

## ВИЗНАЧЕННЯ ККД і $\cos \varphi$ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНО ЗМІННОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Стариш О.Г., магістрант, Реуцький М.О., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

В ряді установок асинхронні двигуни працюють при безперервно змінному навантаженні, наприклад, в приводі станків-качалок для глибоких насосів на нафтових промислах. Для оцінки економічності різних типів асинхронних двигунів необхідно знати ккд і  $\cos \varphi$  для такого роду навантаження. Знання дійсних величин ккд і  $\cos \varphi$  для таких випадків також необхідно для правильно підрахунку величини споживаної енергії, потужності трансформаторів і розрахунку електричних мереж.

Є велика кількість робіт, присвячених вивченню роботи АД при змінному навантаженні, в яких визначаються тільки втрати [1], а формул для ккд немає, або приведені формули ккд для одного окремого випадку [2], або пропонуються формули, для користування яких необхідно проводити достатньо складні розрахунки [3].

В даній роботі запропоновані прості формули експлуатаційних значень ккд і коефіцієнта потужності, для користування якими достатньо знати значення коефіцієнта форми кривої навантаження і значень ккд та  $\cos \varphi$  двигуна при незмінному в часі навантаженні.

Користування загальновідомою формулою для ккд за цикл при  $P_2=f(t)$ ,

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{\int_0^t P_2 dt}{\int_0^t \frac{P_2}{\eta} dt} \quad (1)$$

де  $P_2$  – миттєве значення корисної потужності на валу асинхронного двигуна, може бути значно спрощено для тих окремих випадків які практично часто зустрічаються, коли величина  $k$  – коефіцієнта форми кривої навантаження, може бути вирахована аналітично. Наприклад, графік навантаження зрівноважених станків-качалок із достатньою точністю може бути представлений сумою постійної складової і синусоїди. В ряду інших випадків коефіцієнт  $k$  відомий, так як його величина потрібна для проведення інших розрахунків. У всіх цих випадках формули, які приведені нижче, являють собою вагомні переваги у порівнянні із попередньою формулою (1).

Коефіцієнт форми кривої корисної потужності:

$$k = \frac{P_{2k}}{P_{2c}},$$

де  $P_{2k}$  і  $P_{2c}$  – відповідно, середньоквадратичне і середнє значення корисної потужності.

Дійсне значення ккд за цикл:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{P_{2c}}{P_{2c} + Q}, \quad (2)$$

де  $Q$  – середнє за цикл значення втрат при змінному навантаженні.

Вважаємо, що двигун вибраний для середньоквадратичної потужності. Для спільності приймаємо що  $P_{2k} < P_{2н}$ , де  $P_{2н}$  – номінальна потужність двигуна.

Позначимо  $\eta_x$  – ккд двигуна при корисній потужності, рівній  $P_{2k}$  і постійному по часу навантаженні. Тоді

$$Q = \frac{1 - \eta_x}{\eta_x} P_{2k} \quad (3)$$

$$\eta_{ц} = \frac{\eta_x}{\eta_x + (1 - \eta_x)k} \quad (4)$$

Формула (4) вказує на характер зміни ккд при безперервно змінному навантаженні в залежності від коефіцієнта форми кривої потужності на валу двигуна.

Із цієї формули видно, що  $\eta_{ц}$  значно залежить як від величини коефіцієнта форми кривої  $k$ , так і від величини  $\eta_x$ . Якщо в області високих значень  $\eta_x$  (наприклад 0,95) ккд мало залежить від  $k$  при його змін в широких межах, то в області низьких значень  $\eta_x$  (наприклад 0,7) зміна  $\eta_x$  досить значна.

На рисунку 1 представлена залежність  $\eta_{ц}$  від  $\eta_n$  і  $k$  для окремого випадку, коли  $P_{2k} = P_{2н}$  і  $\eta_x = \eta_n$ , де  $\eta_n$  – ккд двигуна при постійному по часу номінальному навантаженні.

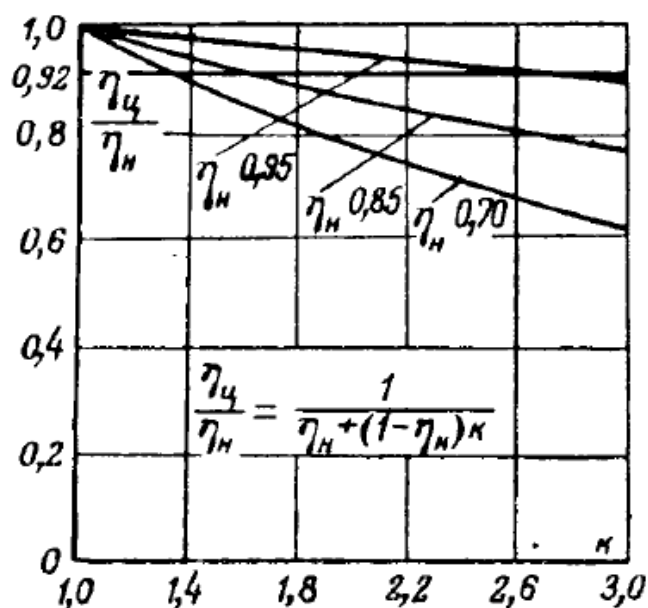


Рисунок 1 – Залежність відношення ккд за цикл до номінального ккд від коефіцієнта форми  $k$

Формула (4) і криві рисунку 1 дають можливість порівняти ккд двигуна з нормальним і підвищеним ковзанням при  $P_{2k} = P_{2н}$ . Як відомо, двигуни з підвищеним ковзанням мають більші втрати і як наслідок більш низький ккд, ніж двигуни загальнопромислового призначення при постійному в часі навантаженні. Однак ці двигуни при правильному виборі і використанні махових мас можуть зберегти постійну потужність на валу при змінному

навантаженні, іншими словами, двигун із підвищеним ковзанням може бути вибраний так, щоб він працював при значенні  $k$ , близькому до 1. Тоді

$$P_{2c.n} = P_{2k.n} = P_{n.n},$$

де індекс  $n$  показує, що дані величини відносяться до двигуна із підвищеним ковзанням.

Можна прийняти, що ккд двигуна із підвищеним ковзанням в середньому на 8% нижче ккд двигуна з нормальним ковзанням при постійному номінальному навантаженні. Для, відповідним чином підбраного, двигуна із підвищеним ковзанням  $\eta_{цн} = \eta_{нп}$ , тому  $\eta_{цн}$  може бути представлений на рисунку 1 горизонтальною лінією. Це дозволяє судити, при яких значеннях  $\eta_x$  і  $k$  той чи інший двигун має більш високий ккд.

Формула (4) дає можливість вираховувати ккд різних типів асинхронних двигунів при безперервно змінному навантаженні, для вирішення питання про економічність того чи іншого типу двигуна необхідно ще значення коефіцієнта потужності. Під коефіцієнтом потужності при безперервно змінному навантаженні  $\cos \varphi_{ц}$  слід розуміти таку його величину, яка дає можливість визначити середньоквадратичне значення активної складової споживаючого при цьому двигуном струму  $I_{1кц}$ .

Тоді:

$$I_{1кц} = \frac{P_{1c}}{mU_1 \cos \varphi_{ц}},$$

де  $P_{1c}$  – середня величина активної потужності за один цикл;  $m$  – число фаз;  $U_1$  – фазна напруга на зажимах двигуна.

На основі раніше приведених формул:

$$P_{1c} = \frac{P_{2c}}{\eta_{ц}} = \frac{P_{2k}}{k\eta_{ц}},$$

Тоді:

$$I_{1кц} = \frac{P_{2k}}{k\eta_{ц} mU_1 \cos \varphi_{ц}}, \quad (5)$$

При постійному в часі навантаженні двигуна:

$$I_{1к} = \frac{P_{2k}}{\eta_x mU_1 \cos \varphi_x}, \quad (6)$$

Порівнявши вираз для  $I_{1кц}$  і  $I_{1к}$  при безперервно змінному і еквівалентно постійному в часі навантаженні, отримаємо:

$$\cos \varphi_{ц} = \cos \varphi_x \frac{\eta_x}{k\eta_{ц}}.$$

Підставимо сюди  $\frac{\eta_x}{\eta_{ц}}$  із формули (4) і знайдемо:

$$\cos \varphi_{ц} = \cos \varphi_x \left( \frac{\eta_x}{k} + 1 - \eta_x \right), \quad (7)$$

Представляє інтерес порівняти формулу (7) з аналогічною формулою В. А. Шубенко [5] яка отримана значно важчим шляхом.

Користуючись круговою діаграмою і ввівши ряд допущень,

В. А. Шубенко вираховує значення реактивної  $A_p$  і активної  $A_a$  енергії за час  $t$ . Потім визначається:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ц}} = \frac{A_p}{A_a} \quad \text{і} \quad \operatorname{Cos} \varphi_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{ц}}}}$$

Із формул В. А. Шубенко можна отримати після простих перетворень в наших позначеннях:

$$\operatorname{Cos} \varphi_{\text{ц}} = \operatorname{Cos} \varphi_{\text{х}} \left( \frac{\eta_{\text{х}}}{k} + 1 - \eta_{\text{х}} \right) * \sqrt{\frac{1}{1 + \left[ \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \eta_{\text{х}} \operatorname{Cos} \varphi_{\text{х}} \right]^2}} \quad (8)$$

Формула може давати похибку до 5-7 %.

Відношення  $\frac{\operatorname{Cos} \varphi_{\text{ц}}}{\operatorname{Cos} \varphi_{\text{н}}}$  для окремого випадку, коли  $P_{2k} = P_{2н}$  і  $\operatorname{Cos} \varphi_{\text{х}} = \operatorname{Cos} \varphi_{\text{н}}$ , представлено на рисунку 2, як функція від  $k$ .

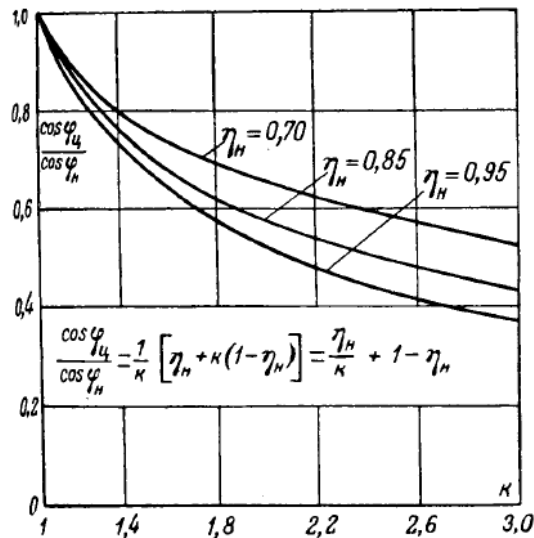


Рисунок 2 – Залежність відношення  $\frac{\operatorname{Cos} \varphi_{\text{ц}}}{\operatorname{Cos} \varphi_{\text{н}}}$  від коефіцієнта форми  $k$  при різних номінальних ккд

Очевидно що при  $k > 1$ , інакше кажучи, при безперервно змінному навантаженні,  $\operatorname{Cos} \varphi_{\text{х}} < \operatorname{Cos} \varphi_{\text{н}}$ . Двигун із підвищеним ковзанням вибраний так, що для нього  $P_{2c} = P_{2k} = P_{2н}$  ( $k=1$ ), буде працювати із постійним  $\operatorname{Cos} \varphi_{\text{ц}} = \operatorname{Cos} \varphi_{\text{н}}$ . Якщо врахувати, що двигун із підвищеним ковзанням має  $\operatorname{Cos} \varphi_{\text{н}}$  не нижче, ніж двигун із нормальним ковзанням, то при безперервно змінному навантаженні коефіцієнт потужності буде вище у двигунів із підвищеним ковзанням.

Характерною величиною є вираз:

$$\frac{\eta_{\text{ц}}}{\eta_{\text{х}}} * \frac{\operatorname{Cos} \varphi_{\text{ц}}}{\operatorname{Cos} \varphi_{\text{х}}} = \frac{1}{k}, \quad (9)$$

отриманий на основі (4) і (7) і представлений у вигляді функції  $k$  на рисунку 3 для  $P_{2k} = P_{2н}$ ,  $\eta_{\text{х}} = \eta_{\text{н}}$  і  $\operatorname{Cos} \varphi_{\text{х}} = \operatorname{Cos} \varphi_{\text{н}}$ .

Двигун із підвищеним ковзанням має ккд рівний приблизно 0,9 від ккд двигуна із нормальним ковзанням. При підвищеному ковзанні  $\cos\varphi$  двигуна залишається постійним і практично він не менше, ніж  $\cos\varphi_H$ . Очевидно, при  $k < 1,1$  енергетичні показники вище у двигуна із нормальним ковзанням, а при  $k > 1,1$  вони можуть бути більше для двигуна із підвищеним ковзанням.

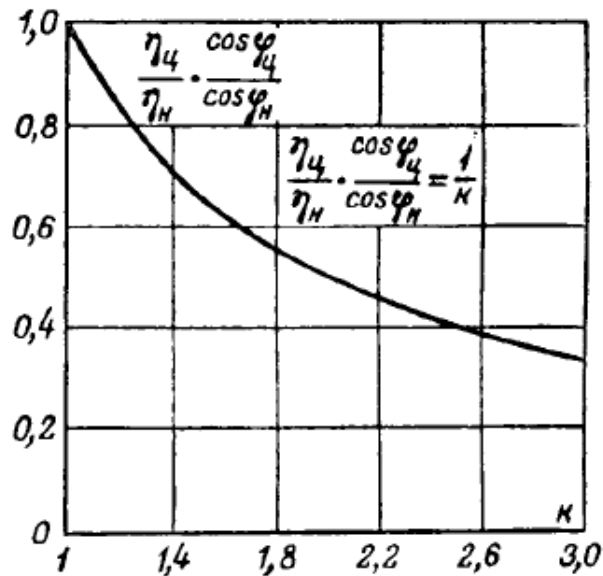


Рисунок 3 – Залежність відношення  $\frac{\eta_{ц} \cos\varphi_{ц}}{\eta_{н} \cos\varphi_{н}}$  від коефіцієнта форми  $k$

Виведені формули дають можливість відносно просто проводити кількісну оцінку економічності того чи іншого типу асинхронного двигуна для приводу різних механізмів з безперервно змінною навантаженні.

Значення  $\eta_x$  і  $\cos\varphi_x$  можна визначити по характеристикам двигунів чи відомим розрахунковим шляхом [3, 4].

#### Перелік посилань

1. Л. Б. Гейлер. Оптимальное скольжение асинхронного двигателя при переменной нагрузке. *Электр чество*, № 3, 1947.
2. А. А. Минин. Применение асинхронных моторов с повышенным скольжением для насосной эксплуатации. *Нефтяная промышленность СССР*, № 7/12, декабрь, 1940.
3. А. Т. Головаи. *Электропривод. Теоретические основы*. Госэнергоиздат 1948.
4. Л. Б. Гейлер. Построение кривой к.п. д. электродвигателей. *Электричество*, № 4, 1941.
5. В. А. Шубен к о. О коэффициенте мощности маховичных электроприводов переменного тока. *Сборник ВНИТОЭ*, № 7, Свердловск, 1948.