

УДК 621.327.539

DOI 10.31548/energiya1(83).2026.032

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ПРИВОДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОЧИХ МАШИН З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ТА ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ І ЛІНІЙНОМУ МОМЕНТІ СТАТИЧНИХ ОПОРІВ**О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент**<https://orcid.org/0000-0001-5245-7860>E-mail: sinyavskiy@nubip.edu.ua**В. В. Савченко, кандидат технічних наук, доцент****Національний університет біоресурсів і природокористування України**<https://orcid.org/0000-0001-8260-6038>E-mail: savchenko@nubip.edu.ua**А. І. Чміль, доктор технічних наук, професор****Національний університет біоресурсів і природокористування України**<https://orcid.org/0000-0001-9148-3172>E-mail: a.chmil@ukr.net**Н. Д. Пруднікова, кандидат технічних наук, доцент****Національний університет біоресурсів і природокористування України**<https://orcid.org/0009-0004-0890-5952>E-mail: prudnikova.n@nubip.edu.ua

Анотація. Дослідження із впливу відхилення та несиметрії напруги на технологічні і енергетичні характеристики робочих машин і механізмів з асинхронним електроприводом показали, що при їх відхиленні зменшується продуктивність та зростають питомі енергетичні витрати. Проте відсутні дослідження з впливу відхилення напруги на електроприводи постійного струму.

Мета дослідження – встановлення впливу відхилення напруги в електроприводах з двигунами постійного струму незалежного та паралельного збудження на технологічні та енергетичні характеристики робочих машин з моментом статичних опорів, який лінійно залежить від кутової швидкості.

При відхиленні напруги змінюється кутова швидкість двигунів постійного струму незалежного та паралельного збудження, що викликає зміну продуктивності робочої машини. У двигунів постійного струму незалежного і паралельного збудження при насиченій магнітній системі залежність продуктивності робочої машини від зміни напруги є лінійною

При відхиленні напруги змінюються постійні і змінні втрати потужності в електродвигуні постійного струму.

Запропоновано проводити енергетичну оцінку електропривода постійного струму за питомою витратою електроенергії.

Проведено дослідження впливу відхилення напруги на енергетичні характеристики робочих машин з моментом статичних опорів, лінійно залежним від кутової швидкості, які приводяться в дію від двигунів постійного струму незалежного та паралельного збудження. Встановлено, що при зниженні напруги знижуються питомі витрати електроенергії.

Ключові слова: *двигун постійного струму незалежного та паралельного збудження, відхилення напруги, питома витрата електроенергії*

Вступ. Відхилення напруги в електроприводах постійного струму призводить до збитків, які мають електромагнітну і технологічну складову. Електромагнітна складова визначається втратою активної потужності і зміною терміну служби ізоляції електрообладнання. Технологічна складова збитків обумовлена впливом відхилення напруги на продуктивність технологічних установок та собівартість продукції, що випускається [1].

Огляд літературних джерел. Внаслідок відхилення напруги змінюються технологічні та енергетичні характеристики робочих машин [2].

Зниження напруги призводить до зменшення швидкості двигуна постійного струму незалежного і паралельного збудження та зростання втрат енергії [3].

Нині отримані аналітичні залежності моменту двигуна постійного струму від напруги та втрат енергії в ustalених режимах роботи при номінальних параметрах живлячої мережі [4].

Проводилися дослідження із впливу відхилення та несиметрії напруги на технологічні та енергетичні характеристики робочих машин і механізмів в асинхронних електроприводах [5-10]. Встановлено, що відхилення та несиметрія напруги призводить до зменшення їх продуктивності [11 - 14].

Проте не проводилися дослідження з впливу відхилення напруги на технологічні та енергетичні характеристики робочих машин в електроприводах постійного струму.

Мета дослідження – встановлення впливу відхилення напруги в електроприводах з двигунами постійного струму незалежного та паралельного збудження на технологічні та енергетичні характеристики робочих машин з моментом статичних опорів, лінійно залежним від куткової швидкості.

Матеріали і методи дослідження. Аналіз зміни куткової швидкості електропривода при відхиленні напруги проведений з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей електродвигунів постійного струму, приводних характеристик робочих машин та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях впливу відхилення напруги на механічну характеристику електродвигунів постійного струму незалежного та послідовного збудження знімали залежності куткової швидкості відповідно від електромагнітного моменту та струму при різних значеннях напруги. Напругу змінювали за допомогою тиристорного перетворювача напруги. За результатами досліджень отримали залежності $\omega=f(M)$.

Результати досліджень та їх обговорення. Механічна характеристика електродвигуна постійного струму незалежного і паралельного збудження є лінійною і описується рівнянням [15]:

$$M_{\partial} = \beta_{\partial} \left(\frac{U}{C} - \omega \right), \quad (1)$$

де M_{∂} – момент двигуна, Н·м; β_{∂} – жорсткість механічної характеристики двигуна, Н·м·с; U – напруга, В; C – стала двигуна, Н·м/А; ω – задана швидкість двигуна, с⁻¹.

Ці двигуни працюють при насиченій магнітній системі, тому можна вважати $\Phi=\text{const}$.

Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при різних значеннях напруги на обмотці якоря показані на рисунку.

Як випливає із наведених залежностей, при зниженні напруги зменшується швидкість ідеального холостого двигуна постійного струму незалежного збудження, при цьому жорсткість механічної характеристики залишається незмінною.

У робочих машин, у яких момент статичних опорів лінійно залежить від куткової швидкості:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \frac{\omega}{\omega_n}, \quad (2)$$

де M_c – момент статичних опорів при заданій кутковій швидкості, Н·м; M_0 – початковий момент, Н·м; ω – кутова швидкість робочої машини, с⁻¹; ω_n – номінальна кутова швидкість робочої машини, с⁻¹,

або

$$M_c = M_0 + \beta_c \omega, \quad (3)$$

де β_c – жорсткість механічної характеристики робочої машини, Н·м·с.

Тоді в ustalеному режимі роботи

$$\beta_{\partial} \left(\frac{U}{C} - \omega \right) = M_0 + \beta_c \omega, \quad (4)$$

зідки

$$\omega = \frac{\beta_o U / C - M_o}{\beta_o + \beta_c} \quad (5)$$

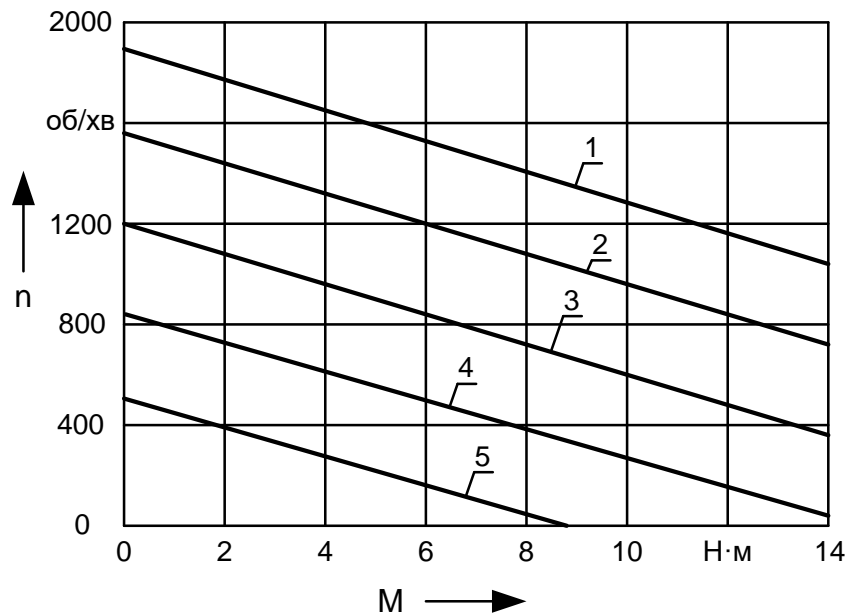


Рисунок. Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при напрузі:

1 – 220 В (природна); 2 – 180 В; 3 – 140 В; 4 – 100 В; 5 – 60 В

Оскільки

$$\beta_o = \frac{C^2}{R_{я}}, \quad (6)$$

де $R_{я}$ – опір обмотки якоря, Ом;
отримаємо

$$\omega = \frac{CU / R_{я} - M_o}{\beta_o + \beta_c} \quad (7)$$

Таким чином, для робочих машин, у яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості, при зміні напруги на якорі електродвигуна кутова швидкість змінюється прямо пропорційно зміні напруги.

Якщо знехтувати початковим моментом робочої машини $M_o=0$, тоді

$$\omega_* = U_*, \quad (8)$$

де $\omega_* = \omega / \omega_n$ – кутова швидкість у відносних одиницях; U_* – напруга у відносних одиницях.

Зниження напруги викликає зниження кутової швидкості двигуна. Відповідно, знижується продуктивність робочої машини:

$$Q = Q_n \omega_*, \quad (9)$$

де Q_n – номінальна продуктивність робочої машини.

Питома витрата електроенергії робочої машини, кВт·год/м³, визначається за формулою:

$$q = P_I / Q, \quad (10)$$

де P_I – потужність, споживана двигуном з мережі, кВт.

При відхиленні напруги змінюються постійні і змінні втрати потужності в електродвигуні.

Змінні втрати потужності електродвигуна визначаються за формулою [8]:

$$\Delta P_v = M_c (\omega_o - \omega), \quad (11)$$

або з урахуванням (8)

$$\Delta P_v = \Delta P_{vн} U_*. \quad (12)$$

Постійні втрати потужності в двигуні постійного струму:

$$\Delta P_c = \Delta P_3 + (\Delta P_{\text{мехн}} + \Delta P_{\text{стн}}) \omega_*^2, \quad (13)$$

де ΔP_3 – втрати потужності в колі збудження; $\Delta P_{\text{мехн}}$, $\Delta P_{\text{стн}}$ – втрати механічні і в сталі при номінальній кутовій швидкості.

При відхиленні напруги постійні втрати потужності

$$\Delta P_c = \Delta P_{\text{нз}} / \omega_*^2 + (\Delta P_{\text{мехн}} + \Delta P_{\text{стн}}) \omega_*^2 \approx \text{const}. \quad (14)$$

Тоді питома витрата електроенергії:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2н} + \Delta P_{\text{сн}} + \Delta P_{\text{вн}}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}}{Q}, \quad (15)$$

де $P_{2н}$ і P_2 – відповідно потужність на валу двигуна при номінальній напрузі і відхиленні напруги, Вт; $\Delta P_{\text{сн}}$ і ΔP_c – постійні втрати потужності, Вт; $\Delta P_{\text{вн}}$ і ΔP_v – змінні втрати потужності, Вт.

Номінальні змінні втрати потужності можна визначити через ККД електродвигуна:

$$\Delta P_{\text{вн}} = \frac{P_{2н} (1 - \eta_n)}{\eta_n (\alpha + 1)}, \quad (16)$$

де η_n – номінальний ККД, α – коефіцієнт втрат.

Потужність на валу двигуна

$$P_2 = M_c \omega. \quad (17)$$

Підставивши вирази (16) – (17) у вираз (15), отримаємо:

$$q_* = \frac{M_c \omega + \Delta P_{\text{вн}} (\alpha + U_*)}{P_{2н} + \Delta P_{\text{вн}} (\alpha + 1)}. \quad (18)$$

Оскільки

$$P_2 / P_{2н} = M_{\text{сн}} \omega_* \omega / M_{\text{сн}} \omega_n = \omega_*^2 = U_*^2, \quad (19)$$

то розділивши чисельник і знаменник на величину $P_{2н}$ з урахуванням (16) після перетворень отримаємо:

$$q_* = \eta_n U_* + \frac{1 - \eta_n}{\alpha + 1} (\alpha / U_* + 1). \quad (20)$$

При зниженні напруги знижується кутова швидкість електродвигуна постійного струму незалежного і паралельного збудження, що обумовлює зростання питомої витрати енергії.

Висновки. При відхиленні напруги змінюється швидкість ідеального ходу двигунів постійного струму незалежного та паралельного збудження, а жорсткість механічної характеристики залишається незмінною.

При зниженні напруги зменшується продуктивність робочої машини та зростає питома витрата енергії.

Список використаних джерел

1. Sinyavsky O., Savchenko V., Nesvidomin A., Bunko V., Ramsh V., Potapenko M. Influence of the electricity quality on the energy characteristics of agricultural machines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 100, NR 2/2024. P. 123-126. doi:10.15199/48.2024.02.24.
2. Адамова С. Аналіз впливу якості електроенергії на роботу струмоприймачів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2018. Вип. 8, т. 2. С. 1-10. doi: 10.31388/2220-8674-2018-2-39.
3. Łubica M. Controller design for DC motor. Technical Sciences and Technologies. 2020. № 4(22), P. 184 – 189. doi: 10.25140/2411-5363-2020-4(22)-184-189.
4. Синявський О. Ю., Горобець В. Г. Вплив якості електроенергії на енергетику електроприводів в усталеному режимі. Науковий вісник НУБіП України. 2010. Вип. 153. С. 133 – 138.
5. Синявський О.Ю., Савченко В.В. Вплив несиметрії напруги на енергетичні характеристики насосних установок. Енергетика і автоматика. 2023. №2. С.16-23. doi 10.31548/energiya2(66).2023.055

6. Sinyavsky O., Savchenko V., Dudnyk A. Development and Analysis Methods of Transporter Electric Drive for Electrotechnological Complex of Crop Seed Presowing by Electromagnetic Field, 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2019. P. 1-6, doi: 10.1109/CPEE47179.2019.8949143.
7. Daniel Donolo P, Pezzani CM, Bossio GR, et al. Effects of negative sequence voltage on the core losses of induction motors. IEEE ANDESCON; Arequipa; 2016. P. 1-4.
8. Zhang D, An R, Wu T. Effect of voltage unbalance and distortion on the loss characteristics of three-phase cage induction motor. IET Electr Power Appl. 2018;12(2). P. 264–270. doi:10.1049/iet-epa.2017.0464 Digital Object Identifier
9. Neves ABF, d A, Filho LF, et al. Effects of voltage unbalance on torque and efficiency of a three-phase induction motor. 16th International Conference on harmonics and quality of power (ICHQP); Bucharest; 2014. P. 679–683. doi:10.1109/ICHQP.2014.6842807.
10. Pokrovskiy K., Muzychak A. Voltage deviations influence on asynchronous characteristics of powerful asynchronous turbogenerator. Energy Engineering and Control Systems, 2020, Vol. 6. No. 2. P. 104 – 109. doi: 10.23939/jeecs2020.02.104
11. Sinyavsky O., Savchenko V., Solomko N., Kisten V., Zalozny R. Influence of electricity quality on technological characteristics of agricultural machines. Wpływ jakości energii elektrycznej na charakterystyki technologiczne maszyn rolniczych. Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97(8). P. 84–87. doi:10.15199/48.2024.02.24.
12. Goroshko A., Kashtalian A. Influence of supply voltage unbalance on induction motor characteristics. Herald of Khmelnytskyi national university. 2025. Issue 3, part 2, (35). P. 110-113. doi: 10.31891/2307-5732-2025-353-13.
13. Синявський О.Ю., Савченко В.В. Вплив відхилення напруги на кутову швидкість електродвигунів постійного струму послідовного збудження. Енергетика і автоматика. 2025. №3. С. 59-69. doi: 10.31548/energiya3(79).2025.059.
14. Savchenko V., Synyavskiy O., Dudnyk A., Nesvidomin A. Influence of Voltage Deviation and Asymmetry on Transitional Processes in Asynchronous Electric Drive. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2021, pp. 1-6. doi:10.1109/MEES52427.2021.9598660.
15. Aadarsh Anuj. The Effect of Voltage from a DC Motor on Inducing a Voltage and Frequency in a Coil using Electromagnetic Induction to Determine the Speed of Rotation of the Motor. Research Gate 2022. November. Available at: https://www.researchgate.net/publication/365491279_The_Effect_of_Voltage_from_a_DC_Motor_on_Inducing_a_Voltage_and_Frequency_in_a_Coil_using_Electromagnetic_Induction_to_Determine_the_Speed_of_Rotation_of_the_Motor.

INFLUENCE OF VOLTAGE DEVIATION ON THE DRIVE CHARACTERISTICS OF WORKING MACHINES WITH DC MOTORS OF INDEPENDENT AND PARALLEL EXCITATION AT THE TORQUE OF STATIC SUPPORTS LINEARLY DEPENDENT ON THE ANGULAR VELOCITY

O. Sinyavsky, V. Savchenko, A. Chmil, N. Prudnikova

Abstract. *Studies on the influence of voltage deviation and asymmetry on the technological and energy characteristics of working machines and mechanisms with an asynchronous electric drive have shown that when they deviate, productivity decreases and specific energy consumption increases. However, there are no studies on the influence of voltage deviation on DC electric drives.*

The purpose of the study is to establish the influence of voltage deviation in electric drives with DC motors of independent and parallel excitation on the technological and energy characteristics of working machines with a static resistance moment that depends linearly on the angular velocity.

When the voltage deviates, the angular velocity of DC motors of independent and parallel excitation changes, which causes a change in the productivity of the working machine. In DC motors of independent and parallel excitation with a saturated magnetic system, the dependence of the productivity of the working machine on the voltage change is linear.

When the voltage deviates, the constant and variable power losses change in the DC electric motor.

It is proposed to conduct an energy assessment of a DC electric drive based on specific electricity consumption.

The study of the influence of voltage deviation on the energy characteristics of working machines with a static resistance moment linearly dependent on angular velocity, which are driven by DC motors of

independent and parallel excitation, was carried out. It was established that when the voltage decreases, the specific electricity consumption decreases.

Key words: *DC motor of independent and parallel excitation, voltage deviation, specific electricity consumption*

References

1. Sinyavsky, O., Savchenko, V., Nesvidomin, A., Bunko, V., Ramsh, V., Potapenko M. (2024). Influence of the electricity quality on the energy characteristics of agricultural machines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 100 (2), 123-126. doi:10.15199/48.2024.02.24.
2. Adamova, S. (2018). Analiz vplyvu yakosti elektroenerhii na robotu strumopryimachiv [Analysis of the impact of electricity quality on the operation of current collectors]. Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu, 8 (2), 1-10. doi: 10.31388/2220-8674-2018-2-39.
3. Lubica, M. (2020). Controller design for DC motor. Technical Sciences and Technologies, 4(22), 184 – 189. doi: 10.25140/2411-5363-2020-4(22)-184-189.
4. Sinyavsky, A. Yu., Horobets, V. H. (2010). Vplyv yakosti elektroenerhii na enerhetyku elektropryvodiv v ustalenomu rezhymi [The influence of electricity quality on the energy of electric drives in the steady state]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 153, 133 – 138.
5. Sinyavsky, O. Y., Savchenko, V. V. (2023). Vplyv nesymetrii napruhy na enerhetychni kharakterystyky nasosnykh ustanovok [The influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of pumping units]. Enerhetyka i avtomatyka, №2, 16-23. doi 10.31548/energiya2(66).2023.055
6. Sinyavsky, O., Savchenko, V., Dudnyk, A. (2019). Development and Analysis Methods of Transporter Electric Drive for Electrotechnological Complex of Crop Seed Presowing by Electromagnetic Field," 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2019, 1-6, doi: 10.1109/CPEE47179.2019.8949143.
7. Daniel Donolo P, Pezzani CM, Bossio GR, et al. (2016). Effects of negative sequence voltage on the core losses of induction motors. IEEE ANDESCON; Arequipa, 1-4.
8. Zhang, D, An, R, Wu, T. (2018). Effect of voltage unbalance and distortion on the loss characteristics of three-phase cage induction motor. IET Electr Power Appl. 12(2), 264–270. doi:10.1049/iet-epa.2017.0464 Digital Object Identifier
9. Neves, ABF, d A, Filho, LF, et al. (2014). Effects of voltage unbalance on torque and efficiency of a three-phase induction motor. 16th International Conference on harmonics and quality of power (ICHQP); Bucharest; 2014, 679–683. doi:10.1109/ICHQP.2014.6842807.
10. Pokrovskiy, K., Muzychak, A. (2020). Voltage deviations influence on asynchronous characteristics of powerful asynchronized turbogenerator. Energy Engineering and Control Systems, 6 (2), 104 – 109. doi: 10.23939/jeecs2020.02.104.
11. Sinyavsky, O., Savchenko, V., Solomko, N., Kisten, V., Zalozny, R. (2021). Influence of electricity quality on technological characteristics of agricultural machines. Przegląd Elektrotechniczny, 97(8), 84–87. . doi:10.15199/48.2024.02.24.
12. Goroshko, A., Kashtalian, A. (2025). Influence of supply voltage unbalance on induction motor characteristics. Herald of Khmelnytskyi national university. 3 (2), (35), 110-113. doi: 10.31891/2307-5732-2025-353-13.
13. Sinyavsky, O., Savchenko V. (2025). The influence of voltage deviation on the angular velocity of series-excited DC electric motors. Energy and Automation, 3, 59-69. doi: 10.31548/energiya3(79).2025.059.
14. Savchenko, V., Sinyavskiy, O., Dudnyk, A., Nesvidomin, A. (2021). Influence of Voltage Deviation and Asymmetry on Transitional Processes in Asynchronous Electric Drive. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2021, 1-6. doi:10.1109/MEES52427.2021.9598660.
15. Aadarsh, Anuj. (2022). The Effect of Voltage from a DC Motor on Inducing a Voltage and Frequency in a Coil using Electromagnetic Induction to Determine the Speed of Rotation of the Motor. Research Gate 2022. November. Available at: https://www.researchgate.net/publication/365491279_The_Effect_of_Voltage_from_a_DC_Motor_on_Inducing_a_Voltage_and_Frequency_in_a_Coil_using_Electromagnetic_Induction_to_Determine_the_Speed_of_Rotation_of_the_Motor