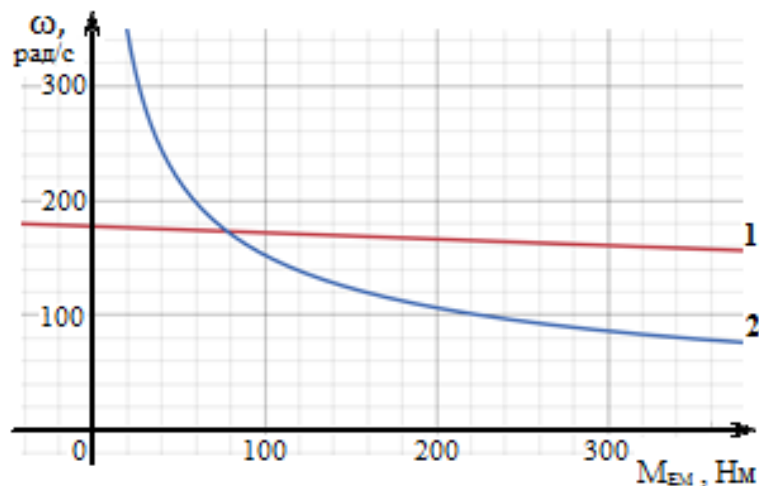


Рис. 4 – Механічні характеристики ДПС ПН-205:
1 - при незмінному номінальному значенні струму збудження;
2 - при оптимальних значеннях струму збудження

Висновки

1. На підставі рівняння (13) і рис.1 (діаграма 2) видно, що оптимальне значення струму збудження є пропорційним кореню квадратному від значення електромагнітного моменту, який розвиває ДПС. Для ДПС ПН-205 значення оптимального струму збудження буде дорівнювати номінальному значенню струму збудження при значенні електромагнітного моменту, яке дорівнює приблизно 80 Нм. Це є приблизно 37% від номінального значення електромагнітного моменту ДПС ПН-205. При більших значеннях електромагнітного моменту, який розвиває ДПС ПН-205, значення оптимального струму збудження буде більше номінального значення струму збудження. При

менших значеннях електромагнітного моменту, який розвиває ДПС ПН-205, значення оптимального струму збудження буде менше номінального значення струму збудження. При нульовому значенні електромагнітного моменту, який розвиває ДПС, оптимальне значення струму збудження дорівнює нулю.

Однак, нагадаємо ще раз, що занадто велике значення струму збудження може призвести до перегріву обмотки збудження двигуна. Тому в загальному випадку максимальне значення струму збудження ДПС має бути обмежено на допустимому рівні. Разом з тим занадто мале значення струму збудження може привести до погіршення комутації колектора двигуна. Тому мінімальне значення струму збудження ДПС також має бути обмежено на допустимому рівні.

2. На підставі розрахунків (24) і (25) видно, що при номінальному значенні електромагнітного моменту ДПС при оптимальному значенні струму збудження сумарна потужність втрат енергії в обмотках збудження і якоря ДПС ПН-205 зменшується на 1057 Вт в порівнянні із сумарною потужністю втрат електричної енергії при номінальному значенні струму збудження. Це дозволяє підвищити номінальне значення ККД двигуна на 3%.

3. На підставі діаграм, показаних на рис. 2 і рис.3, можна зробити висновок, що сумарна потужність втрат електричної енергії в активних опорах обмоток збудження і якоря ДПС при номінальному і оптимальному значеннях струму збудження буде майже однаковою при значенні електромагнітного моменту, який розвиває ДПС ПН-205, від 60 Нм до 100 Нм. Це дорівнює 28%,...,46% від номінального значення електромагнітного моменту. При інших значеннях електромагнітного моменту, який розвиває ДПС ПН-205, сумарна потужність втрат електричної енергії в активних опорах обмоток збудження і якоря ДПС при номінальному значенні струму збудження (діаграма 1 на рис.2) суттєво перевищує значення сумарної потужності втрат електричної енергії при оптимальному значенні струму збудження (діаграма 2 на рис.2).

4. На підставі рівнянь (26) і (27), а також на підставі рис. 4 видно, що при оптимальному значенні струму збудження механічна характеристика двигуна постійного струму з незалежним збудженням набуває форми механічної характеристики двигуна постійного струму з послідовною обмоткою збудження. Це ускладнює застосування розглянутого способу оптимізації струму збудження в замкнених системах регулювання швидкості, оскільки застосування регулятора

швидкості з постійними параметрами не може забезпечити стабільну якість регулювання швидкості при значній зміні струму збудження і магнітного потоку ДПС. Цю задачу можна розв'язати шляхом застосування адаптивного регулятора швидкості [13], [14] або універсального регулятора [15].

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту під час створення цієї роботи.

Внесок авторів

Войтенко В. А.: загальне керівництво, розробка методології, чисельні розрахунки, обробка даних, аналітичні висновки, написання тексту;
Водічев В. А.: постановка задачі, аналіз та інтерпретація результатів, формулювання висновків;
Калінін О. Г.: чисельні розрахунки, аналіз даних, підготовка рисунків, редагування тексту статті.

Список використаної літератури

1. Wikipedia. (2018). *Список країн за споживанням електроенергії*. [онлайн] Доступно за адресою: https://uk.wikipedia.org/wiki/Список_країн_за_споживанням_електроенергії [Доступ отримано 24 Мар. 2026].
2. Uaea.com.ua. (2021). *Виробництво та споживання електроенергії в Україні у грудні та за 12 місяців 2020 року — Всеукраїнська Енергетична Асамблея*. [онлайн] Available at: <https://uaea.com.ua/news/pek-news/electricity-2020-12.html> [Доступ отримано 24 березня 2026].
3. SEW-EURODRIVE (2022). *Вимоги до енергоефективності електродвигунів | Новини | SEW-EURODRIVE*. [онлайн] Sew-eurodrive.ua. Доступно за адресою: https://www.sew-eurodrive.ua/kompanija/otdel_novostej_pressa/obzor_novostej/news_root_page_7808-3.html [Доступ отримано 24 березня 2026]. Wikipedia. (2018). *Список країн за споживанням електроенергії*. [онлайн] Доступно за адресою: https://uk.wikipedia.org/wiki/Список_країн_за_споживанням_електроенергії [Доступ отримано 24 Мар. 2026].
4. Бажинов, О.В., Смирнов, О.П., Серіков, С.А. та Двадненко, В.Я. (2008). *Гібридні автомобілі*. Харків: ХНАДУ, с.327.

5. Бажинов, О.В., Смирнов, О.П., Серіков, С.А. та Двадненко, В.Я. (2011). *Синергетичний автомобіль. Теорія і практика*. Харків: ХНАДУ, с.236.
6. Острейко В. Н., Черников Ю. Л. (1981). Экспериментальное исследование электромагнитных параметров токонесящих катушек из ленточной стали. *Изв. Вузov «Электромеханика»*, 4, с.367-373.
7. Калиниченко Ю. С., Кузнецов, А. І. (2004). *Тягові електричні машини. Двигуни постійного струму: Навч. посібник*. Харків: ХНАМГ, с.218.
8. Носков, В., Скороделов, В., Гейко, Г. та Липчанська, О. (2022). Оптимізація режимів роботи тягового привода. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 3(69), с.45–48. doi:<https://doi.org/10.26906/sunz.2022.3.045>.
9. Мокін, Б.І. та Мокін, О.Б. (2010). Математичні моделі в задачах оптимізації електропривода трамвая при його сталому завантаженні. *Вісник Вінницького політехнічного інституту* [онлайн], 2, с.57–61. Доступно за адресою: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/55> [Доступ отримано 24 березня 2026].
10. Мокін, Б.І. та Мокін, О.Б. (2010). Математична модель кривої намагнічування електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням для задач оптимізації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту* [онлайн], 1, с.рр.45–47. Доступно за адресою: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/8> [Доступ отримано 24 березня 2026].
11. Vozniak, A. and Kolisnyk, M. (2019). Optimization of pulse controlling of engine stopping. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*, (23), pp.95–99. doi:<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.095>.
12. Ципленков Д.В., Іванов О.Б., Бобров О.В., Кузнецов В.В., Артемчук В.В., Баб'як М.О.(2020). *Проектування електричних машин : навч. посіб.* Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ ДП, С.408. Доступно за адресою: <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/ПроектированиеЕМ.pdf> [Доступ отримано 24 березня 2026].
13. Islamov, A.V. and Repnikova, N.B. (2014). Synthesis of nonlinear control systems with an unknown state vector. *Electronics and Communications*, 19(3), pp.106–111. doi:<https://doi.org/10.20535/2312-1807.2014.19.3.141482>.
14. Dastaviz, A. and Binazadeh, T. (2018). Simultaneous stabilization for a collection of uncertain time-delay systems using sliding-mode output feedback control. *International Journal of Control*, 93(9), pp.2135–2144. doi:<https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1543897>.
15. Ahmed, M.M. and Vodichev, V. (2021). Simulation Study of Electric Drive and Industrial Plants with New Smart Controller. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, pp.1–6. doi:<https://doi.org/10.1109/mees52427.2021.9598797>.

References

1. Wikipedia. (2018). *Spysok krayin za spozhyvanniam elektroenerhiyi [List of countries by electricity consumption]*. [online] Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/Список_країн_за_споживанням_електроенергії [Accessed 24 March 2026].
2. Uaea.com.ua. (2021). *Vyrobnytstvo ta spozhyvannya elektroenerhiyi v Ukraini u hrudni ta za 12 misyatsiv 2020 roku [Electricity production and consumption in Ukraine in December and for 12 months of 2020]* — *Vseukrayins'ka enerhetychna asambleya [All-Ukrainian Energy Assembly]*. [online] Available at: <https://uaea.com.ua/news/pek-news/electricity-2020-12.html> [Accessed 24 March 2026].
3. SEW-EURODRIVE (2022). *Vymohy do enerhoefektyvnosti elektrodyhuniv | Novyny | SEW-EURODRIVE [Energy efficiency requirements for electric motors | News | SEW-EURODRIVE]*. [online] Sew-eurodrive.ua. Available at: https://www.sew-eurodrive.ua/kompanija/otdel_novostej_pressa/obzor_novostej/news_root_page_7808-3.html [Accessed 24 March 2026].
4. Bazhynov, O.V., Smyrnov, O.P., Syerikov, S.A. and Dvadnenko, V.YA. (2008). *Hibrydni avtomobili, [Hybrid Cars]*. Kharkiv: KHNADU, p.327.5.
5. Bazhynov, O.V., Smirnov, O.P., Serikov, S.A. and Dvadnenko, V.Ya. (2011). *Synerhetychnyy avtomobil'. Teoriya i praktyka. [Synergetic car. Theory and practice]*. Kharkiv: KhNADU, p.236
6. Ostreiko V. N., Chernikov Yu. L. (1981). Eksperimental'noye issledovaniye elektromagnitnykh parametrov tokonesushchikh katushek iz polosovoy stali. [Experimental study of electromagnetic parameters of current-carrying coils made of strip steel]. *Izv. Vuzov "Elektromekhanika"[Izvestiya Universiteta «Elektromekhanika»]*, 4, pp.367-373.

7. Kalinichenko Yu. S., A. I. Kuznetsov, A. I. (2004). *Tyahovi elektrychni mashyny. Dvyhuny postiynoho strumu: Navch. posibnyk [Traction electric machines. Direct current motors: Textbook]*. Kharkiv: KhNAMG, p.218.
8. Noskov, V., Skorodielov, V., Heiko, H. and Lipchanska, O. (2022). OPTYMIZATSIYA REZHYMIV ROBOTY TYAHOVOHO PRYVODU [OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF A TRACTION DRIVE]. *Systemy keruvannya, navihatsiyi ta zv'yazku. Zbirnyk naukovykh prats' [Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers]*, 3(69), pp.45–48. doi:<https://doi.org/10.26906/sunz.2022.3.045>.
9. Mokin, B.I. and Mokin, O.B. (2010). Matematychni modeli v zadachakh optymizatsiyi elektropryvoda tramvaya pry yoho stalomu zavantazhenni [Mathematical models in the optimization problems of the electric drive of a tram under its constant load]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu [Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute]*. [online], 2, pp.57–61. Available at: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/55> [Accessed March 24, 2026].
10. Mokin, B.I. and Mokin, O.B. (2010). Matematychna model' kryvoyi namahnichuvannya elektrodvyhuna postiynoho strumu z poslidoynym zbudzhennyam dlya zadach optymizatsiyi [Mathematical model of the magnetization curve of a DC electric motor with sequential excitation for optimization problems]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu [Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute]* [online], 1, pp.45–47. Available at: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/8> [Accessed March 24, 2026].
11. Vozniak, A. and Kolisnyk, M. (2019). Optimization of pulse controlling of engine stopping. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*, (23), pp.95–99. doi:<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.095>.
12. Tsyplenkov D.V., Ivanov O.B., Bobrov O.V., Kuznetsov V.V., Artemchuk V.V., Babyak M.O. (2020). *Design of electric machines: a textbook*. National Technical University "Dnipropetrovsk Polytechnic". Dnipro: NTU DP, p.408. Available at: <https://vde.nmu.org.ua/lib/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%95%D0%9C.pdf> [Accessed March 24, 2026].
13. Islamov, A.V. and Repnikova, N.B. (2014). Synthesis of nonlinear control systems with an unknown state vector. *Electronics and Communications*, 19(3), pp.106–111. doi:<https://doi.org/10.20535/2312-1807.2014.19.3.141482>.
14. Dastaviz, A. and Binazadeh, T. (2018). Simultaneous stabilization for a collection of uncertain time-delay systems using sliding-mode output feedback control. *International Journal of Control*, 93(9), pp.2135–2144. doi:<https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1543897>.
15. Ahmed, M.M. and Vodichev, V. (2021). Simulation Study of Electric Drive and Industrial Plants with New Smart Controller. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, pp.1–6. doi:<https://doi.org/10.1109/mees52427.2021.9598797>.

Отримано (Received) 15.12.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 23.02.2026

Прийнято (Accepted) 24.03.2026

Опубліковано (Published) 23.04.2026

Optimization of DC Motor Power losses by Controlling the Excitation Current

Volodymyr Voytenko¹, *Ph.D, Associate Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>; e-mail: voitenko@op.edu.ua

Volodymyr Vodichev¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>; e-mail: vva@eei.opu.ua,

Alexander Kalinin¹, *electrical engineer*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>; e-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua

¹ *Національний університет «Одеська політехніка»*

Abstract. Based on the mathematical model of a DC motor with independent excitation, an equation was obtained for the dependence of the total power of electrical energy losses on the active resistance of the armature winding and the excitation winding of a DC motor on the value of the excitation current and on the value of the electromagnetic torque developed by the motor. A formula was also obtained that determines the optimal value of the excitation current at which a DC motor with independent excitation develops the required value of the electromagnetic torque at the minimum value of the total power of electrical energy losses on the active resistance of the armature winding and the excitation winding. A diagram of the dependence of the optimal value of the excitation current on the value of the electromagnetic torque was constructed. A formula was obtained that determines the dependence of the value of the total power of electrical energy losses on the active resistance of the armature winding and on the active resistance of the excitation winding of a DC motor on the value of the electromagnetic torque developed by the motor, at the nominal value of the excitation current and at the optimal value of the excitation current. The dependence diagrams of the total power of electrical energy losses on the active resistance of the armature winding and on the active resistance of the excitation winding of a DC motor on the value of the electromagnetic torque at the nominal value of the excitation current and at the optimal value of the excitation current have been constructed. The mechanical characteristics of a DC motor with independent excitation have been constructed at the nominal value of the excitation current and at the optimal value of the excitation current.

Keywords: DC motor, independent excitation, power, electrical energy losses, active resistance, winding, armature, optimal current, mechanical characteristics.

Article citation: Voitenko V. A., Vodichev V. A., Kalinin O. G. (2026). Optimization of DC motor power losses by excitation current regulation. Electrical and Computer Systems. 2026. No. 45(121), pp. 89-98. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.9>

Про авторів (About the authors)



Войтенко Володимир Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: voitenko@op.edu.ua, тел.: +380 48 705 8467

Volodymyr Voytenko, Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: voitenko@op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8467

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>



Водічев Володимир Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса 65044, Україна.

E-mail: vva@eei.opu.ua, тел. +38(050)2347722

Volodymyr Vodichev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: vva@eei.opu.ua, tel. +38(050)2347722,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>



Калінін Олександр Георгійович, старший викладач кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua, тел. +380 50 392 1298

Olexander Kalinin, Senior Lecturer of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua, tel. +380 50 392 1298

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>