

ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ НА ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

***В.В. Савченко, О.Ю. Синявський, кандидати технічних наук
В.В. Савченко, студент магістратури***

Проведені дослідження електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів в асинхронному електроприводі при несиметрії напруг. Встановлений вплив несиметрії напруг на тривалість перехідного процесу та усталену швидкість.

Асинхронний електродвигун, електропривод, несиметрія напруг, електромагнітна стала часу, електромеханічна стала часу, усталена швидкість, тривалість пуску.

Перехідні режими впливають на продуктивність робочих машин і якість продукту, який переробляється. 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 асинхронних електроприводах значною мірою впливає несиметрія напруг. Тому дослідження впливу несиметрії напруг на перехідні процеси в асинхронних електроприводах має теоретичне і практичне значення.

Мета досліджень - проаналізувати вплив несиметрії напруг на протікання перехідних процесів в асинхронних електроприводах.

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

Результати досліджень. При несиметрії напруг двигун працює на робочій ділянці механічної характеристики, яку можна вважати лінійною [3]:

$$M_{\delta} = \beta_{\text{днс}} (\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де M_{δ} – момент двигуна, Н·м; $\beta_{\text{днс}}$ – жорсткість механічної характеристики електродвигуна при несиметрії напруг, Н·м·с; ω_0 – синхронна кутова швидкість двигуна, с⁻¹; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹.

Електромагнітний перехідний процес на робочій ділянці природної механічної характеристики асинхронного електродвигуна при несиметрії напруг опишеться рівнянням:

$$T_e \frac{dM_{\delta}}{dt} + M_{\delta} = \beta_{\text{днс}} (\omega_0 - \omega), \quad (2)$$

де T_e – електромагнітна стала часу, с.

Тоді можна записати:

$$T_e \frac{d^2 M_\delta}{dt^2} + \frac{dM_\delta}{dt} = -\beta_{\text{днс}} \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

звідки

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{\beta_{\text{днс}}} \left(T_e \frac{d^2 M_\delta}{dt^2} + \frac{dM_\delta}{dt} \right). \quad (4)$$

Механічний перехідний процес описується рівнянням руху електропривода:

$$M_\delta - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

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

При ударному навантаженні перехідний процес в електроприводі відбувається при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($M_c = \text{const}$).

Підставивши вираз (4) у рівняння руху електропривода (5), отримаємо:

$$M_\delta - M_c = -\frac{J}{\beta_{\text{днс}}} \left(T_e \frac{d^2 M_\delta}{dt^2} + \frac{dM_\delta}{dt} \right), \quad (6)$$

або

$$T_e T_{\text{мнс}} \frac{d^2 M_\delta}{dt^2} + T_{\text{мнс}} \frac{dM_\delta}{dt} + M_\delta = M_c, \quad (7)$$

де $T_{\text{мнс}}$ – електромеханічна стала часу при асиметрії напруги:

$$T_{\text{мнс}} = \frac{J}{\beta_{\text{днс}}}. \quad (8)$$

Оскільки при несиметрії напруг зменшується жорсткість механічної характеристики двигуна, то, як випливає із формули (8), вона викликає зростання електромеханічної сталої часу.

Відносно швидкості диференціальне рівняння має вигляд:

$$T_e T_{\text{мнс}} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_{\text{мнс}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - M_c / \beta_{\text{днс}} = \omega_c, \quad (9)$$

де ω_c – усталене значення кутової швидкості.

Як випливає із формули (9), несиметрія напруги викликає зниження усталеної кутової швидкості.

Якщо $T_m < 4T_e$, корені характеристичного рівняння:

$$k_{1,2} = -(1/2T_e) \pm j\sqrt{(1/T_e T_{\text{мнс}}) - (1/2T_e)^2} = -\alpha \pm j\gamma. \quad (10)$$

Несиметрія напруг викликає зміну уявної частини коренів характеристичного рівняння, тоді як дійсна частина залишається незмінною. При цьому для електроприводів з невеликим моментом інерції несиметрія напруг може усунути появу коливань.

При початкових умовах $t = 0$, $M_\partial = M_{\text{поч}}$, отримаємо розв'язок рівняння (7):

$$M_\partial = M_c + e^{-\alpha t} \left[(M_{\text{поч}} - M_c) \cos \gamma t + \frac{\beta_{\text{днс}} (\omega_0 - \omega_{\text{поч}}) - M_{\text{поч}} (1 - \alpha T_e) - \alpha T_e M_c}{\gamma T_e} \sin \gamma t \right]. \quad (11)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (11) запишеться у вигляді:

$$M_\partial = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c) e^{-\alpha t} \left(\cos \gamma t + \frac{\alpha}{\gamma} \sin \gamma t \right). \quad (12)$$

Для кутової швидкості при початкових умовах $t = 0$, $\omega = \omega_{\text{поч}}$, розв'язок диференційного рівняння (9) має вигляд:

$$\omega = \omega_c + e^{-\alpha t} \left[(\omega_{\text{поч}} - \omega_c) \cos \gamma t + \frac{M_{\text{поч}} - M_c + J \alpha (\omega_{\text{поч}} - \omega_c)}{J \gamma} \sin \gamma t \right]. \quad (13)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (13) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{\text{поч}} - \omega_c) e^{-\alpha t} \left(\cos \gamma t + \frac{\alpha T_{\text{мнс}} - 1}{T_{\text{мнс}} \gamma} \sin \gamma t \right). \quad (14)$$

Криві перехідного процесу $M_\partial = f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 1, а $\omega = f(t)$ – на рис. 2.

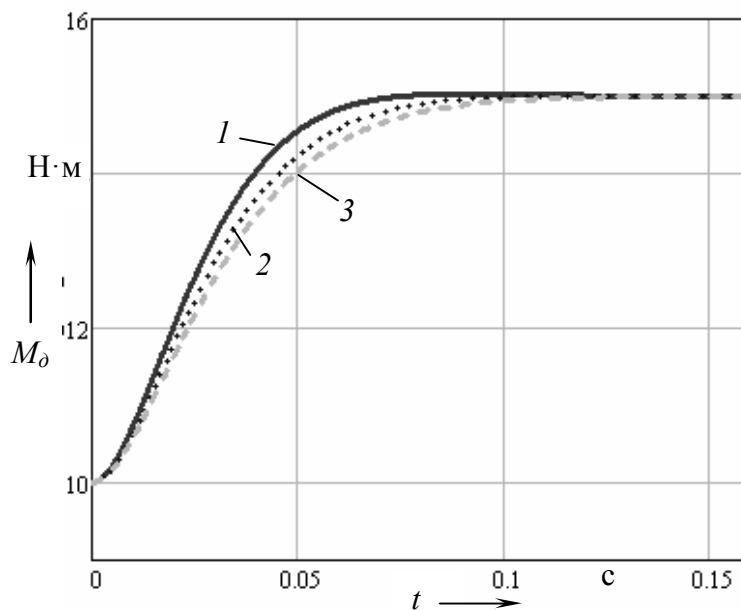


Рис. 1. Криві перехідного процесу $M_\partial = f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($T_m < 4T_e$) і коефіцієнті несиметрії напруг за зворотною послідовністю:
1 – $K_{2u} = 0$ %; 2 – $K_{2u} = 24,6$ %; 3 – $K_{2u} = 33,9$ %

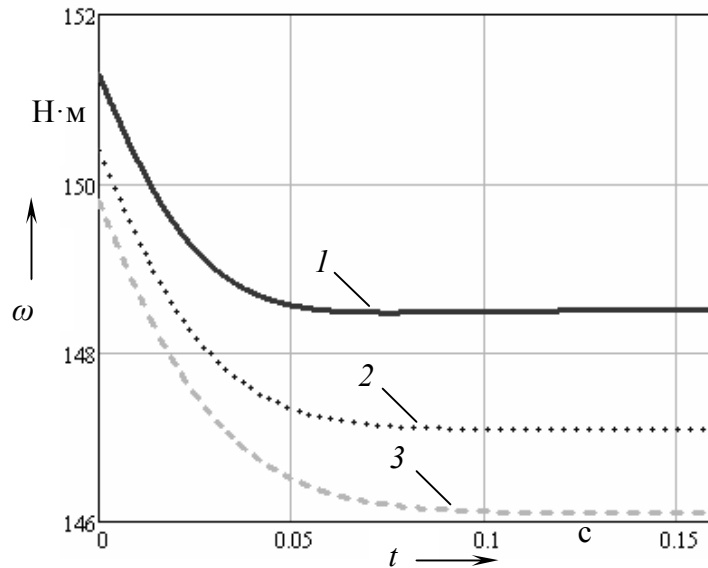


Рис. 2. Криві перехідного процесу $\omega=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($T_m < 4T_e$) і коефіцієнті несиметрії напруг за зворотною послідовністю:

1 – $K_{2u}=0\%$; 2 – $K_{2u}=24,6\%$; 3 – $K_{2u}=33,9\%$

Як випливає із наведених залежностей, при несиметрії напруг зменшується значення максимального відхилення моменту. При цьому динамічне падіння швидкості зростає.

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

$$k_{1,2} = -(1/2T_e) \pm \sqrt{(1/2T_e)^2 - (1/T_e T_{мс})}. \quad (15)$$

Тоді розв'язок рівняння (7) запишеться у вигляді:

$$M_\delta = M_c + \frac{M_{ноч}(1+k_2T_e) - k_2T_eM_c - \beta_{днс}(\omega_0 - \omega_{ноч})}{T_e(k_2 - k_1)} e^{k_1t} + \frac{\beta_{днс}(\omega_0 - \omega_{ноч}) - M_{ноч}(1+k_1T_e) + k_1T_eM_c}{T_e(k_2 - k_1)} e^{k_2t} \quad (16)$$

Таким чином, при несиметрії напруг змінюються корені характеристичного рівняння і коефіцієнти в диференційному рівнянні, яке описує перехідний процес в електроприводі.

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

$$M_\delta = M_c + \frac{M_c - M_{ноч}}{k_1 - k_2} (k_2 e^{k_1t} - k_1 e^{k_2t}). \quad (17)$$

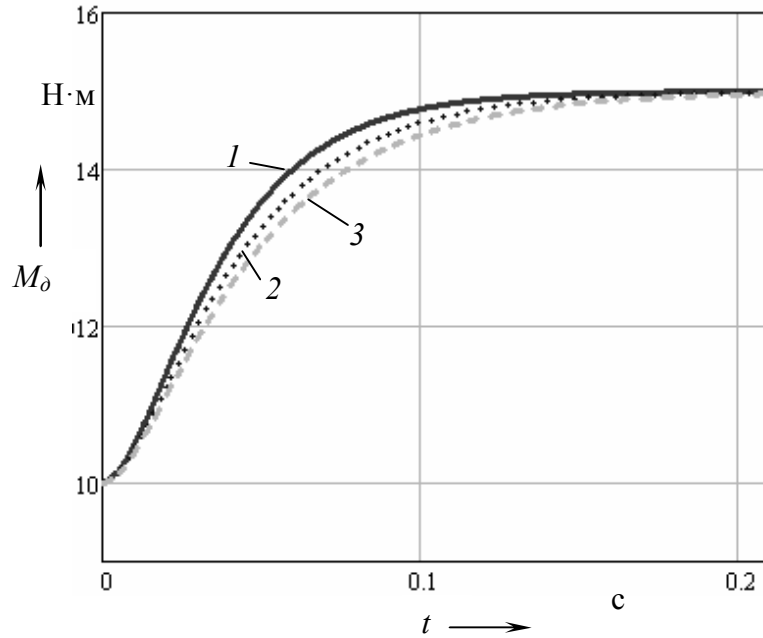
Для кутової швидкості розв'язок рівняння (9) записують у вигляді:

$$\omega = \omega_c + \frac{Jk_2(\omega_{ноч} - \omega_c) - (M_{ноч} - M_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_1t} + \frac{(M_{ноч} - M_c) - Jk_1(\omega_{ноч} - \omega_c)}{J(k_2 - k_1)} e^{k_2t}. \quad (18)$$

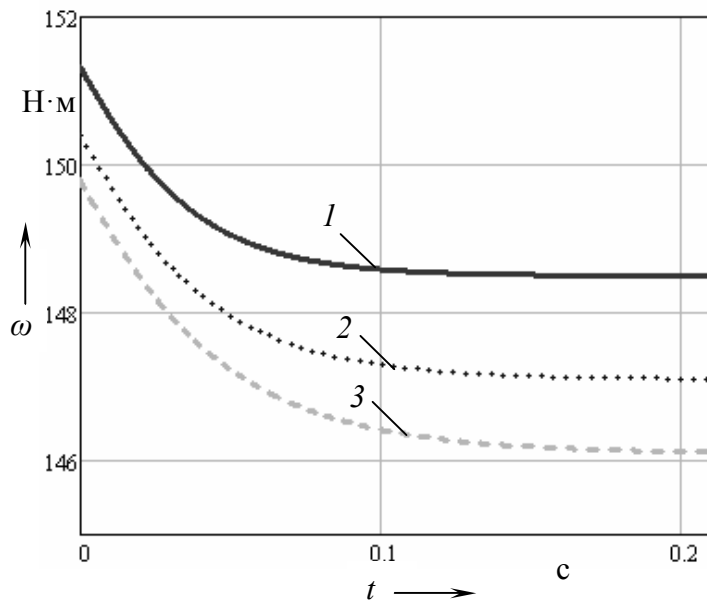
Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (18) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + \frac{\omega_{noch} - \omega_c}{T_{мис} (k_2 - k_1)} \left[(T_{мис} k_2 + 1) e^{k_1 t} - (T_{мис} k_1 + 1) e^{k_2 t} \right] \quad (19)$$

Криві перехідного процесу $M_\delta = f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показані на рис. 3, а $\omega = f(t)$ – на рис. 4.



**Рис. 3. Криві перехідного процесу $M_\delta = f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($T_m > 4T_e$) і коефіцієнті несиметрії напруг за зворотною послідовністю:
1 – $K_{2u} = 0$ %; 2 – $K_{2u} = 24,6$ %; 3 – $K_{2u} = 33,9$ %**



**Рис. 4. Криві перехідного процесу $\omega = f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($T_m > 4T_e$) і коефіцієнті несиметрії напруг за зворотною послідовністю:
1 – $K_{2u} = 0$ %; 2 – $K_{2u} = 24,6$ %; 3 – $K_{2u} = 33,9$ %**

Перехідні процеси зміни швидкості і моменту в цьому випадку відбуваються за експоненціальним законом. При несиметрії напруг момент і кутова швидкість двигуна досягають усталеного значення за довший час, ніж при номінальній напрузі.

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

$$k = -1/2T_e. \quad (20)$$

Тоді загальний рівняння (7) запишеться у вигляді:

$$M_\partial = M_c + e^{kt} \left(M_{\text{поч}} - M_c + \frac{\beta_{\text{днс}}(\omega_0 - \omega_{\text{поч}}) - M_{\text{поч}}(1 + kT_e) + kT_e M_c}{T_e} t \right). \quad (21)$$

Таким чином, коефіцієнт у диференційному рівнянні, яке описує перехідний процес в електроприводі, залежить від несиметрії напруг, на відміну від кореня характеристичного рівняння.

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (21) прийме вигляд:

$$M_\partial = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{kt}(1 - kt). \quad (22)$$

Для кутової швидкості розв'язок рівняння (9) записують у вигляді:

$$\omega = \omega_c + e^{kt} \left(\frac{M_{\text{поч}} - M_c}{J} t + (\omega_{\text{поч}} - \omega_c)(1 - kt) \right). \quad (23)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (23) прийме вигляд:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{\text{поч}} - \omega_c)e^{kt} \left(1 - \left(k + \frac{1}{T_{\text{мнс}}} \right) t \right), \quad (24)$$

або

$$\omega = \omega_c + (\omega_{\text{поч}} - \omega_c)e^{kt} \left(1 - \frac{k}{2} t \right). \quad (25)$$

Крива перехідного процесу $M_\partial = f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини показана на рис. 5, а $\omega = f(t)$ – на рис. 6. У цьому випадку момент і кутова швидкість двигуна змінюються в часі нелінійно. Причому усталене значення кутової швидкості залежить від несиметрії напруг, а час перехідного процесу не залежить від неї.

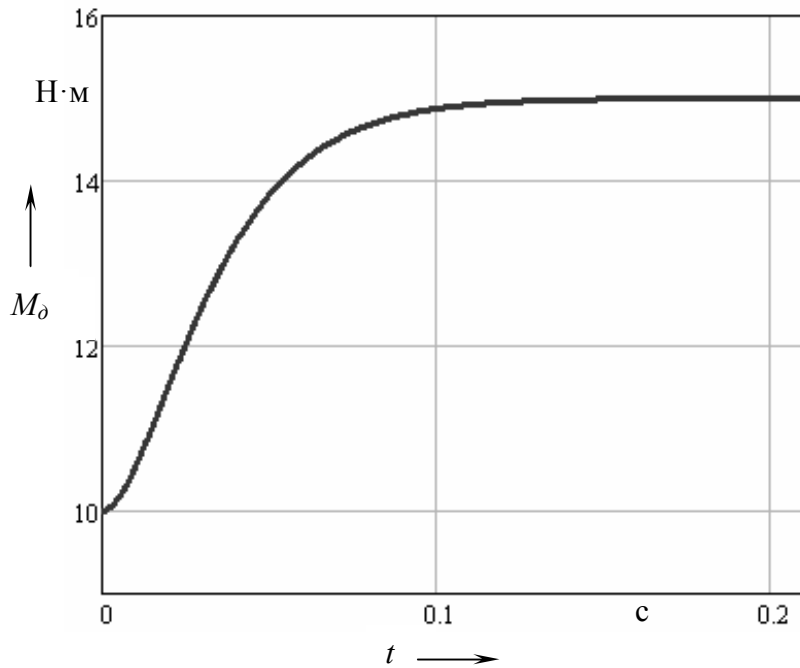
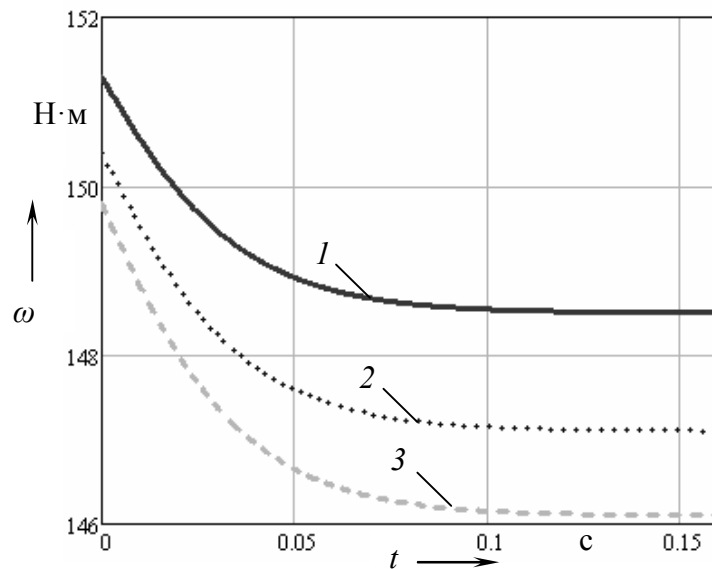


Рис. 5. Крива перехідного процесу $M_d=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($T_m=4T_e$)



**Рис. 6. Криві перехідного процесу $\omega=f(t)$ при незмінному моменті статичних опорів робочої машини ($T_m=4T_e$) і коефіцієнті несиметрії напруг за зворотною послідовністю:
1 – $K_{2u}=0\%$; 2 – $K_{2u}=24,6\%$; 3 – $K_{2u}=33,9\%$**

Висновки

Несиметрія напруг впливає на характер перехідних процесів в асинхронному електроприводі. Для електроприводів з невеликою електро механічною сталою часу несиметрія напруг може усунути коливання напруги і швидкості. При цьому зменшуються значення максимального відхилення моменту і зростає динамічне падіння швидкості. Для електроприводів, у яких електро механічна стала часу перевищує

електромагнітну більше ніж у чотири рази, зміни швидкості і моменту в часі відбуваються за експоненціальним законом. При несиметрії напруг момент і кутова швидкість двигуна досягають усталеного значення за довший час. Для електроприводів, у яких електромеханічна стала часу дорівнює чотирьом електромагнітним, момент і кутова швидкість двигуна змінюються в часі нелінійно. Усталене значення кутової швидкості залежить від несиметрії напруг, а час перехідного процесу не залежить від неї.

Список використаних джерел

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. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній / [Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода / Ключев В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 560 с.

Проведены исследования электромагнитных и электромеханических переходных процессов в асинхронном электроприводе при несимметрии напряжений. Установлено влияние несимметрии напряжений на длительность переходного процесса и установившуюся скорость.

Асинхронный электродвигатель, электропривод, несимметрия напряжений, электромагнитная постоянная времени, электромеханическая постоянная времени, установившаяся скорость, длительность переходного процесса.

The researches of electromagnetic and electromechanical transients in asynchronous electric drive at asymmetry in voltages are carried out. The influence of voltage asymmetry are set on the duration of the transition process and the established speed.

Asynchronous motor, electric drive, asymmetry voltages, electromagnetic time constant, electromechanical time constant, an established speed, duration of the transition process.