

МОДИФІКАЦІЯ КРИТЕРІЮ ПРИВЕДЕНИХ ВИТРАТ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

В.С. Петрушин*, докт.техн.наук, **Р.М. Єноктаєв****
Одеський національний політехнічний університет,
пр. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: victor_petrushin@ukr.net, rostik-enok@ukr.net

Модифікація критерію приведених витрат полягає у використанні коефіцієнта значущості експлуатації для узгодження максимуму ККД і мінімуму приведених витрат. При цьому величина модифікованого критерію приведених витрат стає менше величини немодифікованого. Коефіцієнт значущості експлуатації, який є дольовим перевищенням приведених витрат над вартістю витрат активної енергії, пропонується визначати як відношення значення немодифікованих приведених витрат на значення вартості витрат активної енергії базового двигуна, відносно якого здійснюється оптимізаційне проектування енергозберігаючого асинхронного двигуна. Проведено аналіз впливу коефіцієнта інфляції на критерій приведених витрат. Його врахування збільшує величину модифікованого критерію приведених витрат. Бібл. 9, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: асинхронний двигун, оптимізаційне проектування, критерій приведених витрат, модифікація проектного критерію, коефіцієнт значущості експлуатації, коефіцієнт інфляції.

Вступ. Електрична машина (ЕМ) проектується із застосуванням різних проектних критеріїв, що залежать від призначення і умов експлуатації ЕМ. При виробництві та експлуатації асинхронних двигунів (АД) матеріальні, енергетичні та трудові ресурси повинні використовуватися з максимальною ефективністю, що може бути забезпечено тільки в процесі їхнього проектування та оптимізації на підставі застосування науково обґрунтованих критеріїв. Тенденції, які визначаються підвищенням вартості енергоресурсів, зумовлюють потребу в енергозберігаючих АД з підвищеними значеннями ККД, хоча при цьому спостерігається зростання вартості таких двигунів. Сьогодні провідні фірми-виробники проектують і виробляють енергоефективні серії загальнопромислових АД (SIEMENS – серія 1LA6, 1LA9, WEG – серія W22, LEROY-SOMER – серія FLS та інші). З вересня 2008 року в Європі запроваджено стандарт IEC600034-38, де всі двигуни поділяються на чотири класи енергоефективності.

Постановка задачі дослідження. При проектуванні енергозберігаючих АД раціонально використовувати як проектний критерій ККД, максимум якого досягається в результаті параметричної оптимізації [1–3]. Проте він не враховує інші фінансові аспекти – витрати на виготовлення і експлуатацію двигуна, коефіцієнт інфляції та інше. Таке врахування здійснюється з використанням критерію приведених витрат (ПВ) [4–6]. Оскільки за час служби двигуна енергетична складова ПВ у кілька разів перевищує складову, пов'язану з капітальними витратами, першорядною є оптимізація енергетичної складової. У разі модифікації критерію ПВ [7–8] необхідно враховувати вплив на критерій інфляційних процесів, оскільки нормативний термін окупності регульованих асинхронних двигунів досить тривалий (5–8 років).

Для того, щоб використовувати модифікований критерій ПВ електроприводу, необхідно узгодити його з критерієм ККД, тобто наблизити їхні екстремуми. Для цього застосовується коефіцієнт значущості експлуатації $k_{зе}$.

Мета роботи запропонувати модифікований критерій приведених витрат, в якому за рахунок використання коефіцієнта значущості експлуатації збільшено значимість експлуатаційних витрат, що дає змогу проектувати енергозберігаючі асинхронні двигуни з врахуванням капітальних витрат, а також інфляції (при використанні коефіцієнта інфляції).

Матеріали і результати дослідження. З урахуванням зазначеного вище вираз для модифікованого критерію ПВ електродвигуна має вигляд

$$ПВ_{АД} = k_{зе}^{-1} (C_{дв} + C_{кр}) \cdot [1 + T_n \cdot (k_{ам} + k_{об})] + C_{ва} \cdot k_{инф}, \quad (1)$$

де $C_{дв}$ – вартість електродвигуна, у.о.; $C_{кр}$ – вартість витрат на компенсацію реактивної енергії, у.о.; $C_{ва}$ – вартість витрат активної енергії, у.о.; T_n – нормативний термін окупності електродвигуна, років; $k_{ам}$ – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування; $k_{об}$ – коефіцієнт, що враховує витрати на обслуговування електродвигуна; $k_{зе}$ – коефіцієнт значущості експлуатації; $k_{инф}$ – коефіцієнт інфляції. Немодифікований критерій ПВ розраховується, якщо $k_{зе}$ і $k_{инф}$ у виразі (1) прийнято рівними одиниці. Для загальнопромислових АД приймаються значення $T_n=5$ років, $k_{ам}=0,065$, $k_{об}=0,069$ [1].

Вартість витрат на компенсацію реактивної та активної енергій розраховується за формулами

$$C_{ва} = C_{cae} \cdot P_1 \cdot (1 + a_p - \eta_{АД}), \quad (2)$$

$$C_{кр} = C_{cre} \cdot P_1 \cdot (tg(\arccos\varphi_I) - tg\varphi_0), \quad (3)$$

де C_{cae} – коефіцієнт, що враховує вартість втрат активної енергії та представляє собою добуток вартості 1 кВт·год електроенергії протягом терміну служби двигуна, числа годин роботи двигуна на рік (прийнято 2100), числа років роботи до капітального ремонту (5) і коефіцієнта відносного завантаження двигуна (1,0); P_1 – споживана АД потужність, кВт; a_p – коефіцієнт, що враховує втрати в розподільних мережах (0,04); $\eta_{АД}$ – ККД електродвигуна; C_{cre} – коефіцієнт, що враховує вартість компенсації реактивної енергії та представляє собою добуток вартості 1 кВАр реактивної потужності компенсуючих пристроїв (15 у.о. за 1 кВАр), коефіцієнта участі двигуна в максимумі навантаження системи (0,25) і коефіцієнта відносного завантаження; $\cos\varphi_I$ – коефіцієнт потужності АД; φ_0 – кут зсуву між струмом та напругою АД, при якому реактивну потужність можна не компенсувати ($tg\varphi_0 = 0,484$). Значення $k_{инф}$ розраховується наступним чином:

$$k_{инф} = T_n^{-1} \sum_{m=0}^{T_n-1} \left(1 + \frac{d_{инф}}{100\%}\right)^m, \quad (4)$$

де $d_{инф}$ – усереднений показник річної інфляції (%).

Коефіцієнт $k_{зе}$ для узгодження максимуму ККД і мінімуму ПВ представляє собою дольове перевищення ПВ над вартістю втрат активної енергії $C_{ва}$ і визначається в результаті поділу значення немодифікованих ПВ на значення вартості втрат активної енергії $C_{ва}$ базового двигуна, відносно якого здійснюється оптимізаційне проектування енергозберігаючого АД. Якщо прийняти, що вартість 1 кВт·год складає 0,05 у.о., він дорівнює 1,74 для розрахунків, виконаних на прикладі двигуна 4A160S4. Розглядається робота двигуна на номінальне навантаження 98 Н·м. Щоб знайти екстремуми критеріїв ККД і ПВ, проведено оптимізацію двигуна з використанням DIMASDrive [9]. За варійовану змінну обрано довжину пакета статора двигуна (L), яка змінюється в діапазоні від 115 до 150 мм. Оптимум ККД двигуна отримано при $L = 145$ мм (рис. 1), а оптимум ПВ – при $L = 128$ мм (крива 1 рис. 2). Розрахунки з використанням традиційного виразу ПВ показують суттєве розходження значень довжини машини, які відповідають максимуму ККД і мінімуму ПВ. У разі введення коефіцієнта $k_{зе} = 1,74$ екстремуми узгоджуються.

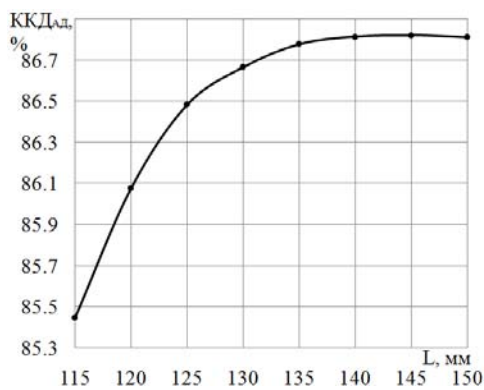


Рис. 1

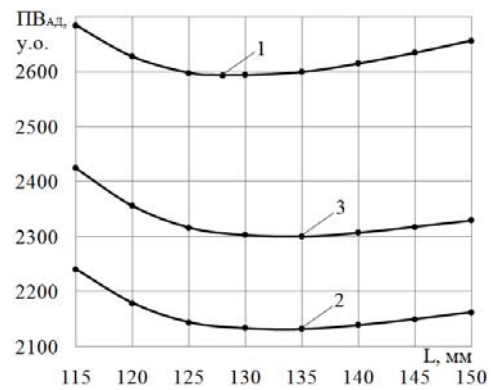


Рис. 2

Положення екстремуму модифікованого критерію ПВ показано на рис. 2 (крива 2). У даному випадку модифікований критерій приведених витрат має екстремум при довжині пакета статора 135 мм. Порівняння показників серійного та оптимізованих за різними критеріями двигунів наведено в табл. 1. У процесі оптимізації було враховано проектні діапазонні обмеження за температурами обмоток статора і підшипникових щитів.

Таблиця 1

Двигуни	Серійний	Оптимізований за критерієм ПВ	Оптимізований за критерієм ККД	Оптимізований за модифікованим критерієм ПВ
Показники				
ПВ _{АД} , у.о.	2594,6	2594	2635,6	2133
$\eta_{АД}$, %	86,7	86,6	86,82	86,77
$\cos\varphi_{АД}$, в.о.	0,88	0,866	0,909	0,896
Маса АД, кг	119,3	118,3	126,9	121,8
Вартість АД, у.о.	644,3	639,2	682,4	657
Об'єм АД, дм ³	9,62	9,47	10,73	9,99
L, мм	130	128	145	135

З метою аналізу $k_{зе}$ були проведені дослідження, у яких змінювалася вартість електроенергії і таким чином змінювалося співвідношення між значенням немодифікованих ПВ та значенням вартості втрат активної енергії $C_{ва}$ базового двигуна. Розглядалася одна і та сама проектна задача та використовувалася та сама варійована змінна. Оптимуми ККД отримано при однаковому значенні варійованої змінної, а ПВ – при різних. Якщо прийняти, що вартість 1 кВт·год складає 0,5 у.е., то $k_{зе}$ дорівнює 1,07. Результати цих досліджень наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Показники \ Двигуни	Серійний	Оптимізований за критерієм ПВ	Оптимізований за критерієм ККД	Оптимізований за модифікованим критерієм ПВ
ПВ _{АД} , у.о.	16217	16091	16099	16018
$\eta_{АД}$, %	86,7	86,81	86,82	86,81
$\cos\varphi_{АД}$, в.о.	0,88	0,904	0,909	0,904
Маса АД, кг	119,3	124,4	126,9	124,6
Вартість АД, у.о.	644,3	669,7	682,4	671
Об'єм АД, дм ³	9,62	10,36	10,73	10,39
L , мм	130	140	145	140,6

Аналіз коефіцієнта $k_{инф}$ було проведено для тієї самої проектної задачі, але вже зі знайденим коефіцієнтом $k_{зе}$. Для прикладу, показник інфляції $d_{инф}$ становить 5,3 %, а термін окупності T_n – 5 років. За таких значень $d_{инф}$ і T_n коефіцієнт $k_{инф}$ дорівнює 1,112.

Щоб перевірити вплив $k_{инф}$ на модифікований критерій ПВ, були проведені розрахунки, в яких змінювалася довжина пакета статора L у діапазоні від 115 до 150 мм. Як видно з рис. 2 (крива 3), положення екстремуму не змінилося і залишилося при значенні $L = 135$ мм, але величина ПВ збільшилася.

Висновки.

Розрахунки з використанням традиційного виразу критерію ПВ показали суттєву різницю значень довжини машини, які відповідають максимуму ККД і мінімуму ПВ. Для наближення цих екстремумів у модифікованому критерії ПВ було використано коефіцієнт значущості експлуатації $k_{зе}$. Величина цього коефіцієнта в значній мірі залежить від співвідношення капітальних і експлуатаційних витрат базового двигуна.

Значення модифікованого критерію ПВ стає меншим значення немодифікованого.

Коефіцієнт інфляції визначає тільки значення ПВ, мало впливаючи на положення мінімуму критерію модифікованих ПВ. При врахуванні заданої інфляції ($k_{инф} = 1,112$) величина модифікованого критерію приведених витрат електроприводу збільшилася на 7,9 % (з 2133 до 2301,2 у.о.)

Використання модифікованого критерію ПВ дає змогу здійснити оптимізаційне проектування з урахуванням енергетичного показника – ККД і економічного показника – вартості електродвигуна.

1. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины: Асинхронные машины. Москва: Высшая школа, 1988. 328 с.
2. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. Москва: Высшая школа, 2002. 511 с.
3. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. Москва: Высшая школа, 1984. 431 с.
4. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.
5. Попов В.И., Ахунов Т.А., Макаров Л.Н. Современные асинхронные электрические машины. М.: Знак, 1999. 256 с.
6. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. Одесса: Наука и техника, 2006. 320 с.
7. Заблоцький М.М., Пиліогін В.С., Бур К. Система автоматизованого проектування електромеханічних пристроїв. Част. 2. Алчевськ: ДонДТУ, 2014. 279 с.
8. Петрушин В.С., Якімець А.М., Волошук Н.А. Використання модифікованого критерію зведених витрат при розробці високоефективних асинхронних двигунів. *Електроінформ*. 2008. № 2. С. 6–7.
9. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якімець А.М. Программный продукт "DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода. Свидетельство о регистрации программы ПА № 4065. Киев. 26.03.2001.

МОДИФИКАЦИЯ КРИТЕРИЯ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.С. Петрушин, докт.техн.наук, Р.Н. Еноктаев

Одесский национальный политехнический университет,

пр. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина. E-mail: victor_petrushin@ukr.net, rostik-enok@ukr.net

Модификация критерия приведенных затрат заключается в использовании коэффициента значимости эксплуатации для согласования максимума КПД и минимума приведенных затрат. При этом величина модифицированного критерия приведенных затрат становится меньше величины немодифицированного. Коэффициент значимости эксплуатации, который представляет собой долевое превышение приведенных затрат над стоимостью потерь активной энергии, предлагается определять как отношение значения немодифицированных приведенных затрат на значение стоимости потерь активной энергии базового двигателя, относительно которого осуществляется оптимизационное проектирование энергосберегающего асинхронного двигателя. Проведен анализ влияния коэффициента инфляции на критерий приведенных затрат. Его учет увеличивает величину модифицированного критерия приведенных затрат. Библ. 9, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, оптимизационное проектирование, критерий приведенных затрат, модификация проектного критерия, коэффициент значимости эксплуатации, коэффициент инфляции.

MODIFICATION OF THE CRITERION OF THE PRESENT EXPENSES FOR THE DESIGN OF ENERGY-SAVING INDUCTION MOTORS

V.S. Petrushin, R.N. Yenoktaiev

Odessa National Polytechnic University,

pr. Shevchenko, 1, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: victor_petrushin@ukr.net, rostik-enok@ukr.net

Modification of the criterion of the present expenses consists in use of coefficient of significance of exploitation for the coordination of a maximum of an efficiency of the engine and a minimum of the present expenses. In this case, the value of the modified criterion of the present expenses becomes less than the value of the unmodified one. The coefficient of significance of exploitation, which represents a fractional excess of the above expenses over the cost of active energy losses, is proposed to be defined as the ratio of the unmodified present expenses to the cost of active energy losses of the base motor relative to which the energy-saving induction motor is optimized. The analysis of the influence of the the inflation coefficient on the criterion of present expenses is carried out. Its accounting increases the value of the modified criterion of the present expenses. References 9, tables 2, figures 2.

Key words: induction motor, optimization design, criterion of the present expenses, modification of a design criterion, coefficient of significance of exploitation, inflation coefficient.

1. Radin V.I., Bruskin D.E., Zorokhovich A.E. Electric machines: Induction machines. Moskva: Vysshaia shkola, 1988. 328 p. (Rus)
2. Lopukhina E.M., Semenchukov G.A. Automated design of low-power electric machines. Moskva: Vysshaia shkola, 2002. 511 p. (Rus)
3. Goldberg O.D., Gurin Ia.S., Sviridenko I.S. Designing of electrical machines. Moskva: Vysshaia shkola, 1984. 431 p. (Rus)
4. Dombrovskii V.V., Khutoretskii G.M. Basics of designing electric machines for AC current. Leningrad: Energiia, 1974. 504 p. (Rus)
5. Popov V.I., Akhunov T.A., Makarov L.N. Modern asynchronous electric machines. Moskva: Znack, 1999. 256 p. (Rus)
6. Petrushin V.S. Induction motors in the controlled-speed electric drives. Odessa: Nauka i Tekhnika, 2006. 320 p. (Rus)
7. Zabolotskii M.M., Piliugin V.E., Bur K. Automated design of electromechanical devices. Part 2. Alchevsk: DonDTU, 2014. 279 p. (Ukr)
8. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Voloshchuk N.A. Using the modified criterion of combined costs for the development of high-performance asynchronous motors. *Elektroinform.* 2008. No 2. Pp. 6–7. (Ukr)
9. Petrushin V.S., Riabinin S.V., Yakimets A.M. The software product DIMASDrive. The program for analysis, selection and design of asynchronous squirrel cage motors in the variable speed electric drive systems. Registration certificate program PA No 4065. Kyiv. 26.03.2001.

Надійшла 05.03.2018
Остаточний варіант 06.12.2018