

УДК 621.313.333

В.С. Петрушин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО КРИТЕРИЯ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ

Пропонується модифікація критерію зведених витрат за рахунок використання коефіцієнтів значимості експлуатації та пріоритету врахування активних витрат, що дозволяє узгодити максимум ККД та мінімум зведених витрат. Проведено аналіз впливу коефіцієнту інфляції на критерій зведених витрат.

Предлагается модификация критерия приведенных затрат за счет использования коэффициентов значимости эксплуатации и приоритета учета активных потерь, что позволяет согласовать максимум КПД и минимум приведенных затрат. Проведен анализ влияния коэффициента инфляции на критерий приведенных затрат.

ВВЕДЕНИЕ

Определяющим фактором для отечественных потребителей асинхронных двигателей (АД) на сегодняшний день есть их цена. Вместе с тем мировая практика показывает, что стремительное повышение стоимости энергоресурсов требует разработки и производства энергосберегающих двигателей с повышенными энергетическими показателями и сниженными эксплуатационными затратами, несмотря на некоторое повышение стоимости таких двигателей.

Эффективность решения задачи оптимального проектного синтеза определяется обоснованностью проектного критерия. Выбор критерия зависит от назначения электрической машины (ЭМ), условий ее эксплуатации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние десятилетия много стран в качестве критерия при проектировании АД используют КПД, максимум которого достигается в результате параметрической оптимизации. Но критерий КПД не может учесть много финансовых аспектов, таких как затраты на изготовление и эксплуатацию двигателя, коэффициент инфляции и другое.

При проектировании серий АД используется критерий приведенных затрат (ПЗ) [1-3]. При разработке энергосберегающих АД проектным критерием является КПД и определение экономической эффективности основывается на расчетах экономии электроэнергии и стоимости компенсации реактивной энергии [4]. Также может быть использован критерий ПЗ, если он модифицирован с учетом следующих обстоятельств [5]: необходимо учитывать влияние на критерий инфляционных процессов, поскольку нормативные сроки окупаемости АД достаточно продолжительные (5-8 лет), за время службы двигателя энергетическая составляющая критерию ПЗ в несколько раз превышает составляющую, связанную с капитальными затратами, поэтому вопрос об оптимизации энергетической составляющей является особенно важным.

Для того, чтобы использовать модифицированный критерий ПЗ, необходимо согласовать критерий ПЗ с критерием КПД, т.е. приблизить их экстремумы. Этого можно достичь, используя два коэффициента: коэффициент значимости эксплуатации $k_{зэ}$ и коэффициент приоритета учета активных потерь $k_{нап}$. Целесообразно также введение в модифицированный критерий ПЗ

коэффициента инфляции $k_{инф}$, который учитывает процессы обесценивания денежной массы (инфляцию) [6].

С этой целью было выполнено корректирование алгоритма расчета ПЗ программы DIMASDrive[7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С учетом вышесказанного выражение для модифицированного критерия ПЗ имеет вид

$$ПЗ = \frac{C_{дв} + C_{зп}}{k_{зэ}} + (C_{дв} + C_{зп}) \cdot (k_{ам} + k_{об}) \cdot k_{инф} + C_{на} \cdot k_{нап} \cdot k_{инф},$$

где $C_{дв}$ – стоимость двигателя; $C_{на}$ – стоимость потерь активной энергии; $C_{зп}$ – стоимость затрат, соответствующих компенсации потребляемой реактивной мощности; $k_{ам}$ – коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления; $k_{об}$ – коэффициент, учитывающий затраты на обслуживание двигателя; $k_{нап}$ – коэффициент приоритета учета активных потерь; $k_{зэ}$ – коэффициент значимости эксплуатации $k_{зэ}$; $k_{инф}$ – коэффициент инфляции).

Значение $k_{инф}$ рассчитывается следующим образом

$$k_{инф} = \frac{\sum_{m=0}^{T_n-1} \left(1 + \frac{d_{инф}}{100\%}\right)^m}{T_0},$$

где T_n – нормативный срок окупаемости АД; $d_{инф}$ – усредненный показатель годовой инфляции (в %).

Подбор коэффициентов для согласования максимума КПД и минимума ПЗ выполнен на примере двигателя 4A160S4Y3 [8]. Чтобы найти экстремумы критериев КПД и ПЗ проведено оптимизацию двигателя с помощью DIMASDrive, изменяя значения двух варьируемых параметров: коэффициента изменения магнитного потока $k_{имп}$ (числа витков обмотки статора с учетом допустимого коэффициента заполнения паза статора) в диапазоне от 0,9 до 1,1 и длины статора L в диапазоне от 112 до 196 мм.

Оптimum КПД получено при значениях $k_{имп}$ и L соответственно 0,9 и 173 мм (рис. 1). Оптimum ПЗ получено при значениях $k_{имп}$ и L соответственно 0,9 и 156 мм (рис. 2).

Расчеты с использованием традиционного выражения ПЗ показывают существенное расхождение значений длины машины, которые отвечают максимуму КПД и минимуму ПЗ. При введении коэффициентов $k_{нап} = 9$, $k_{зэ} = 8$ экстремумы практически совпадают.

© В.С. Петрушин

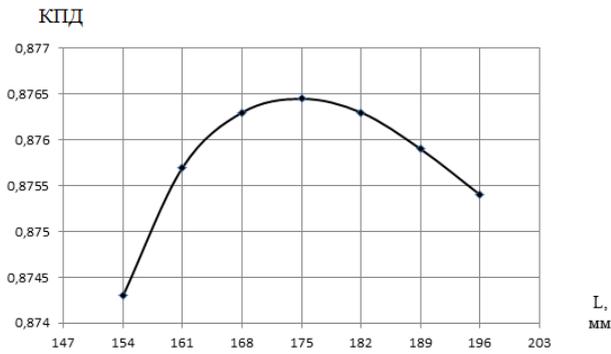


Рис. 1. Зависимость КПД от L при значении $k_{инф}$, равном 0,9

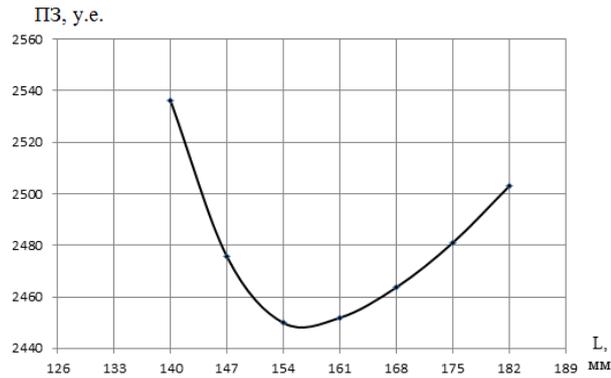


Рис. 2. Зависимость ПЗ от L при значении $k_{инф}$, равном 0,9

Положение экстремума модифицированного критерия ПЗ показано на рис. 3.

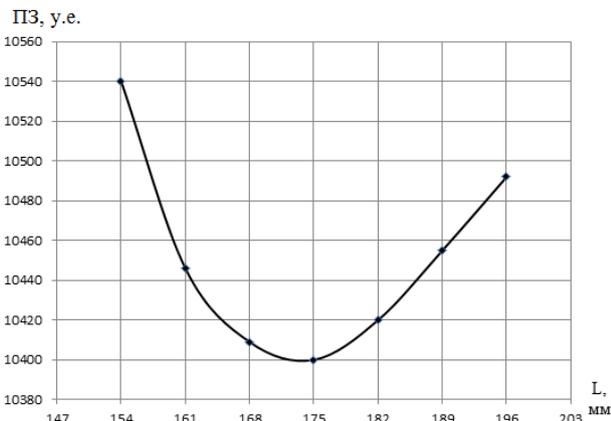


Рис. 3. Зависимость модифицированных ПЗ от L при значении $k_{инф}$, равном 0,9, и коэффициентах $k_{нап}$ и $k_{эз}$, значения которых равны 9 и 8 соответственно

Коэффициент $k_{нап}$ значительно больше влияет на значение ПЗ чем коэффициент $k_{эз}$. Сравнение серийного и оптимизированного двигателей, а также оптимизированного АД с коэффициентами $k_{нап}$ и $k_{эз}$ представлено в табл. 1. Как видно из табл. 1, коэффициенты $k_{нап}$ и $k_{эз}$ влияют только на значения ПЗ.

Анализ коэффициента $k_{инф}$ был проведен для того же двигателя 4A160S4Y3, но уже с найденными коэффициентами $k_{нап}$ и $k_{эз}$. Для примера показатель инфляции $d_{инф}$ составляет 2 %, а срок окупаемости T_n – 8 лет. При таких значениях $d_{инф}$ и T_n коэффициент $k_{инф}$ равен 1,073.

Чтобы проверить влияние $k_{инф}$ на критерий ПЗ, было проведено оптимизацию двигателя с помощью DIMASDrive, изменяя значения коэффициента изменения магнитного потока $k_{инф}$ в диапазоне от 0,9 до 1,1 и длины

статора L в диапазоне от 112 до 196 мм. Как видно из рис. 4 положение экстремума не изменилось и осталось при значениях $k_{инф}$ и L соответственно 0,9 и 173 мм, но величина ПЗ увеличилась, что также видно из табл. 2.

Таблица 1
Сравнение показателей модификаций двигателя 4A160S4Y3

Показатели \ Двигатели	Серийный	Оптимизированный по критерию ПЗ	Оптимизированный по критерию КПД	Оптимизированный по критерию ПЗ
ПЗ АД, у.е.	2488	2449	2481	10407
η АД	0,866	0,875	0,876	0,876
cos ϕ АД	0,868	0,859	0,888	0,888
Масса АД, кг	121	129	139	139
Стоимость АД, у.е.	573	602	637	637
Объем АД, дм ³	10,36	11,54	12,95	12,95
Макс. перегрев обмотки статора, °С	92	76	71	71
Коэффициент изменения потока $k_{инф}$	1	0.9	0.9	0.9
Длина статора L , мм	140	156	173	173

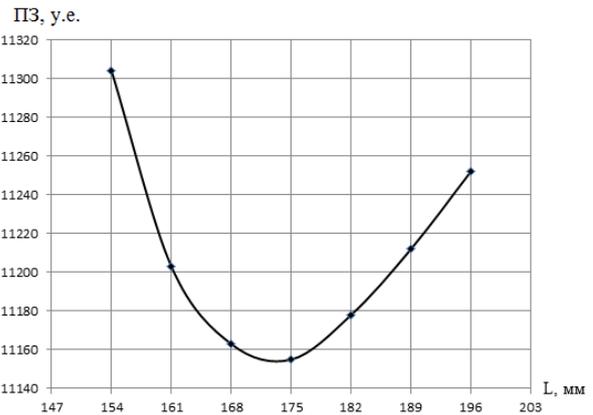


Рис. 4. Зависимость ПЗ от L при $k_{инф}$, равном 0,9, и коэффициентах $k_{нап}$ и $k_{эз}$ и $k_{инф}$ 9, 8 и 1,073 соответственно

Таблица 2
Сравнение показателей модификаций двигателя 4A160S4Y3 без учета $k_{инф}$ и с учетом $k_{инф}$

Показатели \ Двигатели	Оптимизированный по модифицированному критерию ПЗ без $k_{инф}$	Оптимизированный по модифицированному критерию ПЗ с $k_{инф}$
ПЗ АД, у.е.	10407	11155
η АД	0,876	0,876
cos ϕ АД	0,888	0,888
Масса АД, кг	139	139
Стоимость АД, у.е.	637	637
Объем АД, дм ³	12,95	12,95
Макс. перегрев обмотки статора, °С	71	71
Коэффициент изменения потока $k_{инф}$	0,9	0,9
Длина статора L , мм	173	173

Проектные ограничения определены требованиями стандартов, технических заданий, возможностями производства и могут быть разделены на две группы: конструктивно-технологическую и функциональную. В составе первой группы ограничения геометрических размеров конструкции АД. Вторая включает в себя механические, тепловые, динамические и виброакустические ограничения.

ВЫВОДЫ

1. Расчеты с использованием традиционного выражения критерия ПЗ показали существенное различие значений длины машины, которые отвечают максимуму КПД и минимуму ПЗ. Для приближения этих экстремумов в модифицированном критерии ПЗ были использованы коэффициенты значимости эксплуатации $k_{эз}$ и приоритета учета активных потерь $k_{нан}$.

2. Значения модифицированного критерия ПЗ значительно превышают значения немодифицированного.

3. $k_{инф}$ определяет только значение ПЗ, не влияя на положение минимума критерия ПЗ. Однако поскольку при учете $k_{инф}$ величина ПЗ увеличивается, учет $k_{инф}$ необходим при проектировании.

4. Такая же закономерность наблюдается при большем количестве варьируемых проектных переменных.

5. Аналогичным образом может быть осуществлено оптимизационное проектирование по модифицированному критерию ПЗ энергосберегающих АД других мощностей, частот вращения, конструктивных исполнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуринов Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
2. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия, 1974. – 503 с.
3. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // *Электромашиностроения та електрообладнання*: Респ. міжвід.наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 56. – С. 51-54.
4. Попов В.И., Ахундов Т.А., Макаров Л.Н. Современные асинхронные электрические машины: Новая Российская серия РА. – М.: Изд-во "Знак", 1999. – 256 с.
5. Петрушин В.С., Якимец А.М., Волощук Н.А. Використання модифікованого критерію зведених витрат при розробці високоефективних асинхронних двигунів // *Науково-технічний журнал "Електроінформ"*. – № 2. – 2008. – С. 6-7.
6. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 303 с.

7. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт "DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

8. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gurin Ja.S., Kuznecov B.I. *Proektirovanie serij jelektricheskikh mashin*. Moscow, Jenergija Publ., 1978. 479 p. 2. Dombrovskij V.V., Hutoreckij G.M. *Osnovy proektirovanija jelektricheskikh mashin peremennogo toka*. Leningrad, Jenergija Publ., 1974. 503 p. 3. Petrushin V.S. Privedenные затраты asinhronnykh dvigatelej v chastotnom jelektroprivoде pri razlichnykh zakonah upravlenija. *Elektromashinobuduvannja ta elektroobladnannja*, 2001, no.56, pp. 51-54. 4. Popov V.I., Ahunov T.A., Makarov L.N. *Sovremennye asinhronnye jelektricheskie mashiny: Novaja Rossijskaja serija RA*. Moscow, Znak Publ., 1999. 256 p. 5. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Voloshchuk N.A. Vykorystannja modyfikovanoho kryteriiu zvedenykh vytrat pry rozrobtsi vysokoefektyvnykh asynkronnykh dvyhuniv. *Naukovo-tehnikchnyj zhurnal "Elektroinform"*, 2008, no.2, pp. 6-7. 6. Petrushin V.S. *Asinhronnye dvigateli v reguliruemom jelektroprivoде: Ucheb. posob. dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij*. Odessa, Nauka i tehnika Publ., 2006. 303 p. 7. Petrushin V.S., Rjabinin S.V., Yakimets A.M. Programnyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovanija asinhronnykh korotkozamknytykh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoда (svidetel'stvo o registracii programmy PA№4065). Kiev: Ministerstvo obrazovanija i nauki Ukrainy. Gosudarstvennyj departament intellektual'noj sobstvennosti, 26.03.2001. 8. Kravchik A.Je., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevskaja E.A. *Asinhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1982. 504 p.

Поступила (received) 15.09.2013

Петрушин Виктор Сергеевич, д.т.н., проф.,
Одесский национальный политехнический университет,
кафедра "Электрические машины",
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,
тел/phone +380 048 7058494, e-mail: victor_petrushin@ukr.net

V.S. Petrushin
Odessa National Polytechnic University
1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine

Energy-efficient induction motors designing with application of a modified criterion of reduced costs.

The paper introduces a modified criterion of reduced costs that employs coefficients of operation significance and priority of ohmic loss accounting to allow matching maximum efficiency with minimum reduced costs. Impact of the inflation factor on the criterion of reduced costs is analyzed.

Key words – induction motor, optimization design, criterion of reduced costs, modification, rate of inflation.