

УДК.631.363

В.Федорейко, канд.техн.наук

Тернопільський державний педагогічний університет ім. В.Гнатюка

## РЕГУЛЬОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ЯК ЗАСІБ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

*Розглянуто питання підвищення енергетичної ефективності роботи регульованого електропривода. Показано доцільність його використання при різних об'ємах економії енергії і проаналізовано недоліки та шляхи їх вирішення.*

### Умовні позначення

$P_{ном}$  – номінальна потужність електроприводу, кВт;

$\varepsilon = \sum T_p / (\sum T_p + \sum T_n)$  - коефіцієнт використання електродвигунів;

$\sum T_p$  - сума робочих періодів, год;

$\sum T_n$  - сума простоїв, год;

$\eta_{ном}$  - номінальний ККД;

$K_T$  - тарифна ставка електроенергії, грн./кВт·год;

$\gamma_e = (A_n - A_p) / A_n$  - середнє відносне збереження електроенергії після впровадження регульованого електропривода;

$A_n$  – споживання електроенергії нерегульованого електропривода, кВт·год;

$A_p$  – споживання електроенергії регульованого електропривода, кВт·год;

$R_1, R_2$  – активні опори обмоток статора і ротора, Ом;

$L_2, L_m$  – індуктивність ротора і взаємна індуктивність електродвигуна, Гн;

$\omega_0$  – частота напруги живлення, рад·с<sup>-1</sup>;

$\Psi_1$  – задане значення потокозчеплення статора, Вб;

$\Psi_2$  – задане значення потокозчеплення ротора, Вб;

$L_1$  – індуктивність статора, Гн;

$p$  – число пар полюсів;

$U_a, U_b$  – проекції вектора напруги статора в системі нерухомих координат.

Необхідність регулювання швидкості або моменту електроприводів виробничих механізмів диктується вимогами технологічного процесу. За різними джерелами, у промислово розвинутих країнах випускається від 30% до 60% регульованих електроприводів (в Україні до 3%), що дозволяє зменшити витрати електроенергії від 40-50% [ 1, 2 ].

У той же час в літературі відсутні фундаментальні дослідження системи регульованого електроприводу в комплексі, що включає в себе електромережу (ЕМ), перетворювач частоти (ПЧ), електродвигун (АД), технологічний механізм (ТМ), а також технологічний процес (ТП), вимоги якого до меж і якості регулювання координат можуть суттєво впливати на саму ідеологію постановки технічних задач керування [ 3 ].

Загальноприйняті для оцінки енергетичної ефективності показники – ККД і  $\cos\phi$  - в складних енергетичних режимах в більшості випадків є неінформативними, приводять до несумісних, непереконливих результатів, не дозволяють достовірно оцінювати та порівнювати різні системи [1]. Одночасно слід відзначити, що домінуюче положення в практиці сьогодні займає регульований частотний асинхронний електропривід. При комплексному підході аналіз можливостей енергозбереження в системі, представлений структурною схемою (рис. 1 ), необхідно розглядати стосовно кожного її складового елементу.

Якість параметрів ЕМ впливає на режими роботи наступних елементів схеми і зворотно, характеристики та режими роботи електромеханічного перетворювача та робочої машини визначають втрати енергії в мережі. Оскільки якісні характеристики ЕМ регламентовані галузевими стандартами, які розповсюджуються і на ПЧ, що декларуються заводами-виготовлювачами, то їх вплив на хід наших досліджень не викликає великого інтересу [1]. ККД сучасних ПЧ сягають 95 %, що є додатковим аргументом сказаного.

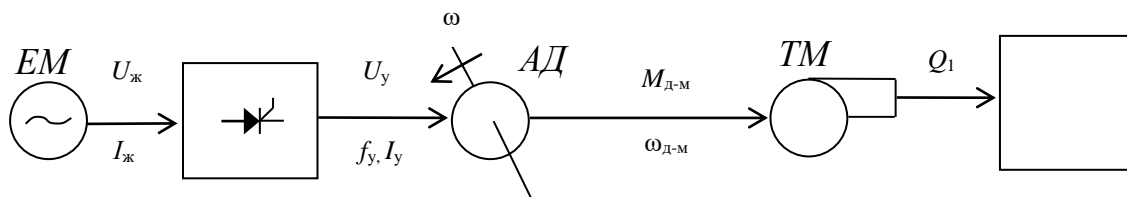


Рис. 1 Структурна схема системи живлення та роботи регульованого електроприводу

Очевидно, що величина споживання електроенергії в значній мірі впливає на вартісний показник готової продукції і в нашій ситуації визначається в основному втратами електроенергії в АД та ТМ. Вагомий вплив на доцільність застосування різних систем регулювання швидкості обертання електроприводу будуть відігравати якісні характеристики ТП, які в багатьох випадках домінують над іншими показниками.

Річну вартість заощадженої електроенергії при використанні регульованого електроприводу визначають за виразом :

$$C_e = \frac{P_{НОМ} \varepsilon \cdot \gamma_e k_T t_p}{\eta_{НОМ}} \quad (1)$$

Додаткові капітальні вкладення приймаються рівними вартості перетворювача частоти і контролера керування ( $K=C$ ). Тоді термін окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_o = \frac{\Delta K}{C_e} = \frac{C_n \cdot \eta_{НОМ}}{P_{НОМ} \cdot \varepsilon \gamma_e k_T t_p} \quad (2)$$

Таблиця 1

Терміни окупності регульованих електроприводів

Потужність $P_n$ , кВт	Тип перетворювача частоти Фірма HITACHI	Вартість $C_n$ , грн. з ПДВ	Термін окупності $T_o$ , роки				
			Відносне збереження електроенергії $\gamma_e$ , %				
			10	20	30	40	50
2,2	L100-022HFE	2667,5	7,07	3,54	2,36	1,77	1,41
3,0	L100-030HFE	2885,4	5,61	2,81	1,87	1,40	1,12
18,5	L100-185HFE	7662,5	2,42	1,21	0,81	0,60	0,48
45	L100-450HFE	15586,5	2,02	1,01	0,67	0,51	0,40
75	L100-750HFE	21758,0	1,69	0,85	0,56	0,42	0,34

В таблиці 1 проілюстровані результати розрахунку за формулою (2). Прийняті значення:  $\varepsilon = 1$ ;  $\eta_{НОМ} = 0,92$ ;  $K_T = 0,18$  грн/кВт·год.

Наведені на рис. 2 залежності показують, що з ростом потужності електродвигуна термін окупності значно зменшується. Використання електропривода без врахування ефекту в ТП економічно вигідно, починаючи з  $P_{НОМ} \geq 15$  кВт. При цьому малопотужний електропривід  $P_{НОМ} \leq 3$  кВт ефективний при  $\gamma_e > 20\%$ . Його використання стає економічно доцільним при отриманні енергетичного або технологічного ефекту безпосередньо одержаного в ході реалізації ТП.

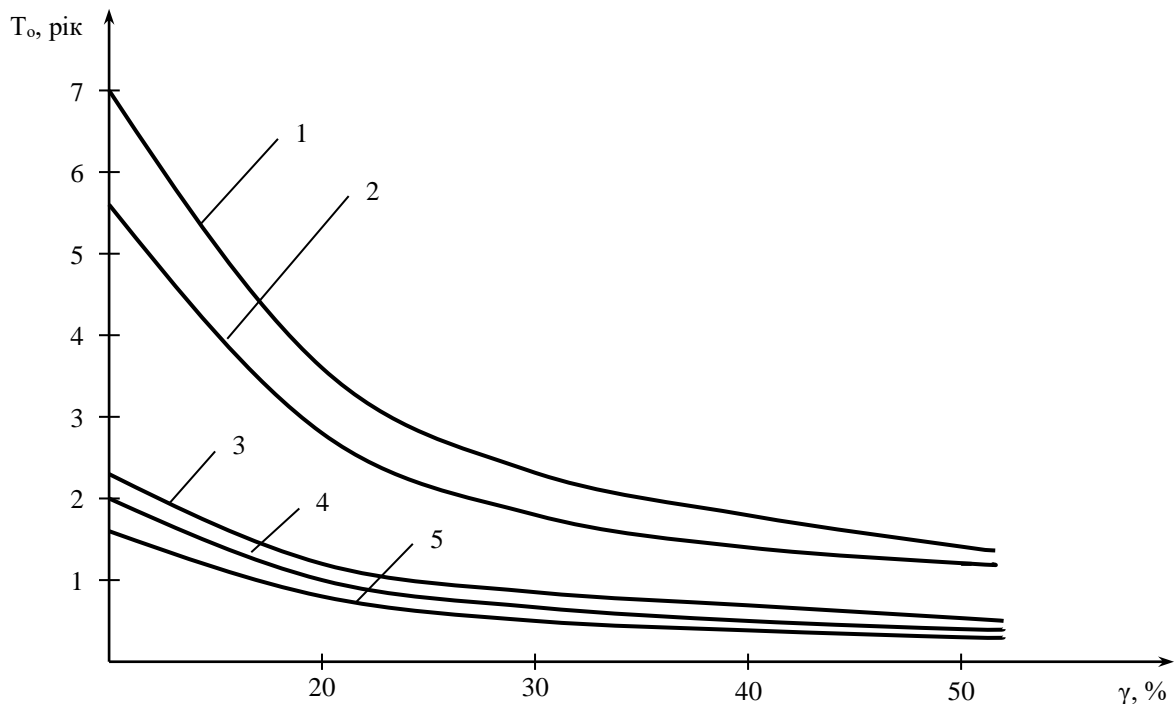


Рис. 2 Залежності терміну окупності від середнього відносного збереження електроенергії при  $P_{НОМ}$  (1 – 2,2 кВт, 2 – 3,0 кВт, 3 – 18,5 кВт, 4 – 45 кВт, 5 – 75 кВт)

У системі джерело живлення – електропривід – технологічний процес (робоча машина) основний ефект (енергетичний, економічний), за деяким винятком (пневмотранспорт, водопостачання тощо) отримують в ланці – технологічний процес за рахунок регулювання координат та адаптації механічних характеристик електродвигуна до вимог робочої машини (процесу). При цьому покращується якість виконання роботи, зменшуються питомі витрати теплової та електричної енергії. При дослідженні таких систем у значній мірі не розглядаються енергетичні режими електродвигуна на предмет їх оптимізації, оскільки оптимізація цих режимів дозволяє підвищити енергетичний ефект системи тільки на декілька відсотків. Такі підходи помилкові, тому що електродвигун є одним із основних елементів регульованого електроприводу і його енергетичні режими визначають не тільки величину втрат електроенергії, а і діапазони регулювання швидкості, швидкодію систем в перехідних режимах, що і в кінцевому підсумку впливає на енергетичний технологічний ефект.

Сформулюємо основні вимоги до енергетично ефективних режимів роботи електродвигуна.

Розв'язуючи рівняння, які описують електромеханічні характеристики електропривода [ 4,5 ], при мінімумі втрат потужності в обмотках статора і ротора отримаємо залежність моменту електродвигуна (М) від потокозчеплення ротора ( $\psi_2$ ):

$$M = \frac{|\psi_2|}{p} \sqrt{\frac{R_1}{R_2} + \left(\frac{L_2}{L_m}\right)^2} \quad (3)$$

З виразу (3) видно, що кожному значенню моменту відповідає значення потокозчеплення ротора, яке мінімізує втрати і приводить до роботи електродвигуна з постійним ковзанням. Для реалізації такого режиму роботи електродвигуна необхідно:

- вимірювати (розраховувати) момент асинхронного двигуна;
- керувати модулем потокозчеплення ротора;
- регулювати швидкість електродвигуна по колу, не пов'язаному з каналом регулювання потокозчеплення.

Розглянемо алгоритми, що задовільняють вимоги енергетично ефективних режимів роботи електродвигуна. Найбільш прості алгоритми керування за номінальним законом і законом повного потоку [4], а також їх удосконалена модифікація [5]:

$$\left| \frac{U_a}{U_b} \right| = \left| \begin{array}{cc} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} -\omega_0 \Psi_1 \\ R_1 / L_1 \Psi_1 \end{array} \right|, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_0 = \omega_0$ , з великим наближенням реалізують режими мінімальних втрат потужності.

Їх технічна реалізація відрізняється невеликою вартістю систем частотного регулювання.

Найбільш повно поставленим вимогам відповідає векторне управління з орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора, теорія якого достатньо детально відпрацьована [6]. Однією із важливих задач при регулюванні частотних асинхронних електроприводів з векторним управлінням є оцінка кутового положення потокозчеплення ротора двигуна, вирішення якої вимагає точного визначення його внутрішніх параметрів. Складність цієї задачі полягає в тому, що ці параметри в процесі експлуатації є нестабільними. Зокрема, в залежності від теплового режиму двигуна суттєво змінюються активні опори статора і ротора, а також його електромагнітна постійна часу. Насичення магнітної системи приводить до зміни індуктивності намагнічування і електромагнітної постійної часу ротора. Неврахування цих змін приводить до нестійкого функціонування привода і значного відхилення

електромагнітних та електромеханічних процесів від заданих. Надійні алгоритми і схемні рішення оцінки відхилень цих параметрів відпрацьовані недостатньо.

Важливе значення для ряду технологічних процесів має режим форсування швидкості обертання валу електродвигуна. Це стосується, наприклад, систем пневмотранспортування на комбикормових заводах та борошномельних підприємствах, які працюють з мінімально допустимою швидкістю руху пневмосуміші, що відповідає енергоощадним режимам роботи. Зміна тиску в таких системах вимагає швидкого форсажу продуктивності турбомеханізмів, щоб уникнути аварійних режимів. У такому випадку виникає необхідність у форсованому збільшенні швидкості обертання вище номінальної. При векторному управлінні обмежується електрорушійна сила  $\omega_0 \Psi_2$ , що індукується у фазі статора. Регулювання в діапазоні до номінальної частоти обертання електродвигуна можливе з постійним моментом,  $\Psi_2 = \Psi_{2H}$ . Максимальне потокозчеплення ротора обмежене номінальним значенням за критерієм ефективного використання сталі. Регулювання в діапазоні швидкостей вище номінальної при обмеженому значенні фазної напруги, що формується інвертором, такий закон регулювання здійснити не вдається. Тому необхідне обґрунтування щодо запасу фазної напруги або відпрацювання законів регулювання стабілізації  $\Psi_2$  на рівні, меншому  $\Psi_{2H}$ .

Важливим в енергетичному плані для асинхронного електродвигуна при розширенні діапазону регулювання швидкості і оптимальних енергетичних режимах є корекція жорсткості механічної характеристики при збільшенні навантаження.

Актуальним також є реалізація режимів оптимального управління за законом  $\Psi_2 = const$  при збільшенні кутової частоти ротора. В таких режимах збільшується потокозчеплення в повітряному зазорі електродвигуна, насичується магнітна система і зменшується величина взаєміндукції. Максимальне значення навантаження частотного перетворювача і наявність струмообмеження призводить до переходу електродвигуна в режим нестійкої роботи.

Таким чином, вирішення розглянутих питань у теоретичному плані та їх практична реалізація для конкретних класів електроприводів сільськогосподарських машин дозволить створити високоефективні системи електромеханічних перетворювачів як в енергетичному плані, так і з точки зору раціонального регулювання координат робочої машини.

*The considered questions of increase of a power overall performance of the regulated electric drive. The shown expediency of its use at different volumes of economy of energy both the analysed lacks and ways of their decision.*

### **Література**

1. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергозбережение в электроприводе. -М.: Высшая школа, 1989.-127с.
2. Sniders A. The Expenditure of Electrical Energy for Communal Sewade Purification//Baltic Electrical Engineering Review .1997.№2(6).P.29-32.
3. Луговой А.В. К теории энергозбережения средствами промышленного электропривода // Электротехника.- М.1999.-№5.-С.62-67.
4. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями.- М. Энергоиздат, 1982.- 216с.
5. Теория электропривода: Підручник /за ред. М.Г.Поповича.-К.:Вища школа, 1993.- 362 с.
6. Пересада С.М. Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор //Труды Донецкого ГТУ, серия электротехника и энергетика. -1999.-Вып.4.-С.8-20.

*Одержано 17.05.2002 р.*