

УДК 621.327.539

ЕНЕРГЕТИКА ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ПРИ ВІДХИЛЕННІ НАПРУГИ І ЧАСТОТИ СТРУМУ

Синявський О.Ю., к.т.н.,

Савченко В.В., к.т.н.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Тел. (063) 566-96-28

Анотація – наведено результати досліджень енергетичних показників роботи асинхронного електропривода в перехідних режимах при відхиленні напруги і частоти струму. Встановлені залежності втрат енергії від напруги і частоти струму в пусковий період, при гальмуванні двигуна противмиканням і динамічному гальмуванні.

Ключові слова – асинхронний електродвигун, електропривод, відхилення напруги, несиметрія напруги, частота струму, втрати енергії, гальмування противмиканням, динамічне гальмування.

Постановка проблеми. Визначення енергетичних показників роботи електропривода в перехідних режимах має важливе значення, бо у перехідних режимах струми в обмотках двигуна значно перевищують номінальні значення і спричиняють підвищення втрат енергії, суттєво впливаючи на нагрівання двигуна. Особливо важливе значення має визначення втрат електроенергії в перехідних режимах для електроприводів, у яких динамічний режим є основним і вони практично не виходять із перехідних режимів. До таких приводів належать електроприводи кранових механізмів, прокатних станів, стругальних верстатів тощо.

Аналіз останніх досліджень. В теорії електропривода отримані аналітичні залежності для втрат енергії в перехідних процесах при номінальних параметрах мережі живлення[1]. Проводилися дослідження з впливу відхилення напруги і частоти струму на втрати енергії в асинхронному електроприводі в усталеному режимі роботи. Проте не проводилися дослідження з впливу відхилення показників якості електроенергії на втрати енергії в перехідних режимах.

Формулювання мети статті. Метою даної роботи є встановлення залежностей втрат енергії від напруги і частоти струму в перехідних режимах в асинхронних електроприводах.

Основна частина. Якщо знехтувати постійними втратами, як незначними при перехідних процесах, то втрати енергії у перехідних режимах в асинхронному електроприводі при роботі без навантаження, коли $M_c=0$, складуть [1]

$$\Delta A_{v0} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) (s_{поч}^2 - s_{кін}^2), \quad (1)$$

де J – зведений момент інерції електропривода, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с^{-1} ; R_1 – опір обмотки статора, Ом; R_2' – зведений до обмотки статора опір обмотки ротора, Ом; $s_{поч}$ – початкове ковзання; $s_{кін}$ – кінцеве ковзання.

Отже, втрати енергії в асинхронному електродвигуні при перехідних процесах без навантаження не залежать від форми механічної характеристики, тривалості перехідного процесу, а також напруги.

При відхиленні частоти струму від номінального значення втрати енергії в асинхронному електродвигуні при перехідних процесах визначаються за формулою

$$\Delta A_{v0} = \frac{2\pi^2 Jf^2}{p^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) (s_{поч}^2 - s_{кін}^2), \quad (2)$$

де f – частота струму, Гц; p – число пар полюсів.

При пуску двигуна без навантаження $s_{поч}=1$, $s_{кін}\approx 0$, тому втрати енергії

$$\Delta A_{n0} = \frac{2\pi^2 Jf^2}{p^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right). \quad (3)$$

При гальмуванні електродвигуна противмиканням без навантаження $s_{поч}\approx 2$, $s_{кін}=1$ і втрати енергії визначаються за формулою

$$\Delta A_{zn0} = \frac{6\pi^2 Jf^2}{p^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right). \quad (4)$$

При динамічному гальмуванні втрати енергії в обмотках ротора

$$\Delta A_{\partial n0} = \frac{2\pi^2 Jf^2}{p^2}, \quad (5)$$

а втрати енергії в обмотках статора не залежать від частоти струму.

Отже, втрати енергії в асинхронному електроприводі в перехідних режимах без навантаження прямо пропорційні квадрату частоти струму.

Для визначення втрат енергії в асинхронному електроприводі при наявності навантаження скористаємося формулою [1, 3]

$$\Delta A_{vc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left[\int_0^{t_n} M_c (\omega_0 - \omega) dt + J \left((\omega_0 (\omega_{кін} - \omega_{поч}) + \frac{\omega_{кін}^2 - \omega_{поч}^2}{2}) \right) \right], \quad (6)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини, Н·м, $\omega_{кін}$ – кінцеве значення кутової швидкості, с^{-1} ; $\omega_{поч}$ – початкове значення кутової швидкості, с^{-1} .

Якщо $M_c = const$, то втрати енергії при пуску двигуна визначаються за виразом

$$\Delta A_{nc} = J \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\left(\omega_0 \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) + M_c \omega_0 t_n - M_c \int_0^{t_n} \omega dt \right]. \quad (7)$$

Оскільки робочу ділянку механічної характеристики асинхронного двигуна можна вважати лінійною [2], то в усталеному режимі роботи

$$M_\delta = M_c = \beta_\delta U_*^2 (\omega_0 - \omega), \quad (8)$$

де β_δ – жорсткість механічної характеристики двигуна, Н·м·с; U_* – напруга на статорі у відносних одиницях.

Звідси

$$\omega_c = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_\delta U_*^2}. \quad (9)$$

З урахуванням (9) вираз для втрати енергії при пуску двигуна при відхиленні напруги матиме вигляд

$$\Delta A_{nc} = J \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\left(\frac{\omega_0^2}{2} - \frac{M_c^2}{2\beta_\delta^2 U_*^4} \right) + M_c \omega_0 t_n(U) - M_c \int_0^{t_n} \omega dt \right]. \quad (10)$$

Втрати енергії при пуску двигуна при несиметрії напруги визначаються за виразом

$$\Delta A_{nc} = J \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\left(\frac{\omega_0^2}{2} - \frac{M_c^2}{2\beta_{\delta nc}^2} \right) + M_c \omega_0 t_n(U_a) - M_c \int_0^{t_n} \omega dt \right], \quad (11)$$

де $\beta_{\delta nc}$ – жорсткість механічної характеристики двигуна при несиметрії напруги, Н·м·с.

Отже, зниження і несиметрія напруги викликає зменшення моменту двигуна і, відповідно, зростання часу пуску, тоді як кутова швидкість двигуна неістотно відрізняється від синхронної, тому при зниженні і несиметрії напруги втрати енергії в асинхронному електроприводі зростають.

При пуску двигуна при відхиленні частоти струму втрати енергії визначаються за формулою

$$\Delta A_{nc} = J \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \left[\left(\frac{2\pi^2 f^2}{p^2} - \frac{M_c^2}{2\beta_\delta^2} \right) + M_c \omega_0 t_n(f) - M_c \int_0^{t_n} \omega dt \right]. \quad (12)$$

При підвищенні частоти струму в асинхронному електроприводі зростають кутова швидкість двигуна і час пуску, тому втрати енергії зростають, а при зниженні частоти струму – зменшуються.

При гальмуванні електродвигуна противмиканням втрати енергії визначаються залежністю [1]

$$\Delta A_{enc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left[J \left(\omega_0 \omega_c + \frac{\omega_c^2}{2} \right) - M_c \omega_0 t_z - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right]. \quad (13)$$

При відхиленні напруги втрати енергії при гальмуванні двигуна противмиканням описуються формулою

$$\Delta A_{enc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left[J \left(\frac{3}{2} \omega_0^2 - 2\omega_0 \frac{M_c}{\beta_o U_*^2} + \frac{M_c^2}{2\beta_o^2 U_*^4} \right) - M_c \omega_0 t_z(U) - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right], \quad (14)$$

а при несиметрії напруги

$$\Delta A_{enc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left[J \left(\frac{3}{2} \omega_0^2 - 2\omega_0 \frac{M_c}{\beta_{оnc}} + \frac{M_c^2}{2\beta_{оnc}^2} \right) - M_c \omega_0 t_z(U_{nc}) - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right]. \quad (15)$$

При гальмуванні двигуна противмиканням зниження і несиметрія напруги викликають зменшення втрат енергії.

При відхиленні частоти струму втрати енергії при гальмуванні двигуна противмиканням знаходять за виразом

$$\Delta A_{enc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left[J \left(\frac{6\pi^2 f^2}{p^2} - \frac{4\pi f M_c}{p\beta_o} + \frac{M_c^2}{2\beta_o^2} \right) - \frac{2\pi f M_c t_z(f)}{p} - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right]. \quad (16)$$

При підвищенні частоти струму втрати енергії в обмотках двигуна при гальмуванні противмиканням зростають, а при зниженні – зменшуються.

При динамічному гальмуванні втрати енергії в обмотках ротора визначаються залежністю [1]

$$\Delta A_{zdc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left(\frac{J\omega_c^2}{2} - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right). \quad (17)$$

При відхиленні напруги втрати енергії в обмотках ротора при динамічному гальмуванні двигуна описуються формулою

$$\Delta A_{zdc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left(\frac{J}{2} \left(\omega_0 - \frac{M_c}{\beta_o U_*^2} \right)^2 - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right), \quad (18)$$

а при несиметрії напруги

$$\Delta A_{zdc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left(\frac{J}{2} \left(\omega_0 - \frac{M_c}{\beta_{оnc}} \right)^2 - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right). \quad (19)$$

Аналіз формул (18) і (19) показує, що втрати енергії в обмотках ротора при зниженні і несиметрії напруги зменшуються, а при їх підвищенні – зростають.

При відхиленні частоти струму втрати енергії в обмотках ротора при динамічному гальмуванні двигуна визначаються залежністю

$$\Delta A_{zdc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left(\frac{J}{2} \left(\frac{2\pi f}{p} - \frac{M_c}{\beta_o} \right)^2 - M_c \int_0^{t_z} \omega dt \right). \quad (20)$$

Як впливає із виразу (20), при підвищенні частоти струму втрати енергії в обмотках ротора зростають, а при зниженні – зменшуються.

Висновки. Втрати енергії в асинхронному електродвигуні при перехідних процесах без навантаження не залежать від напруги і прямо пропорційні квадрату частоти струму.

При наявності навантаження зниження і несиметрія напруги викликають зростання втрат енергії при пуску і їх зменшення при гальмуванні противмиканням і динамічному гальмуванні. При підвищенні частоти струму втрати енергії в асинхронному електроприводі в перехідних режимах зростають, а при зниженні – зменшуються.

Література

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 / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 560 с.
3. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.

ЭНЕРГЕТИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ ТОКА

Синявский А.Ю., Савченко В.В.

Аннотация

Проведены исследования энергетических показателей работы асинхронного электропривода в переходных режимах при отклонении напряжения и частоты тока. Установлены зависимости потерь энергии от напряжения и частоты тока в пусковой период, при торможении двигателя противовключением и динамическом торможении.

POWER TRANSIENT IN ASYNCHRONOUS DRIVES AT VOLTAGE AND FREQUENCY DEVIATIONS

A. Sinyavsky, V. Savchenko

Summary

The investigation of the energy performance of asynchronous electric drive are conducted intransients at the deviates of voltage and frequency. Dependences of the energy losses are set on the voltage and frequency in the starting period, at the motor braking with opposition and dynamic braking.