

## ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*А.И. Чмиль, А.В. Науменко*

*Рассмотрен импульсный источник высокого напряжения для установки обработки зерновой массы в сильном электрическом поле. Приведена его принципиальная электрическая схема и описание ее работы.*

**Ключевые слова:** *зерновая масса, амбарные вредители, сильное электрическое поле, импульсный источник высокого напряжения*

## HIGH VOLTAGE SWITCHING POWER

*A. Chmil, O. Naumenko*

*It is considered pulsed high voltage source for processing installation of grain mass in a high electric field. Shows the electrical schematic of pulsed high voltage source and description of his work.*

**Keywords:** *grain mass, grain insects, high electric field, pulsed high voltage source*

УДК 62 - 83 : 621. 313. 333

## ОДНОФАЗНИЙ КОМПЕНСОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН

*Р.М. Чуєнко, кандидат технічних наук*

*М.В. Мархонь, асистент*

*e-mail: roman\_chuenko@ukr.net*

*Запропоновано методика розрахунку характеристик однофазного компенсованого конденсаторного асинхронного електродвигуна.*

**Ключові слова:** *однофазний компенсований конденсаторний асинхронний двигун, схема заміщення, рівняння, характеристика*

Відомий трифазний асинхронний електродвигун [1, 2], принцип дії якого заснований на використанні обертового магнітного поля  $m$ -фазної (коли  $m \geq 2$ ) системи струмів, є конструктивно простим, дешевим та надійним. Тому він широко використовується на практиці, особливо у варіанті із короткозамкненим ротором.

Проте через умови створення обертового магнітного поля він має недоліки, головним із яких є споживання двигуном із мережі живлення двох видів електричних потужностей – активної, яка перетворюється у

механічну, із передачею на вал ротора для привода робочого механізму, що призводить до неминучих теплових втрат (нагрівання струмом обмоток, магнітні втрати в сталі, механічні, додаткові), а також реактивної для створення обертового магнітного поля. При цьому реактивна потужність не перетворюється в інші види енергії, а лише створює умови для електромеханічного перетворення активної енергії в магнітному полі. Непродуктивний реактивний струм збільшує загальний струм машини та мережі живлення, збільшуючи втрати в них. Внаслідок цього зменшуються ККД двигуна та його коефіцієнт потужності ( $\cos\varphi$ ). Наприклад, для двигунів малої (до 11 кВт) та середньої (до 100 кВт) потужності коефіцієнт потужності становить 0,7–0,9. Пусковий струм асинхронного двигуна є досить великим і у 4–7 разів перевищує номінальний, при цьому пусковий момент двигуна становить лише 0,8÷2,0 від номінального, що значною мірою обмежує його застосування у малопотужних мережах та для приводу механізмів із великими інерційними масами. Ще більш вагомими недоліками мають однофазні двигуни, які за однофазного змінного струму створюють пульсуюче магнітне поле за нульового пускового моменту. ККД та  $\cos\varphi$  однофазного двигуна є ще нижчими, ніж у трифазного. Для усунення або хоча б послаблення деяких із цих недоліків асинхронного двигуна запропоновано спосіб внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності [4].

**Мета досліджень** – розробка засобів для усунення недоліків однофазного конденсаторного асинхронного двигуна шляхом перетворення його на двофазний із використанням фазозсувного елемента у вигляді конденсатора електричної ємності.

**Матеріали та методика досліджень.** На нашу думку ці способи внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності за змістом є аналогічними одне одному, хоча однофазний конденсаторний двигун давно відомий [1, 2], а компенсований трифазний є сучасним винаходом [4, 5]. Для створення трифазного варіанта компенсованого асинхронного двигуна (КАД) у базовому серійному асинхронному двигуні (АД) фазну зону  $60^\circ$  обмотки статора розділяють на дві однакові частини, зміщені одна відносно іншої у пазах осердя статора на кут  $\theta = 30^\circ$ . Одна з частин, яка має кількість витків  $w_1$ , вважається головною обмоткою статора і під'єднується до мережі живлення на робочу напругу фази  $U$ , а інша, із кількістю витків  $\Delta w = w_1$ , є додатковою обмоткою статора. Відносно головної обмотки вона зміщена у пазах осердя статора на кут  $\theta = 30^\circ$  проти напрямку обертання магнітного поля статора і підключена до неї за схемою поворотного автотрансформатора (АТ) на електричну ємність  $C_\Delta$  у фазі (рис. 1 а, б). Схема заміщення фази у симетричному режимі КАД наведена на рис. 1, б.

Обидві обмотки статора перетинаються єдиним магнітним полем при цьому ЕРС додаткової обмотки  $E_\Delta$  випереджає за фазою ЕРС основної обмотки  $E_1$  на час проходження полем просторового кута  $\theta$  (рис. 2, а), тобто  $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\theta}$ , а різниця напруг цих обмоток  $\dot{U}_1 - \dot{U}_\Delta = \dot{U}_{c\Delta}$  створює напругу  $\dot{U}_{c\Delta}$  на ємності  $C_\Delta$  на виході АТ. При цьому напруги на обмотках

без врахування спадів напруги на них дорівнюють відповідно  $\dot{U}_1 = \dot{U} \approx -\dot{E}_1$ ,  $\dot{U}_\Delta \approx -\dot{E}_\Delta$ , напруга на виході АТ  $\dot{U}_\Delta \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$ , а струм АТ  $\dot{I}_\Delta = \frac{\dot{U}_{C\Delta}}{-jx_{C\Delta}}$  випереджає напругу на  $90^\circ$  (рис. 2, б).

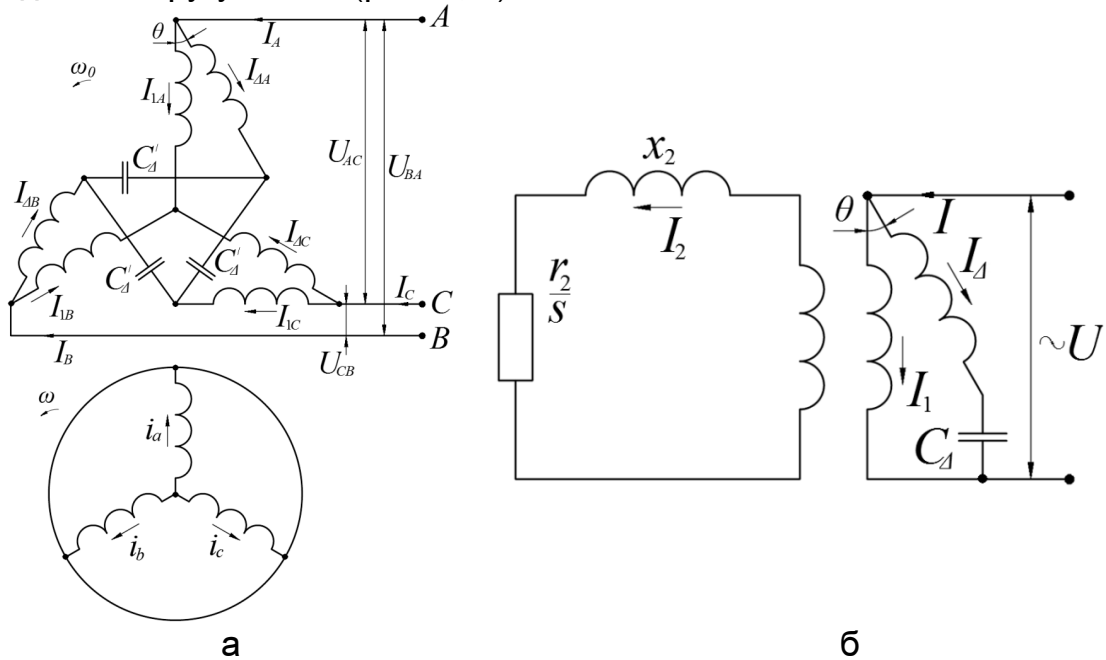


Рис. 1. Принципова електрична схема трифазного КАД (а) та схема заміщення його фази (б)

З урахуванням просторового зсуву обмотки  $\Delta w$  та часового зсуву її ЕРС  $\dot{E}_\Delta$  відносно ЕРС головної обмотки  $\dot{E}_1$  струм на виході АТ  $\dot{I}_\Delta$ , фактично ємнісний за характером, відносно загальної напруги  $\dot{U}$  мережі живлення є ємнісно-активним (див. рис. 2, б), тобто додаткова обмотка статора КАД є суміщеною робочою (із частиною активної потужності навантаження) та компенсувальною із ємнісною потужністю ємності  $C_\Delta$ . Разом із індуктивно-активним струмом  $\dot{I}_1$  головної обмотки  $w_1$  вони створюють загальний струм фази КАД  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$ , наближуючи його за фазою (кут  $\varphi$ ) до загальної напруги  $\dot{U}$ . З іншого боку, приведений просторово до струму головної обмотки  $\dot{I}_1$  як  $\dot{I}_\Delta e^{-j\theta}$  струм додаткової обмотки у складі загального струму намагнічування КАД  $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} + \dot{I}_2$  підмагнічує магнітопровід, зменшуючи споживання реактивної потужності для створення робочого магнітного поля.

Крім того струм додаткової обмотки індукує в обмотці ротора додаткову ЕРС, що збільшує загальний струм ротора, пусковий момент двигуна та швидкість обертання за номінального навантаження і т.п. Також розподіл обмотки статора на дві просторово зміщені одна відносно одної на  $30^\circ$  частини створює в них зміщені за фазою ЕРС  $\dot{E}_1$  та  $\dot{E}_\Delta$ , що в цілому подвоює кількість фаз ( $m' = 2m$ ) та фазних зон ( $m_3 = 2m'$ ) обмотки статора, що за  $m = 3$  становить  $m' = 3$ ,  $m_3 = 12$  (див. рис. 2, а). При цьому з гармонійного спектра магнітного поля виключаються вищі просторові

гармоніки до  $v = 2m'k \pm 1 = 11, 13$  за  $m = 3, m' = 6, k = 1$ . З кривої поля виключаються гармоніки  $v = 5, 7$  та кратні  $m = 3 v = 9, 15 \dots$ , що дозволяє застосовувати прості одношарові обмотки замість складних двошарових обмоток із вкороченим кроком. Крім того, внаслідок просторового зміщення головної та додаткової обмоток збільшується коефіцієнт розподілу обмотки, чим обумовлюється зростання основної ЕРС КАД за зменшення реактивного струму намагнічування.

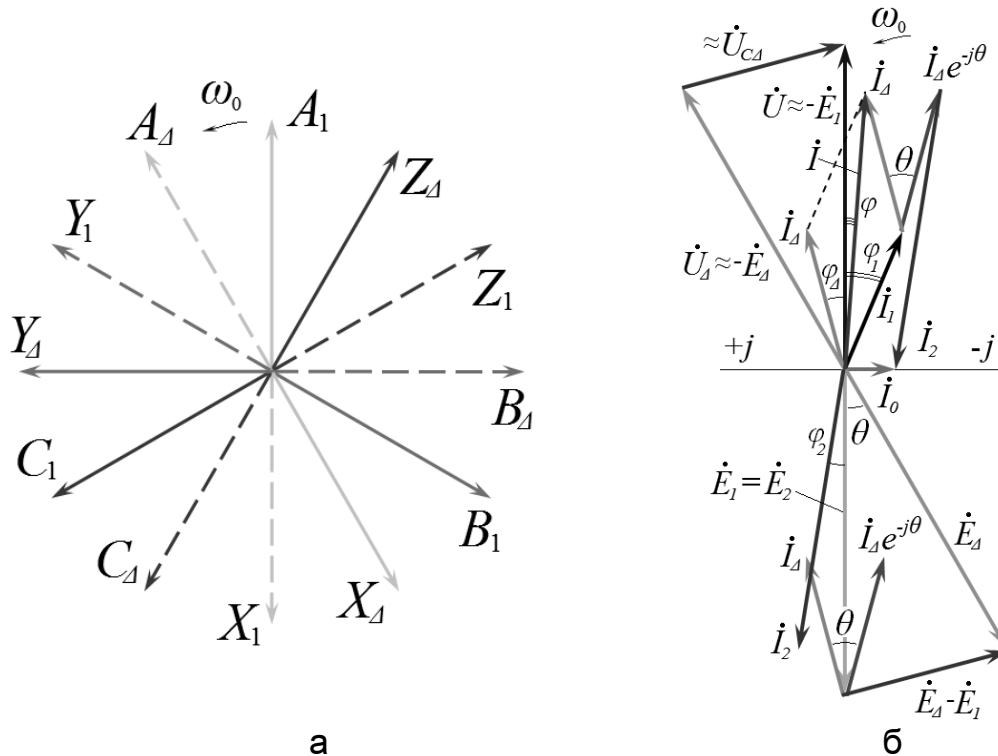


Рис. 2. Векторна діаграма ЕРС прямих та зворотних провідників обмоток фаз статора КАД (а) та спрощена векторна діаграма (б) фази КАД за схемою заміщення рис. 1, б

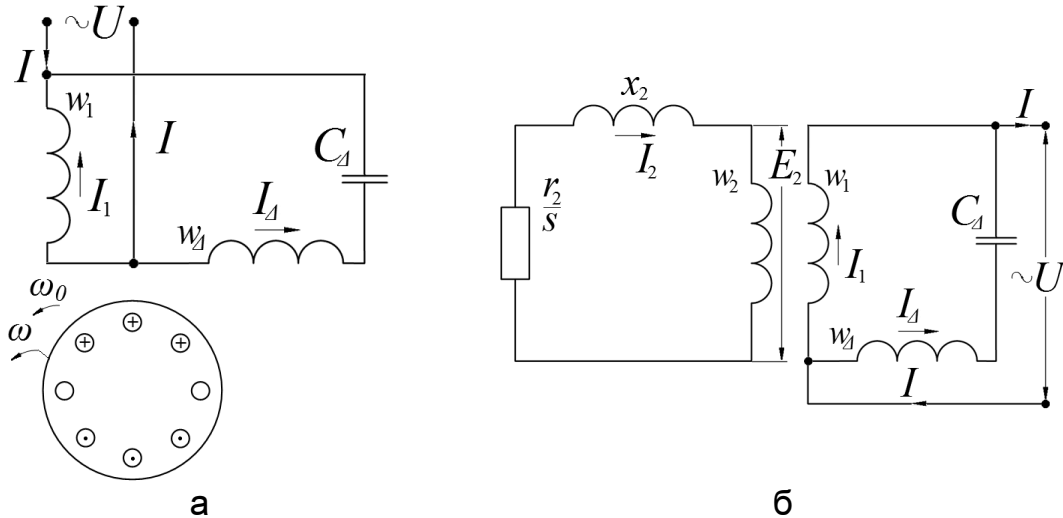
У цілому внутрішня ємнісна компенсація реактивної потужності в КАД підвищує його енергоефективність і покращує його пуско-регульовальні та робочі характеристики.

**Результати досліджень.** Аналогічно КАД просторово зміщені між собою дві обмотки статора однофазного конденсаторного двигуна (ОКД) вмикаються також за схемою поворотного АТ на електричну ємність  $C_{\Delta}$  (рис. 3, 4).

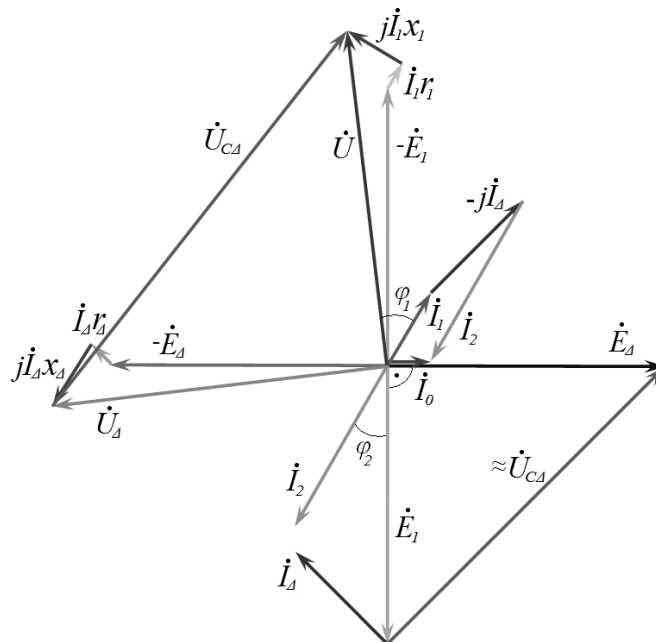
Відмінною є лише величина кута просторового зміщення обмоток одна відносно одної. У КАД кут  $\theta$  становить  $30^\circ$ , а в однофазному конденсаторному двигуні  $\theta = 90^\circ$ , тобто у загальному випадку  $\theta = \frac{\pi}{2m}$ .

Але в обох випадках відбувається подвоєння кількості фаз, хоча і з різною метою: в однофазному конденсаторному двигуні цим забезпечується створення обертового магнітного поля та пускового моменту з його збільшенням від нуля до деякої величини  $M'_n$  (рис. 5, а),

яка є більшою за величину пускового моменту базового двигуна, та можливістю запуску ОКД за відносно малого навантаження (до 0,5 від номінального). У КАД, із його обертовим полем, подвоєння кількості фаз збільшує його енергетичні можливості, покращує пускові та робочі характеристики, спектр вищих гармонік магнітного поля.



**Рис. 3. Принципова електрична схема (а) та схема заміщення (б) однофазного компенсованого конденсаторного електродвигуна**

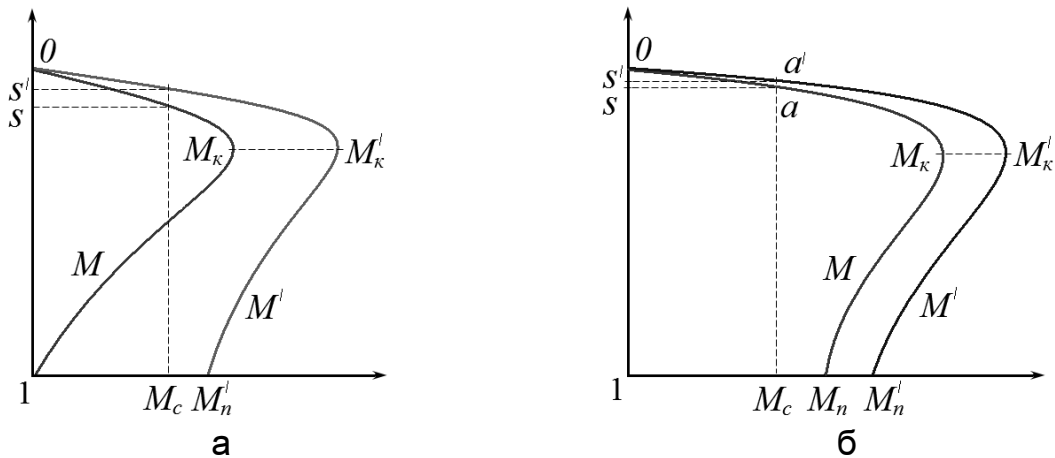


**Рис. 4. Векторна діаграма однофазного компенсованого конденсаторного електродвигуна**

В ОКД за  $\theta = 90^\circ$  зникає взаємоіндуктивний (трансформаторний) зв'язок між обмотками статора, чим дещо спрощується запис їх рівнянь електричної рівноваги, але змінює порівняно із КАД вплив просторово зміщених між собою на  $90^\circ$  струмів  $\dot{I}_1$  та  $\dot{I}_\Delta$  на загальний струм намагнічування

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} + \dot{I}_2, \quad (1)$$

де  $\dot{I}_\Delta e^{-j\theta} = -j\dot{I}_\Delta$  за  $\theta = 90^\circ$  – струм додаткової обмотки  $\Delta w$ , просторово зміщений відносно основної обмотки  $w_1$  та приведений до неї;  $\dot{I}_2$  – робочий струм вторинної обмотки (ротора).



**Рис. 5. Механічні характеристики однофазного двигуна  $M(s)$  і однофазного компенсованого конденсаторного двигуна ( $M'(s')$ ) (а) та трифазного базового асинхронного двигуна  $M(s)$  і КАД ( $M'(s')$ ) (б)**

Рівняння електричної рівноваги для фази ОКД за схемою рис. 3, б за другим законом Кірхгофа, мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U} &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \\ \dot{U} &= \dot{U}_\Delta + \dot{U}_{C\Delta} = -\dot{E}_\Delta + \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_{C\Delta} \dot{I}_\Delta; \\ 0 &= -\dot{E}_2 + \dot{I}_2 z_2, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m \dot{I}_0$ , В – основна ЕРС обмоток  $w_1$  статора та  $w_2$  ротора;  $\dot{E}_\Delta = j\dot{E}_1$ , В – ЕРС додаткової обмотки  $\Delta w$ ;  $z_1 = z_\Delta = r_1 + jx_1 = r_\Delta + jx_\Delta$ , Ом – власні опори однакових обмоток  $w_1$  та  $\Delta w$ ;  $r_1 = r_\Delta$ , Ом – їх активні опори;  $x_1 = x_\Delta$ , Ом – реактивні опори розсіювання;  $z_2 = r_2/s + jx_2$ , Ом – опір вторинної обмотки (ротора);  $x_m$ , Ом – опір кола намагнічування двигуна, який вважається сталим за [3] і визначається за кривою намагнічування з урахуванням її нелінійності [4, 5];  $s$  – ковзання двигуна.

Дія системи рівнянь (1, 2) подана векторною діаграмою (див. рис. 4).

За заданих напруги живлення  $\dot{U}$ , параметрів двигуна [3] та внесеного реактивного опору  $x_{C\Delta}$  ємності  $C_\Delta$ , вибраної величини ковзання  $0 \leq s \leq 1$  режиму двигуна система рівнянь (2) розв'язується відносно шуканих струмів  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_\Delta$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $\dot{I}_0$  та залежних від них напруг  $\dot{U}_\Delta$ ,  $\dot{U}_{C\Delta}$ , потужностей та моменту двигуна.

Так із рівняння роторного кола системи рівнянь (2) маємо вираз для струму ротора  $\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{z_2}$ , що за  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m \dot{I}_0$  та  $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 - j\dot{I}_\Delta + \dot{I}_2$  визначає:

$$\dot{I}_2 = \frac{z_s}{z_2} (\dot{I}_1 - j\dot{I}_\Delta) \text{ та } \dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -Z_s (\dot{I}_1 - j\dot{I}_\Delta), \quad (3)$$

де  $Z_s = \frac{jx_m z_2}{z_2 + jx_m}$  – загальний опір роторного кола відносно його ЕРС  $E_2$  за схемою рис. 3, б.

Після підстановки цих виразів у систему (2) кількість рівнянь зводиться до двох відносно струмів  $\dot{I}_1$  та  $\dot{I}_\Delta$  кіл статора:

$$\begin{aligned} 1) \quad a\dot{U} &= b\dot{I}_1 + c\dot{I}_\Delta; \\ 2) \quad \dot{U} &= \dot{U}_\Delta + \dot{U}_{c\Delta} = -\dot{E}_\Delta + \dot{I}_\Delta Z_\Delta - jx_{c\Delta}\dot{I}_\Delta, \end{aligned} \quad (4)$$

де параметричні коефіцієнти дорівнюють

$$a = d = 1; \quad b = z_1 + Z_s; \quad c = -jZ_s; \quad e = jZ_s; \quad f = z_1 + Z_s - jx_{c\Delta}.$$

Тоді струми обмоток статора будуть:

$$\dot{I}_1 = \gamma\dot{U}; \quad \dot{I}_\Delta = \Delta\dot{U}, \quad (5)$$

де коефіцієнти  $\gamma$  та  $\Delta$  визначаються за формулами:

$$\gamma = \frac{a \cdot f - c \cdot d}{b \cdot f - c \cdot e} = \frac{z_1 + Z_s(1+j) - jx_{c\Delta}}{z_1(z_1 + 2Z_s) - jx_{c\Delta}(z_1 + Z_s)}; \quad \Delta = \frac{b \cdot d - a \cdot e}{b \cdot f - c \cdot e} = \frac{z_1 + Z_s(1-j)}{z_1(z_1 + 2Z_s) - jx_{c\Delta}(z_1 + Z_s)}, \quad (6)$$

### Висновки

Наведена методика дозволяє проводити розрахунки, за результатами яких будуються необхідні характеристики ОКД. Аналіз отриманих характеристик дає можливість визначити зміну параметрів ОКАД, схем його обмотки тощо для підвищення енергетичної ефективності двигуна та покращання його пуско-регульовальних характеристик.

### Список літератури

1. Асинхронные электродвигатели серии 4А: справ. / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф В.И. Афонин, Е.А. Соболевская/ – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1976. – 782 с.
3. Компенсовані асинхронні машини: монографія / [В.І. Мішин, В.В. Каплун, Р.М. Чуенко та ін.]. – К.: КНУТД, 2012. – 221 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2002. – 607 с.
5. Мишин В. И. Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронном электродвигателе / В.И. Мишин, Р.Н. Чуенко, В.В. Гаврилук // Электротехника. – М., 2009. – №8. – С. 30–36.

## ОДНОФАЗНЫЙ КОМПЕНСИРОВАННЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

*Р.Н. Чуенко, М.В. Мархонь*

*Предложена методика расчета характеристик однофазного компенсированного конденсаторного асинхронного двигателя.*

**Ключевые слова:** *однофазный компенсированный конденсаторный асинхронный двигатель, схема замещения, уравнение, характеристика*

## SINGLE-PHASE COMPENSATED INDUCTION MOTOR

*R. Chuenko, M. Marhon*

*Single-phase compensated induction motor's characteristics calculation methodology is offered.*

**Keywords:** *single-phase compensated induction motor, circuit model, equation, characteristic*

УДК 621.313

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН ЗА ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

*М.І. Рутило, кандидат технічних наук  
Тернопільський національний педагогічний  
університет імені В. Гнатюка  
e-mail: rutmik@ukr.net*

*Проведено аналіз існуючих алгоритмів керування електроприводом технологічних машин (ТМ) щодо їх енергоефективності. Розроблено структуру адаптивного алгоритму для системи керування частотно-регульованим електроприводом ТМ без давачів технологічних параметрів.*

**Ключові слова:** *технологічна установка, регульований електропривод, адаптивний алгоритм, система керування, обчислювальний блок, давач*

Аналіз енергетичних та експлуатаційних показників технологічних машин із частотно-регульованим асинхронним електроприводом для регулювання параметрів технологічних процесів та статистика їх відмов у процесі експлуатації дають підставу стверджувати про необхідність подальших досліджень, спрямованих на удосконалення існуючого та розробки нового обладнання.

**Мета досліджень** – розробка адаптивного алгоритму керування частотно-регульованим електроприводом технологічних машин для підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності їх роботи.

**Матеріали та методика досліджень.** Для регулювання швидкості обертання робочих органів ТМ із плавномінними режимами роботи (вентилятори, відцентрові насоси тощо) використовують частотні перетворювачі (ЧП) із скалярним керуванням, в яких існує можливість вибору відповідного за потреби закону регулювання ( $u/f$ - залежності) [1].