

**ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ПРИВОДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
РОБОЧИХ МАШИН З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
НЕЗАЛЕЖНОГО ТА ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ ПРИ $M_C = \text{const}$**

О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Савченко, кандидат технічних наук, доцент

А.О. Антонюк, студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України

В. Г. Подобайло, кандидат технічних наук, доцент

Західноукраїнський університет

E-mail: sinyavsky2008@ukr.net

Анотація. Відхилення напруги в двигунів постійного струму призводить до збитків, які мають електромагнітну і технологічну складову.

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 незалежним від кутової швидкості.

При відхиленні напруги змінюється кутлова швидкість двигунів постійного струму незалежного та паралельного збудження, що викликає зміну продуктивності робочої машини. У двигунів постійного струму незалежного збудження залежність продуктивності робочої машини від зміни напруги є лінійною, а в двигунів постійного струму паралельного збудження продуктивність робочої машини при відхиленні напруги змінюється за складним алгоритмом.

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 незмінним моментом статичних опорів, які приводяться в дію від двигунів постійного струму незалежного та паралельного збудження. Встановлено, що при зниженні напруги зростають питомі втрати електроенергії.

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

Актуальність. 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].

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зниження напруги призводить до зменшення моменту 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 усталених 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. Встановлено, що відхилення та несиметрія напруги призводить до зменшення їх продуктивності [5, 6].

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 незалежним від кутової швидкості.

Матеріали і методи дослідження. Аналіз зміни кутової 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 кутової двигуна відповідно від електромагнітного моменту та струму при різних значеннях напруги. Напругу змінювали за допомогою тиристорного перетворювача напруги. За результатами досліджень отримали залежності $\omega=f(M)$, $\omega=f(U)$.

Результати досліджень та їх обговорення. Механічна характеристика електродвигуна постійного струму незалежного збудження є лінійною і описується рівнянням [7]:

$$\omega = \frac{U}{C} - \frac{MR_{\text{я}}}{C^2}, \quad (1)$$

де ω – задана швидкість двигуна, с^{-1} ; U – напруга, В; M – момент двигуна, Н·м; $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря, Ом; C – стала двигуна, Н·м/А.

Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при різних значеннях напруги на обмотці якоря показані на рис. 1.

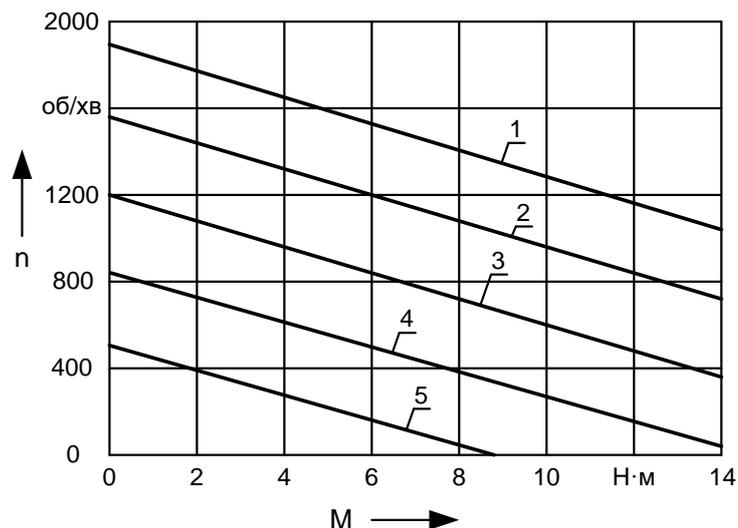


Рис. 1. Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при напрузі:

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

Як впливає 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 з механічною характеристикою незалежною від кутової швидкості:

$$M_c = M_{сн}, \quad (2)$$

де M_c – момент статичних опорів вентилятора, Н·м, при заданій кутовій швидкості; $M_{сн}$ – момент статичних опорів, Н·м, при номінальній кутовій швидкості.

Тоді в усталеному режимі роботи

$$\omega = \frac{U}{C} - \frac{M_c R_{я}}{C^2}. \quad (3)$$

Таким чином, для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості, при зміні напруги на якорі електродвигуна кутова швидкість змінюється прямо пропорційно зміні напруги. На рис. 2 показана залежність зміни кутової швидкості від напруги двигуна постійного струму незалежного збудження при живленні від тиристорного перетворювача напруги. Ця експериментальна залежність підтверджує правильність теоретичної формули (3).

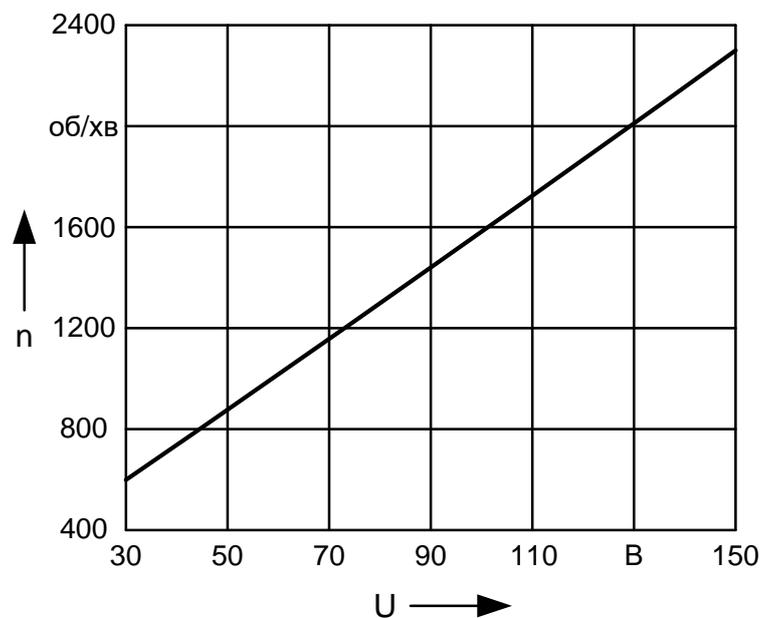


Рис.2. Залежність кутової швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження від напруги при живленні від тиристорного перетворювача напруги

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

$$Q = Q_n \omega_*, \quad (4)$$

де Q_n – номінальна продуктивність робочої машини; $\omega_* = \omega / \omega_n$ – кутова швидкість у відносних одиницях

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

$$q = P_l / Q, \quad (5)$$

де P_l – 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]:

$$\Delta P_v = I_{я}^2 R_{я} = M_c^2 / \beta_d \quad (6)$$

де $I_{я}$ – струм якоря, А; $R_{я}$ – активний опір обмотки якоря, Ом; β_d – жорсткість механічної характеристики двигуна.

Постійні втрати потужності в двигуні постійного струму:

$$\Delta P_c = \Delta P_z + (\Delta P_{мехн} + \Delta P_{стн}) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (7)$$

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

Тоді питома витрата електроенергії:

$$q_* = \frac{P_{2н} + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2н} + \Delta P_{сн} + \Delta P_{вн}} \cdot \frac{Q_n}{Q}, \quad (8)$$

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

Номінальні змінні втрати потужності можна визначити через ККД електродвигуна:

$$\Delta P_{вн} = \frac{P_{2н} (1 - \eta_n)}{\eta_n (\alpha + 1)}, \quad (9)$$

де η_n – номінальний ККД.

Потужність на валу двигуна

$$P_2 = M_c \omega. \quad (10)$$

Підставивши вирази (9) – (10) у вираз (8), отримаємо:

$$q_* = \frac{M_c \omega + \Delta P_3 + (\Delta P_{\text{мехн}} + \Delta P_{\text{стн}}) \omega_*^2 + M_c^2 / \beta_\delta}{(M_c \omega_n + M_c \omega_n (1 - \eta) / \eta) \omega_*}, \quad (11)$$

Розділивши чисельник і знаменник на величину $M_c \omega_n$, після перетворень отримаємо:

$$q_* = \eta_n \left(1 + \frac{(\Delta P_{\text{мехн}} + \Delta P_{\text{стн}}) \omega}{M_c \omega_n^2} + \frac{\Delta P_3}{M_c \omega_n} + \frac{M_c}{\beta_\delta \omega} \right). \quad (12)$$

При зміні напруги питома втрата енергії, яка обумовлена постійними втратами потужності практично не змінюється:

$$\frac{(\Delta P_{\text{мехн}} + \Delta P_{\text{стн}}) \omega}{M_c \omega_n^2} + \frac{\Delta P_3}{M_c \omega_n} \approx \text{const}. \quad (13)$$

Тому при зниженні напруги знижується кутова швидкість електродвигуна, яка обумовлює зростання питомої втрати енергії за рахунок змінних втрат потужності.

У двигунах постійного струму паралельного збудження при зміні напруги змінюється струм збудження:

$$I_3 = \frac{U}{R_3}, \quad (14)$$

де R_3 – опір обмотки збудження.

Оскільки

$$I_{3*} = \Phi_*^2, \quad (15)$$

то

$$\Phi_* = \sqrt{I_*} = \sqrt{U_*}. \quad (16)$$

Тоді механічна характеристика електродвигуна запишеться у вигляді:

$$\omega = \frac{\sqrt{UU_n}}{k \Phi_{\text{ном}}} - \frac{MR_y U_n}{k^2 \Phi_n^2 U}. \quad (17)$$

Таким чином, зниження напруги у двигунів постійного струму паралельного збудження викликає зниження кутової швидкості двигуна. Відповідно, знижується продуктивність робочої машини.

Втрати потужності в обмотці збудження при відхиленні напруги:

$$\Delta P_z = \Delta P_{zn} \omega_*^2. \quad (18)$$

Тоді, підставивши (18) у рівняння (11), отримаємо:

$$q_* = \frac{M_c \omega + \Delta P_{zn} / \omega_*^2 + (\Delta P_{мехн} + \Delta P_{стн}) \omega_*^2 + M_c^2 / \beta_\delta}{(M_c \omega_n + M_c \omega_n (1 - \eta) / \eta) \omega_*}, \quad (19)$$

Розділивши чисельник і знаменник на величину $M_c \omega_n$, після перетворень отримаємо:

$$q_* = \eta_n \left(1 + \frac{(\Delta P_{мехн} + \Delta P_{стн}) \omega}{M_c \omega_n^2} + \frac{\Delta P_{zn} \omega_n^2}{M_c \omega^3} + \frac{M_c}{\beta_\delta \omega} \right). \quad (20)$$

При зниженні напруги знижується кутова швидкість електродвигуна постійного струму паралельного збудження, яка обумовлює зростання питомої втрати енергії.

Висновки і перспективи. 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. Аванесов В. М., Садков Е. В. Анализ структуры потерь электрической энергии в электроустановках при отклонении напряжения от оптимального значения. Энергобезопасность в документах и фактах. 2005. №4. С. 19–21.
2. Адамова С. Аналіз впливу якості електроенергії на роботу струмоприймачів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2018. Вип. 8, т. 2. С. 1-10.
3. Lublica M. Controller design for DC motor. Technical Sciences and Technologies. 2020.. № 4(22), P. 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. 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.

6. 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.

7. [Aadarsh Anuj](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. 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.

References

1. Avanesov, V. M., Sadkov, E. V. (2005). Analiz struktury poter' elektricheskoy energii v elektroustanovkakh pri otklonenii napryazheniya ot optimal'nogo znacheniya [Analysis of the structure of electrical energy losses in electrical installations when the voltage deviates from the optimal value]. Energobezopasnost' v dokumentakh i faktakh, 4, 19–21.

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.

3. Łubica, M. (2020). Controller design for DC motor. Technical Sciences and Technologies, 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., 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.

6. Goroshko, A., Kashtalian, A. (2025). Influence of supply voltage unbalance on induction motor characteristics. Herald of Khmelnytskyi national university. 3 (2), (35), 110-113.

7. [Aadarsh, Anuj](https://www.researchgate.net/publication/365491279). (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

INFLUENCE OF VOLTAGE DEVIATIONS ON THE DRIVE CHARACTERISTICS OF WORKING MACHINES WITH DC MOTORS OF INDEPENDENT AND PARALLEL EXCITATION AT $M_c = \text{const}$

O. Sinyavsky, V. Savchenko, A. Antonyuk, V. Podobailo

Abstract. *Voltage deviation in DC motors leads to losses that have an electromagnetic and technological component.*

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 independent of 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 excitation, the dependence of the productivity of the working machine on the voltage change is linear, and in DC motors of parallel excitation, the productivity of the working machine during voltage deviation changes according to a complex algorithm.

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

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 constant moment of static resistances, which are driven by DC motors of independent and parallel excitation, was carried out. It was established that with a decrease in voltage, specific electricity losses increase.

Key words: *DC motor with independent and parallel excitation, voltage deviation, specific power consumption*