

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук

Проведено дослідження перехідних процесів в електроприводі постійного струму при відхиленні напруги. Встановлено залежності тривалості перехідного процесу та усталеної швидкості від напруги.

Електродвигун постійного струму, електропривод, відхилення напруги, електромагнітна стала часу, електромеханічна стала часу, усталена швидкість, час перехідного процесу.

Знання законів протікання перехідних процесів дає можливість створити електропривод, який би максимально забезпечував вимоги технологічного процесу при оптимальному використанні електродвигунів.

Перехідні режими впливають на продуктивність робочих машин і якість перероблюваного або вироблюваного продукту. Для електроприводів, які тривалий час працюють у перехідних режимах, суттєве значення можуть мати також втрати електроенергії на прискорення або гальмування системи, внаслідок чого знижується ККД електропривода [1].

На протікання перехідних процесів в електроприводах постійного струму значною мірою впливає напруга. Тому дослідження впливу напруги на перехідні процеси в електроприводах має теоретичне і практичне значення.

Мета досліджень – аналіз впливу відхилення напруги на протікання перехідних процесів в електроприводах постійного струму.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз перехідних процесів в електроприводах постійного струму проведено з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей двигунів постійного струму, динаміки і перехідних процесів в електроприводах, та застосуванням математичного моделювання.

Результати досліджень. Механічна характеристика двигунів постійного струму незалежного і паралельного збудження лінійна [2], тобто

$$M_{\partial} = \beta_{\partial}(\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де M_{∂} – момент двигуна, Н·м; β_{∂} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с; ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу, с⁻¹; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹.

В електродвигунів постійного струму послідовного збудження при насиченій магнітній системі механічну характеристику також можна вважати лінійною:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{об}}{k^2\Phi_{нас}^2}M, \quad (2)$$

де U – напруга, В; $R_{об}$ – опір обмоток двигуна, Ом; k – конструктивний коефіцієнт машини; $\Phi_{нас}$ – магнітний потік при насиченій магнітній системі, Вб.

При зміні прикладеної напруги до обмотки якоря статична механічна характеристика електродвигуна описується рівнянням:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta} \left(\frac{U}{C} - \omega \right), \quad (3)$$

де C – стала двигуна.

Рівняння, яке описує електромагнітні перехідні процеси у двигуні постійного струму незалежного і паралельного збудження, отримують із другого закону Кірхгофа для кола якоря:

$$U = C\omega + I_{я}R_{я} + L_{я} \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

де $R_{я}$ – активний опір обмотки якоря, Ом; $L_{я}$ – індуктивність обмотки якоря, Гн.

Після перетворень із виразу (4) отримуємо диференціальне рівняння, яке описує електромагнітний перехідний процес:

$$T_e \frac{dM_{\delta}}{dt} + M_{\delta} = \beta_{\delta} \left(\frac{U}{C} - \omega \right), \quad (5)$$

де $T_e = L_{я}/R_{я}$ – електромагнітна стала часу, с; $\beta_{\delta} = C^2/R_{я}$ – жорсткість механічної характеристики двигуна, Н·м·с.

Із рівняння (5) маємо:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta} \left(\frac{U}{C} - \omega \right) - T_e \frac{dM_{\delta}}{dt}. \quad (6)$$

Електромеханічний перехідний процес в електроприводі описується рівнянням руху електропривода:

$$M_{\delta} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини, Н·м; J – зведений момент інерції електропривода, кг·м².

Тоді

$$M_{\delta} = M_c + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (8)$$

Із виразів (6) і (8) отримаємо:

$$\beta_{\delta} \left(\frac{U}{C} - \omega \right) - T_e \left(\frac{dM_c}{dt} + J \frac{d^2\omega}{dt^2} \right) = M_c + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (9)$$

Розглянемо перехідний процес в електроприводі при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($M_c = const$).

Диференційне рівняння, яке описує перехідний процес, матиме вигляд:

$$T_e \frac{J}{\beta_\delta} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{J}{\beta_\delta} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{C} - \frac{M_c}{\beta_\delta}, \quad (10)$$

або

$$T_e T_M \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c, \quad (11)$$

де T_M – електромеханічна стала часу:

$$T_M = \frac{J}{\beta_\delta}, \quad (12)$$

ω_c – усталена кутова швидкість:

$$\omega_c = \frac{U}{C} - \frac{M_c}{\beta_\delta}. \quad (13)$$

Відхилення напруги, як впливає з (13), викликає зміну усталеної кутової швидкості.

Коли $T_M < 4T_e$, корені характеристичного рівняння визначаються за формулою:

$$k_{1,2} = -(1/2T_e) \pm j\sqrt{(1/T_e T_M) - (1/2T_e)^2} = -\alpha \pm j\gamma. \quad (14)$$

Відхилення напруги не впливає на електромеханічну та електромагнітну сталі часу, а також корені характеристичного рівняння.

При початкових умовах $t = 0$, $\omega = \omega_{поч}$,

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_0 = (M_{поч} - M_c) / J \quad (15)$$

диференційне рівняння (11) має розв'язок:

$$\omega = \omega_c + e^{-\alpha t} \left[(\omega_{поч} - \omega_c) \cos \gamma t + \frac{M_{поч} - M_c + J\alpha(\omega_{поч} - \omega_c)}{J\gamma} \sin \gamma t \right]. \quad (16)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (16) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{поч} - \omega_c) e^{-\alpha t} \left(\cos \gamma t + \frac{\alpha T_M - 1}{T_M \gamma} \sin \gamma t \right). \quad (17)$$

Криві перехідного процесу $\omega=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 1. Як впливає із наведених залежностей, відхилення напруги не впливає на частоту коливань, а впливає на максимальне динамічне відхилення швидкості, яке зростає із

збільшенням напруги. В ряді випадків таке відхилення кутової швидкості має негативне значення для технологічного процесу.

Якщо $T_M > 4T_e$, корені характеристичного рівняння:

$$k_{1,2} = -(1/2T_e) \pm \sqrt{(1/2T_e)^2 - (1/T_e T_M)}. \quad (18)$$

Тоді розв'язком диференційного рівняння (11) при початкових умовах (15) буде вираз:

$$\omega = \omega_c + \frac{Jk_2(\omega_{noch} - \omega_c) - (M_{noch} - M_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_1 t} + \frac{(M_{noch} - M_c) - Jk_1(\omega_{noch} - \omega_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_2 t}. \quad (19)$$

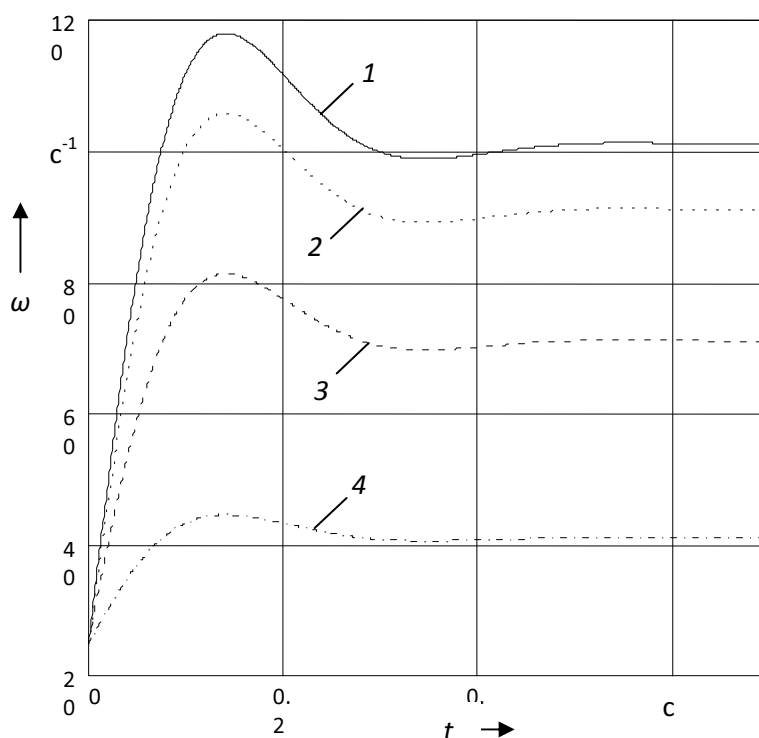


Рис. 1. Зміна кутової швидкості електродвигуна у часі при $T_M < 4T_e$ і напрузі:

1 – 242 В; 2 – 220 В; 3 – 176 В; 4 – 110 В

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (19) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + \frac{\omega_{noch} - \omega_c}{T_M(k_2 - k_1)} \left[(T_M k_2 + 1)e^{k_1 t} - (T_M k_1 + 1)e^{k_2 t} \right] \quad (20)$$

Криві перехідного процесу $\omega=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 2. У цьому випадку швидкість змінюється за експоненціальним законом. Усталене значення кутової швидкості визначається напругою, а час перехідного процесу не залежить від неї.

Якщо $T_M = 4T_e$, характеристичне рівняння має один корінь:

$$k = -1/2T_e. \quad (21)$$

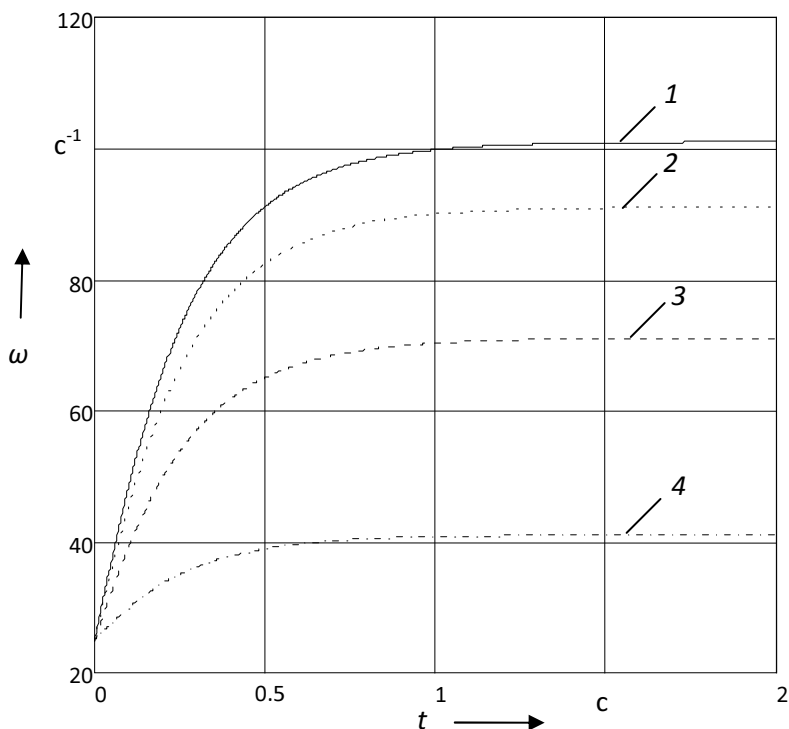


Рис. 2. Зміна кутової швидкості електродвигуна у часі при $T_M > 4T_e$ і напрузі:
 1 – 242 В; 2 – 220 В; 3 – 176 В; 4 – 110 В

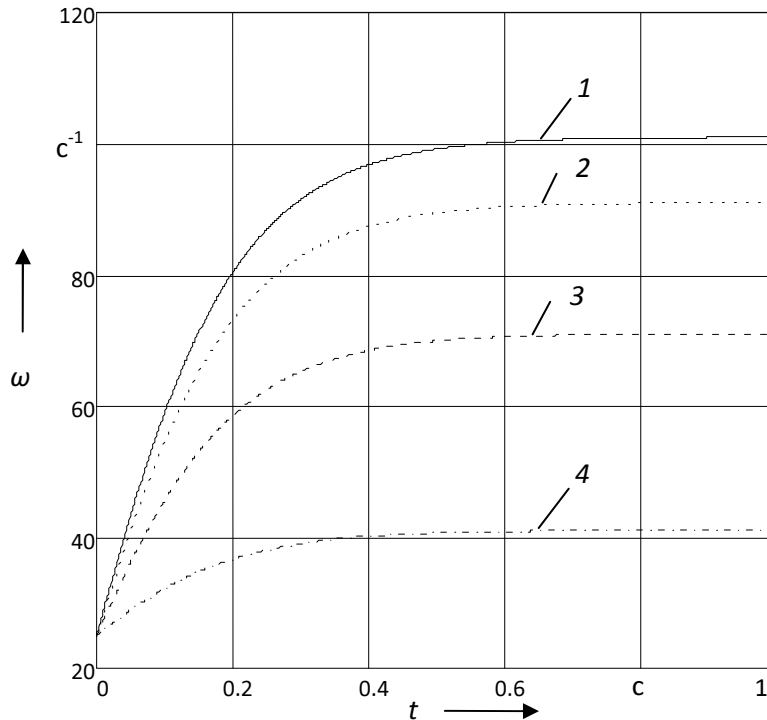
Тоді диференціальне рівняння (11) при початкових умовах (15) має розв'язок:

$$\omega = \omega_c + e^{kt} \left(\omega_{noch} - \omega_c + \frac{M_{noch} - M_c - Jk(\omega_{noch} - \omega_c)}{J} t \right). \quad (22)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (22) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{noch} - \omega_c) e^{kt} \left(1 - \left(k + \frac{1}{T_M} \right) t \right). \quad (23)$$

Криві перехідного процесу $\omega=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 3. Кутова швидкість у цьому випадку змінюється за нелінійним законом. Відхилення напруги викликає лише зміну усталеної кутової швидкості, а тривалість перехідного процесу не змінюється.



**Рис. 3. Зміна кутової швидкості електродвигуна у часі при $T_M=4T_e$ і напрузі:
1 – 242 В; 2 – 220 В; 3 – 176 В; 4 – 110 В**

Якщо момент статичних опорів робочої машини лінійно залежить від кутової швидкості, то

$$M_c = M_0 + \beta_c \omega, \quad (24)$$

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

Підставимо значення моменту статичних опорів робочої машини у рівняння (9):

$$\beta_o \left(\frac{U}{C} - \omega \right) - T_e \left(\beta_c \frac{d\omega}{dt} + J \frac{d^2\omega}{dt^2} \right) = J \frac{d\omega}{dt} + M_0 + \beta_c \omega, \quad (25)$$

звідки отримуємо диференціальне рівняння, яке описує перехідний процес в електроприводі:

$$T_e \frac{J}{\beta_o + \beta_c} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{J + \beta_c T_e}{\beta_o + \beta_c} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{\beta_o \cdot U / C - M_0}{\beta_o + \beta_c}. \quad (26)$$

Вирази $\frac{J}{\beta_o + \beta_c} = T'_m$ і $\frac{J}{\beta_c} = T''_m$ є електромеханічними сталими часу.

Тоді диференціальне рівняння (26) запишеться у вигляді:

$$T_e T'_m \frac{d^2\omega}{dt^2} + T'_m (1 + T_e / T''_m) \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c, \quad (27)$$

де ω_c – усталене значення кутової швидкості:

$$\omega_c = \frac{\beta_\delta \cdot U / C - M_0}{\beta_\delta + \beta_c}. \quad (28)$$

Коли $T'_M < \frac{4T_e}{1+T_e/T''_M}$, корені характеристичного рівняння визначаються за формулою:

$$k_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T''_M} \right) \pm j \sqrt{\frac{1}{T_e T'_M} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T''_M} \right)^2} = -\alpha \pm j\gamma. \quad (29)$$

При початкових умовах $t = 0$, $\omega = \omega_{ноч}$,

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_0 = (M_{ноч} - M_c) / J \quad (30)$$

диференційне рівняння (26) має розв'язок:

$$\omega = \omega_c + e^{-\alpha t} \left[(\omega_{ноч} - \omega_c) \cos \gamma t + \frac{M_{ноч} - M_c + J\alpha(\omega_{ноч} - \omega_c)}{J\gamma} \sin \gamma t \right]. \quad (31)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (31) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{ноч} - \omega_c) e^{-\alpha t} \left(\cos \gamma t + \frac{T_M \alpha - 1}{T_M \gamma} \sin \gamma t \right). \quad (32)$$

Коли $T'_M > \frac{4T_e}{1+T_e/T''_M}$, корені характеристичного рівняння визначаються за формулою:

$$k_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T''_M} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T''_M} \right)^2 - \frac{1}{T_e T'_M}}. \quad (33)$$

Тоді розв'язком диференційного рівняння (27) при початкових умовах (30) буде вираз:

$$\omega = \omega_c + \frac{Jk_2(\omega_{ноч} - \omega_c) - (M_{ноч} - M_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_1 t} + \frac{(M_{ноч} - M_c) - Jk_1(\omega_{ноч} - \omega_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_2 t}. \quad (34)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (34) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + \frac{\omega_{ноч} - \omega_c}{T_M(k_2 - k_1)} \left[(T_M k_2 + 1) e^{k_1 t} - (T_M k_1 + 1) e^{k_2 t} \right] \quad (35)$$

Коли $T'_M = \frac{4T_e}{1+T_e/T''_M}$, корені характеристичного рівняння визначаються за формулою:

$$k_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_m} \right). \quad (36)$$

Тоді диференціальне рівняння (27) при початкових умовах (30) має розв'язок:

$$\omega = \omega_c + e^{kt} \left(\omega_{noch} - \omega_c + \frac{M_{noch} - M_c - Jk(\omega_{noch} - \omega_c)}{J} t \right). \quad (37)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (37) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{noch} - \omega_c) e^{kt} \left(1 - \left(k + \frac{1}{T_m} \right) t \right). \quad (38)$$

Отже, рівняння перехідного процесу зміни кутової швидкості аналогічні рівнянням, отриманим для випадку, коли момент статичних опорів робочої машини не залежить від кутової швидкості.

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів нелінійно залежить від кутової швидкості, можна виконати лінеаризацію механічної характеристики в межах діапазону зміни кутової швидкості при зміні напруги. Така характеристика досить точно описує реальну механічну характеристику. Тому в цьому випадку можна користуватися відповідними рівняннями зміни кутової швидкості, отриманими для робочих машин, у яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості.

Висновки

Відхилення напруги в електроприводах постійного струму не впливає на електромагнітну та електромеханічну сталі часу, а викликає лише зміну усталеної кутової швидкості. В електроприводах з невеликим моментом інерції підвищення напруги викликає збільшення відхилення динамічного значення кутової швидкості, а частота коливань не змінюється. В електроприводах, де електромагнітна стала часу значно перевищує електромагнітну, перехідні процеси при зміні напруги протікають за експоненціальним законом. При цьому тривалість перехідного процесу не залежить від напруги.

Список літератури

1. Електропривод / [Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І. та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода / Ключев В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 560 с.
3. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода / Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

Проведены исследования переходных процессов в электроприводе постоянного тока при отклонении напряжения. Установлены зависимости длительности переходного процесса и установившейся скорости от напряжения.

Электродвигатель постоянного тока, электропривод, отклонение напряжения, электромагнитная постоянная времени, электромеханическая постоянная времени, установившаяся скорость, время переходного процесса.

Researches of transients in the direct electric drive at the change of voltage are carried out. Dependences of the duration of the transient process and the established speed on voltage are established.

The direct electric motor, the electric drive, voltage fluctuation, electromagnetical constant of time, electromechanical constant of time, the established speed, the time of transients.

УДК 621.3.067

**ДОСЛІДЖЕННЯ НА МОДЕЛІ В MatLab
ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
СЕРІЇ Lenze 530**

***І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, кандидати технічних наук
Національний університет
біоресурсів і природокористування України
А.В. Торопов, кандидат технічних наук
ТОВ "ЦІТ Альтера"***

Наведено комп'ютерну модель електропривода постійного струму з тиристорним перетворювачем напруги Lenze 534 та результати досліджень електромеханічних характеристик.

Перехідний процес, тиристорний перетворювач напруги, зворотний зв'язок, ПІ-регулятор, електромеханічна характеристика, модель.

Нині в промисловості широко використовується сучасний регульований електропривод на базі силової електроніки. Технічні характеристики, які наводяться в паспортних даних на елементи привода не завжди дають відповіді про його роботу в перехідних режимах. Для отримання інформації про перехідні режими необхідно проводити дослідження на лабораторних чи випробувальних стендах, що пов'язано зі значними витратами часу та додатковими витратами на їх створення. Значно спростити дослідження перехідних процесів можна з використанням комп'ютерної моделі такого електропривода в системі MatLab, який складається з двигуна постійного струму незалежного збудження та тиристорного перетворювача напруги серії Lenze 530.