

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА КУТОВУ ШВИДКІСТЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Савченко, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: sinyavsky2008@ukr.net

Анотація. *Двигуни постійного струму послідовного збудження – найпоширеніші з електродвигунів постійного струму, які застосовуються в мобільних машинах.*

У цих двигунах магнітний потік залежить від навантаження двигуна. Оскільки крива намагнічування електродвигуна є нелінійною, то отримати аналітичний вираз для механічної характеристика двигуна не можливо. Тому розглядають роботу двигуна при ненасиченій магнітній системі і насиченій.

Мета дослідження – проаналізувати вплив відхилення напруги на кутову швидкість робочих машин з електродвигуном постійного струму послідовного збудження.

У результаті проведених досліджень встановлені залежності кутової швидкості електродвигуна постійного струму послідовного збудження від напруги для робочих машин з різними типами механічних характеристик при ненасиченій і насиченій магнітній системі.

Встановлено, що закон зміни кутової швидкості електропривода при відхиленні живлячої напруги визначається механічною характеристикою робочої машини. Для робочих машин, в яких момент статичних опорів не залежить або лінійно залежить від кутової швидкості, кутова швидкість змінюється лінійно зі зміною напруги. Для робочих машин з нелінійною механічною характеристикою зміна кутової швидкості електропривода при відхиленні напруги відбувається за складним алгоритмом.

Досліджений також вплив тиристорного перетворювача напруги на мережу живлення. У спектрі гармонік виявлена третя, п'ята і сьома гармоніки.

Ключові слова: *електропривод, електродвигун постійного струму послідовного збудження, кутова швидкість, відхилення напруги, механічна характеристика робочої машини, тиристорний перетворювач напруги, вищі гармоніки*

Актуальність. *Серед двигунів постійного струму двигуни постійного струму послідовного збудження набули найбільшого поширення. Завдяки тому, що вони*

мають значну перевантажувальну здатність, ці електродвигуни застосовують у мобільних машинах.

Відхилення напруги від нормованих значень в електроприводах постійного струму викликає негативні наслідки [1], серед яких найсуттєвішими є порушення нормального ходу технологічних процесів, випуск неякісної продукції, скорочення строку служби електрообладнання та зростання втрат електроенергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У двигунів постійного струму послідовного збудження струм якоря є струмом збудження. Оскільки струм якоря залежить від навантаження двигуна, тому магнітний потік не буде незмінним.

Крива намагнічування (рис. 1) має нелінійний характер і не має точного аналітичного виразу, тому не можна одержати аналітичного виразу для механічної характеристики [2].

Криву намагнічування ділять на дві ділянки: при ненасиченій магнітній системі і насиченій.

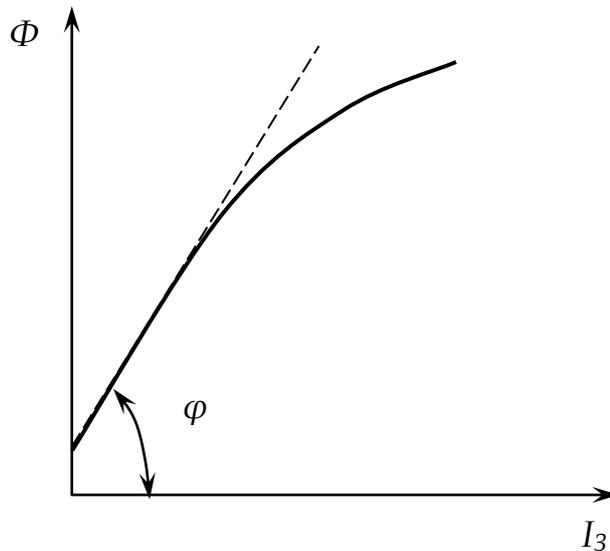


Рис. 1. Крива намагнічування двигуна постійного струму послідовного збудження

При ненасиченій магнітній системі магнітний потік прямо пропорційний струму якоря:

$$\Phi = k_{\phi} I_{\text{я}}, \quad (1)$$

де Φ – магнітний потік, Вб; $k_{\phi} = \operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт пропорційності, Вб/А; $I_{\text{я}}$ – струм якоря, А.

При насиченій магнітній системі магнітний потік приймається незмінним:

$$\Phi = \Phi_{нас}, \quad (2)$$

де $\Phi_{нас}$ – магнітний потік двигуна при насиченій магнітній системі.

Аналітичний вираз статичної електромеханічної характеристики $\omega = f(I_{я})$ двигуна постійного струму має вигляд:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M(R_{\partial\partial} + R_{\partial})}{k^2\Phi^2}, \quad (3)$$

де U – напруга, прикладена до якірного кола, В; $R = R_{\partial\partial} + R_{\partial}$ – сумарний опір якірного кола, який складається з внутрішнього опору двигуна та обмотки збудження $R_{\partial\partial}$ і додаткового опору R_{∂} , Ом; k – конструктивний коефіцієнт машини.

Тоді рівняння механічної характеристики електродвигуна постійного струму послідовного збудження має вигляд [3, 4]:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k k_{\Phi} M}} - \frac{R_{\partial\partial}}{k k_{\Phi}}. \quad (4)$$

При насиченій магнітній системі механічна характеристика описується лінійною залежністю:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\partial\partial}}{k^2\Phi_{нас}^2} M. \quad (5)$$

де $\Phi_{нас}$ – магнітний потік двигуна при насиченій магнітній системі.

Як випливає із формул (4), (5), внаслідок відхилення напруги змінюється кутова швидкість двигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних характеристик робочих машин. Тому дослідження зміни кутової швидкості електроприводів постійного струму при відхиленні напруги має теоретичне і практичне значення.

Мета дослідження – проаналізувати вплив відхилення напруги на кутову швидкість робочих машин з електродвигуном постійного струму послідовного збудження.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз зміни кутової швидкості електроприводів постійного струму послідовного збудження при відхиленні напруги проведений з використанням положень теорії електропривода, які стосуються

електромеханічних властивостей електродвигунів, приводних характеристик робочих машин і механізмів та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях напругу на якорі електродвигуна змінювали за допомогою тиристорного перетворювача напруги «Lenze», а частоту обертання електродвигуна вимірювали електротахометром.

При дослідженнях впливу тиристорного перетворювача напруги на мережу живлення форму кривої напруги визначали за допомогою електронного осцилографа Vellman, а вищі гармоніки – цифровим мультиметром DMK-32.

Результати досліджень та їх обговорення. Закон зміни кутової швидкості двигуна постійного струму послідовного збудження при зміні напруги визначається механічною характеристикою робочої машини:

$$M_c = M_0 + (M_{cn} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (6)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини при заданій кутовій швидкості; M_0 – початковий момент; M_{cn} – момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості; ω і ω_n – задане і номінальне значення кутової швидкості; x – показник степеню.

В усталеному режимі роботи $M_d = M_c$.

Тоді при ненасиченій магнітній системі:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_\phi (M_0 + (M_{cn} - M_0) (\omega / \omega_n)^x)}} - \frac{R_{\delta\phi}}{kk_\phi}. \quad (7)$$

Якщо знехтувати початковим моментом робочої машини M_0 , отримаємо:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_\phi M_{cn} (\omega / \omega_n)^x}} - \frac{R_{\delta\phi}}{kk_\phi}. \quad (8)$$

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості, показник степеню у рівнянні механічної характеристики $x=0$. Тоді закон зміни кутової швидкості (8) запишеться у вигляді:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_\phi M_{cn}}} - \frac{R_{\delta\phi}}{kk_\phi}. \quad (9)$$

Таким чином, для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості, кутова швидкість змінюється лінійно зі зміною напруги на якорі електродвигуна. На рис.1 показана залежність зміни частоти обертання від напруги для двигуна постійного струму послідовного збудження при живленні від тиристорного перетворювача напруги, яка підтверджує правильність теоретичної формули (9).

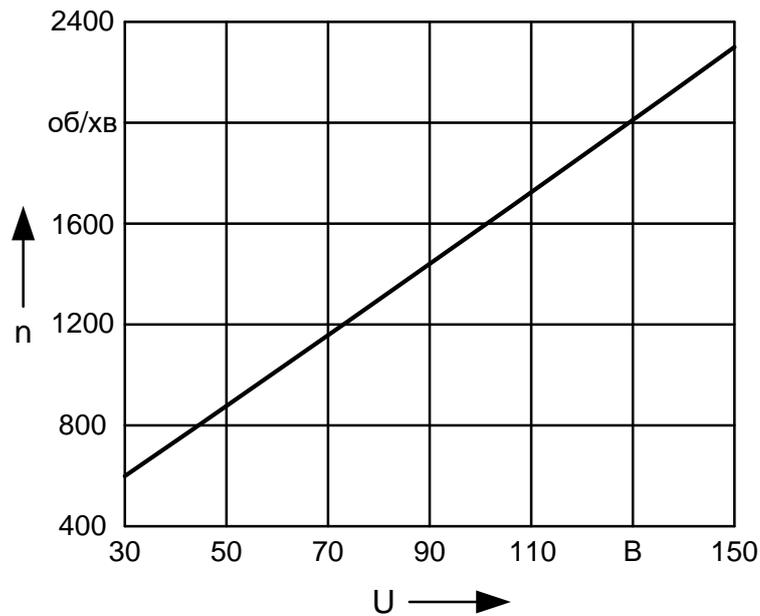


Рис.1. Залежність частоти обертання двигуна постійного струму послідовного збудження від напруги при незмінному моменті статичних опорів робочої машини

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості, показник степеню в рівнянні механічної характеристики $x=1$. Тоді закон зміни кутової швидкості запишеться у вигляді

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\phi}(M_0 + (M_{сн} - M_0)(\omega / \omega_n))}} - \frac{R_{\text{дв}}}{kk_{\phi}}. \quad (10)$$

або, знехтувавши початковим моментом робочої машини,

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\phi}M_{сн}(\omega / \omega_n)}} - \frac{R_{\text{дв}}}{kk_{\phi}}. \quad (11)$$

Таким чином, для робочих машин, у яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості, кутова швидкість також змінюється нелінійно зі зміною напруги на якорі електродвигуна.

Для робочих машин з вентиляторною механічною характеристикою ($x=2$) закон зміни кутової швидкості описується рівнянням:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\Phi}(M_0 + (M_{сн} - M_0)(\omega/\omega_n)^2)}} - \frac{R_{\delta\delta}}{kk_{\Phi}}, \quad (12)$$

або

$$\omega = \frac{U\omega_n}{\omega\sqrt{kk_{\Phi}M_{сн}}} - \frac{R_{\delta\delta}}{kk_{\Phi}}. \quad (13)$$

Для робочих машин з гіперболічною механічною характеристикою ($x=-1$), закон зміни кутової швидкості прийме вигляд:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\Phi}(M_0 + (M_{сн} - M_0)(\omega_n/\omega))}} - \frac{R_{\delta\delta}}{kk_{\Phi}}, \quad (14)$$

або при нехтуванні початкового моменту робочої машини:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\Phi}M_{сн}(\omega_n/\omega)}} - \frac{R_{\delta\delta}}{kk_{\Phi}}. \quad (15)$$

Таким чином, для робочих машин, в яких момент статичних опорів нелінійно залежить від кутової швидкості, кутова швидкість змінюється зі зміною напруги за складним алгоритмом.

Коли магнітна система насичена, тоді

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\delta\delta}}{k^2\Phi_{нас}^2}(M_0 + (M_{сн} - M_0)(\omega/\omega_n)^x). \quad (16)$$

Якщо знехтувати початковим моментом робочої машини M_0 , отримаємо:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\delta\delta}M_{сн}\omega^x}{k^2\Phi_{нас}^2\omega_n^x}. \quad (17)$$

Для робочих машин, в яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості, закон зміни кутової швидкості запишеться у вигляді:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\delta\delta}M_{сн}}{k^2\Phi_{нас}^2}. \quad (18)$$

Таким чином, для робочих машин, в яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості, кутова швидкість змінюється лінійно зі зміною напруги на якорі електродвигуна.

Для робочих машин, в яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості, закон зміни кутової швидкості запишеться у вигляді:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\text{дв}}}{k^2\Phi_{нас}^2} (M_0 + (M_{сн} - M_0)(\omega/\omega_n)) \quad (19)$$

або, знехтувавши початковим моментом робочої машини,

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\text{дв}}M_{сн}\omega}{k^2\Phi_{нас}^2\omega_n} \quad (20)$$

Таким чином, для робочих машин, в яких момент статичних опорів лінійно лежить від кутової швидкості, кутова швидкість змінюється лінійно зі зміною напруги на якорі електродвигуна.

Для робочих машин з вентиляторною механічною характеристикою закон зміни кутової швидкості описується рівнянням:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\text{дв}}}{k^2\Phi_{нас}^2} (M_0 + (M_{сн} - M_0)(\omega/\omega_n)^2), \quad (21)$$

або

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\text{дв}}M_{сн}\omega^2}{k^2\Phi_{нас}^2\omega_n^2} \quad (22)$$

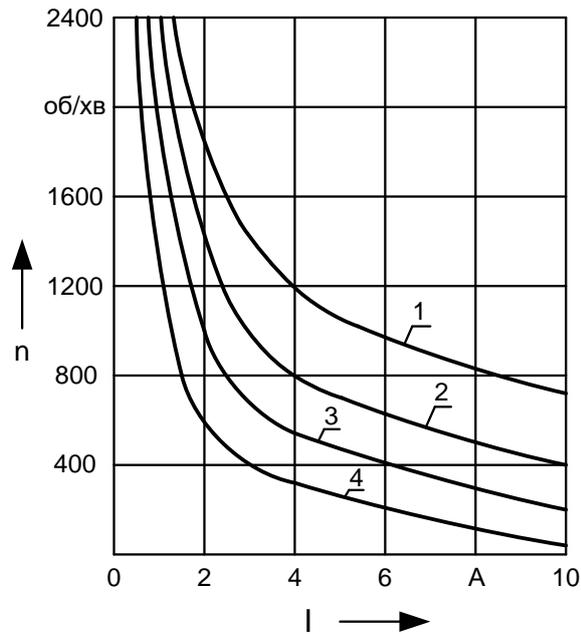
Для робочих машин, у яких момент статичних опорів гіперболічно залежить від кутової швидкості, закон зміни кутової швидкості прийме вигляд:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\text{дв}}}{k^2\Phi_{нас}^2} (M_0 + (M_{сн} - M_0)(\omega_n/\omega)), \quad (22)$$

або при нехтуванні початковим моментом робочої машини:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{\text{дв}}M_{сн}\omega_n}{k^2\Phi_{нас}^2\omega} \quad (23)$$

Таким чином, для робочих машин, в яких момент статичних опорів нелінійно залежить від кутової швидкості, кутова швидкість змінюється зі зміною напруги за складним алгоритмом.



**Рис. 2. Електромеханічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження при напрузі:
1 – 220 В (природна); 2 – 160 В; 3 – 120 В; 4 – 80 В**

Експериментально визначені електромеханічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження при різних значеннях напруги на двигуні показані на рис. 2.

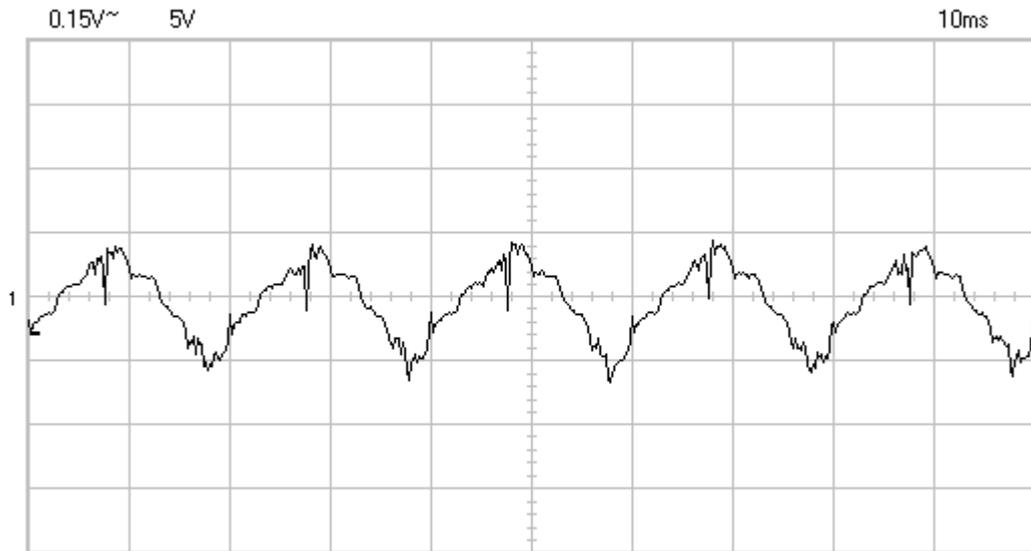
При зниженні напруги у двигунів постійного струму послідовного збудження зменшується кутова швидкість, а жорсткість механічної характеристики залишається незмінною.

Нині живлення регульованих електроприводів постійного струму здійснюється від тиристорних перетворювачів напруги. Такі перетворювачі отримують живлення від мережі змінного струму, здійснюють випрямлення змінної напруги в постійну і регулюють амплітудне значення випрямленої напруги. Для зменшення пульсацій напруги послідовно з обмоткою якоря електродвигуна постійного струму вмикається дросель.

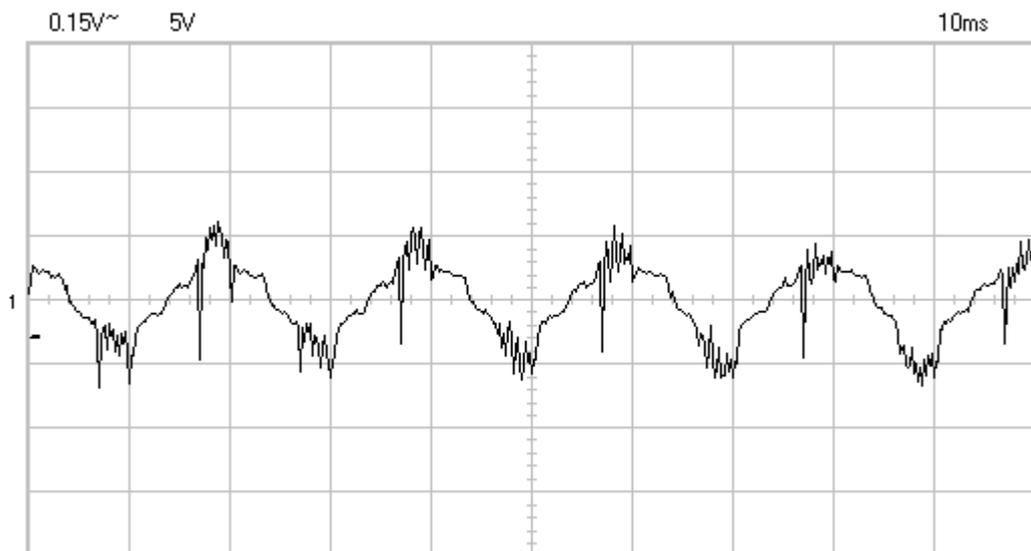
Оскільки перетворювач напруги і дросель є нелінійними елементами, вони впливають на форму кривої напруги живлячої мережі. Тому були проведені експериментальні дослідження впливу тиристорного перетворювача напруги постійного струму на живлячу мережу.

Криві напруги в мережі живлення регульованого електропривода постійного струму послідовного збудження з тиристорним перетворювачем напруги представлені на рис. 3.

У результаті проведених досліджень у спектрі гармонік виявлена третя, п'ята і сьома гармоніки.



a



б

Рис.3. Криві напруги у мережі живлення регульованого електропривода з двигуном постійного струму послідовного збудження з тиристорним перетворювачем напруги:

a – при напрузі 50 В; *б* – при напрузі 150 В

Висновки і перспективи.

Проведені дослідження показали, що відхилення напруги істотно впливає на механічні і експлуатаційні характеристики електродвигунів постійного струму послідовного збудження, а застосовувані для живлення двигунів перетворювачі напруги спотворюють форму кривої напруги живлячої мережі.

Закон зміни кутової швидкості електропривода при відхиленні живлячої напруги визначається механічною характеристикою робочої машини. Для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить або лінійно залежить від кутової швидкості, кутова швидкість змінюється лінійно зі зміною напруги. Для робочих машин з нелінійною механічною характеристикою зміна кутової швидкості електропривода при відхиленні напруги відбувається за складним алгоритмом.

Список використаних джерел

1. Войтюк Д.Г., Лисенко В.П., Мартиненко І.І. [та ін.]. Вплив якості електроенергії на функціонування споживачів у сільському господарстві. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2004. №1(6). С. 3–12.
2. Лаврінченко Ю. М., Савченко П. І., Синявський О. Ю. [та ін.]. Основи електропривода. К.: Ліра-К, 2016. 524 с.
3. GusztávÁron Sziki, Kornél Sarvajcz^a, János Kiss^b, Tibor Gál^a, Attila Szántó, András Gábora^a, Géza Husi Experimental investigation of a series wound DC motor for modeling purpose in electric vehicles and mechatronics systems. Measurement. , 2017. Volume 109. P. 111-118.
4. J. S. Valdez Martinez; P. Guevara Lopez; J. J. Medel Juarez. Series Wound DC Motor modeling and simulation, considering magnetic, mechanical and electric power losses. 2009. [52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems](#). DOI: [10.1109/MWSCAS.2009.5235954](#).

References

1. Voitiuk, D. H., Lysenko, V.P., Martynenko, I.I. et al. (2004). Vplyv yakosti elektroenerhii na funktsionuvannia spozhyvachiv u silskomu gospodarstvi [The impact of electricity quality on the functioning of consumers in agriculture]. Elektryfikatsiia ta avtomatyzatsiia silskoho gospodarstva, 1(6), 3–12.
2. Lavrinenko, Yu. M., Savchenko, P. I., Sinyavsky, O. Yu. et al. (2016). Osnovy elektropryvoda [Basics of an electric drive]. Kyiv: Lira-K, 524.

3. GusztávÁron Sziki, Kornél Sarvajcz, János Kiss, Tibor Gál, Attila Szántó, András ábora, Géza Husi (2017). Experimental investigation of a series wound DC motor for modeling purpose in electric vehicles and mechatronics systems. *Measurement*, 109, 111-118.

4. J. S. Valdez Martinez; P. Guevara Lopez; J. J. Medel Juarez. (2009). Series Wound DC Motor modeling and simulation, considering magnetic, mechanical and electric power losses. [52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems](#). DOI: [10.1109/MWSCAS.2009.5235954](#).

INFLUENCE OF VOLTAGE DEVIATION ON THE ANGULAR SPEED OF SERIES-EXCITED DC MOTORS

O. Sinyavsky, V. Savchenko

Abstract. *Series-excited DC motors are the most common DC motors used in mobile machines.*

In these motors, the magnetic flux depends on the motor load. Since the magnetization curve of the electric motor is nonlinear, it is not possible to obtain an analytical expression for the mechanical characteristics of the motor. Therefore, the operation of the motor is considered in an unsaturated magnetic system and a saturated one.

The purpose of the study is to analyze the influence of voltage deviation on the angular speed of working machines with a series-excited DC motor.

As a result of the conducted research, the dependences of the angular speed of a series-excited DC motor on voltage for working machines with different types of mechanical characteristics in an unsaturated and saturated magnetic system were established.

It was established that the law of change of the angular speed of the electric drive when the supply voltage deviates is determined by the mechanical characteristic of the working machine. For working machines in which the moment of static resistance does not depend or linearly depends on the angular speed, the angular speed changes linearly with the change in voltage. For working machines with nonlinear mechanical characteristics, the change in the angular speed of the electric drive when the voltage deviates occurs according to a complex algorithm.

The influence of the thyristor voltage converter on the power supply network was also studied. The third, fifth and seventh harmonics were found in the harmonic spectrum.

Key words: *electric drive, series-excited DC motor, angular speed, voltage deviation, mechanical characteristic of the working machine, thyristor voltage converter, higher harmonics*