

**В. С. ПЕТРУШИН**, д-р техн. наук, проф. ОНПУ;  
**Р. Н. ЕНОКТАЕВ**, магистрант ОНПУ

## **МОДИФИКАЦИЯ КРИТЕРИЯ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Предлагается модификация критерия приведенных затрат электропривода за счет использования коэффициента значимости эксплуатации, что позволяет согласовать максимум средненизкого КПД и минимум средненизких приведенных затрат. В результате величина модифицированного критерия ПЗ меньше величины немодифицированного. Проведен анализ влияния коэффициента инфляции на критерий приведенных затрат. Его учет увеличивает величину модифицированного критерия ПЗ.

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

**Введение.** Регулируемые электропривода во всех отраслях промышленности и на транспорте позволяют рационально управлять технологическими процессами при минимизации потребления энергоресурсов. Для анализа работы и проектирования регулируемых асинхронных двигателей (РАД) управляемых электроприводов необходимо совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и механизмов, а также, при необходимости, согласующих трансформаторов и редукторов. Управляемый электропривод может быть представлен комплексной математической моделью, которая включает в себя модели всех составляющих привода [1]. Такой подход реализован в программном продукте DIMASDrive [2].

Материальные, энергетические и трудовые ресурсы, необходимые для производства и эксплуатации РАД, должны использоваться с максимальной эффективностью, что может быть обеспечено только при их проектировании и оптимизации на основании применения научно обоснованных критериев. Тенденции, определяемые повышением стоимости энергоресурсов, обуславливают потребность в РАД с повышенными значениями КПД, хотя при этом наблюдается рост стоимости таких двигателей. В настоящее время проектируются и производятся энергоэффективные серии общепромышленных АД [4] и аналогично следует разрабатывать РАД.

При проектировании электрической машины (ЭМ) могут быть использованы различные проектные критерии, что зависит от назначения и условий эксплуатации ЭМ.

**Постановка задачи.** Рационально при проектировании энергосберегающих РАД использовать в качестве проектного критерия КПД, максимум которого достигается в результате параметрической оптимизации.

Проектирование РАД необходимо выполнять с учетом требования работы в определенном диапазоне частот вращения и это обстоятельство определяет специфику критерия оптимальности. Обоснованным является выбор диапазонного критерия КПД, что обеспечит минимизацию энергетических потерь во всем диапазоне регулирования от  $n_1$  до  $n_2$  [5]:

$$\eta_{с\delta} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} \eta(n) dn \quad (1)$$

Вместе с тем, предлагаемый диапазонный критерий КПД не учитывает другие финансовые аспекты, такие как затраты на изготовление и эксплуатацию двигателя и привода, коэффициент инфляции и другое. Такой учет осуществляется при использовании критерия приведенных затрат (ПЗ), который в случае проектирования РАД является также среднедиапазонным. Следует отметить, что при работе РАД в составе современных частотно-регулируемых электроприводов из-за близости коэффициента мощности привода к 1 из выражения критерия ПЗ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии [6]. При модификации критерия ПЗ электропривода [5, 7] необходимо учитывать влияние на критерий инфляционных процессов, поскольку нормативные сроки окупаемости РАД достаточно продолжительные (5-8 лет). Кроме того, за время службы двигателя энергетическая составляющая ПЗ в несколько раз превышает составляющую, связанную с капитальными затратами, поэтому первостепенным является оптимизация энергетической составляющей.

Для того, чтобы использовать модифицированный критерий ПЗ электропривода, необходимо согласовать его с критерием КПД, т.е. приблизить их экстремумы. Для этого используем коэффициент значимости эксплуатации  $k_{зэ}$ . Целесообразно также введение в модифицированный критерий ПЗ коэффициента инфляции  $k_{инф}$ , который учитывает процессы обесценивания денежной массы [7]. Аналогичным образом выполнена модификация критерия ПЗ для проектирования общепромышленных АД [5].

**Результаты исследований.** С учетом вышесказанного выражение для модифицированного критерия ПЗ электропривода имеет вид

$$ПЗ_{эп} = \frac{C_{эп}}{k_{зэ}} + C_{эп} \cdot (k_{ам} + k_{об}) \cdot k_{инф} + C_{па} \cdot k_{инф} \quad (2)$$

где  $C_{эп}$  – стоимость электропривода;

$C_{па}$  – стоимость потерь активной энергии;

$k_{ам}$  – коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления;

$k_{об}$  – коэффициент, учитывающий затраты на обслуживание электропривода;

$k_{зэ}$  – коэффициент значимости эксплуатации  $k_{зэ}$ ;

$k_{инф}$  – коэффициент инфляции.

Значение  $k_{инф}$  рассчитывается следующим образом

$$k_{инф} = \frac{\sum_{m=0}^{T_n-1} (1 + \frac{d_{инф}}{100\%})^m}{T_n}, \quad (3)$$

где  $T_n$  – нормативный срок окупаемости электропривода;

$d_{инф}$  – усредненный показатель годовой инфляции (в %).

Подбор коэффициента  $k_{э}$  для согласования максимума КПД и минимума ПЗ выполнен на примере двигателя 4A160S4Y3. Представлена проектная задача с использованием схемы соединения обмотки статора “звездой”. Рассматривается работа двигателя в РЭП с частотным преобразователем (Altivar 58, 1500 у.е., 15 кг,  $\eta_{мп} = 0,94$ ) при законе частотного управления  $U/f = \text{const}$ . В качестве нагрузки используется “лифтовая” нагрузка величиной 75 Н·м. Чтобы найти экстремумы критериев КПД и ПЗ проведена оптимизация двигателя с помощью DIMASDrive. В качестве варьируемых параметров выбраны длина пакета статора двигателя ( $L$ ), которая изменяется в диапазоне от 104 до 182 мм и частота, на которую проектируется обмотка статора (ОС) двигателя, изменяющаяся в диапазоне от 45 до 55 Гц. Изменение частоты ( $f$ ) предполагает автоматическое изменение числа витков ОС ( $W_l$ ), сечения эффективного проводника ОС ( $q_{эф}$ ), диаметра обмоточного провода ( $d_{пр}$ ).

Оптimum среднедиапазонного КПД получено при значениях  $f$  и  $L$  соответственно 52,5 Гц и 143 мм (рис. 1). Оптimum среднедиапазонных ПЗ получено при значениях  $f$  и  $L$  соответственно 52,5 Гц и 130 мм (рис. 2).

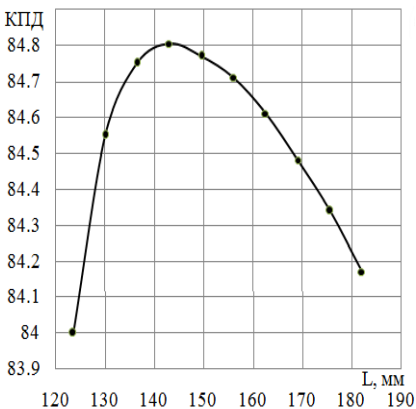


Рис. 1 – Зависимость КПД от  $L$  при значении  $f$ , равном 52,5 Гц

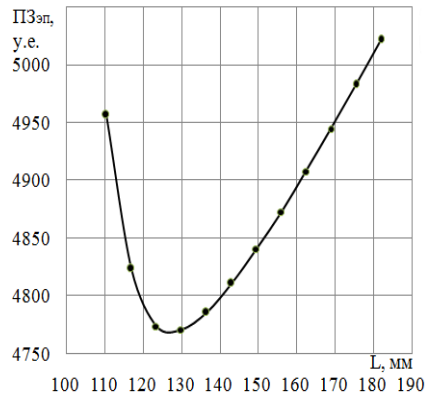


Рис. 2 – Зависимость ПЗ от  $L$  при значении  $f$ , равном 52,5 Гц

Расчеты с использованием традиционного выражения ПЗ показывают существенное расхождение значений длины машины, которые отвечают максимуму КПД и минимуму ПЗ.

Экстремумы критериев зависят только от варьируемых переменных, отвечающих массогабаритностоимостной составляющей. При введении коэффициента  $k_{зз} = 15$  экстремумы совпадают.

Положение экстремума модифицированного критерия ПЗ показано на (рис. 3).

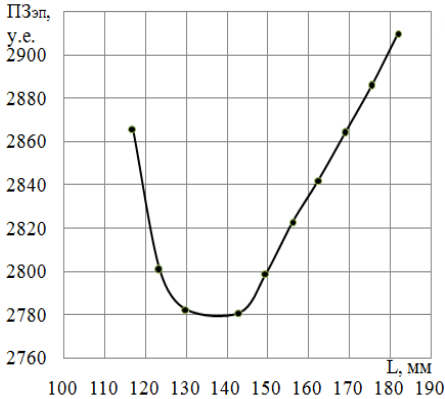


Рис. 3 – Зависимость модифицированных ПЗ от  $L$  при значении  $f$ , равном 52,5 Гц и коэффициенте  $k_{зз}$ , значение которого равно 15

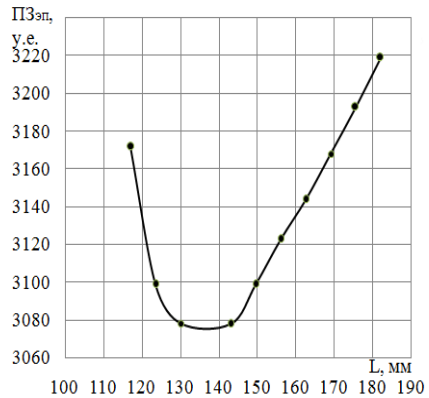


Рис. 4 – Зависимость ПЗ от  $L$  при  $f$ , равном 52,5 Гц и коэффициентах  $k_{зз}$  и  $k_{инф}$  15 и 1,112 соответственно

Сравнение серийного и оптимизированного двигателей, а также оптимизированного АД с коэффициентом  $k_{зз}$  представлено в (табл.). В процессе оптимизации были учтены проектные диапазонные ограничения по температурам обмотки статора и подшипниковых щитов. В двигателях прошедших оптимизацию диаметр обмоточного провода ( $d_{np}$ ) остался неизменным.

Анализ коэффициента  $k_{инф}$  был проведен для той же проектной задачи, но уже с найденным коэффициентом  $k_{зз}$ . Для примера показатель инфляции  $d_{инф}$  составляет 3%, а срок окупаемости  $T_n$  – 8 лет. При таких значениях  $d_{инф}$  и  $T_n$  коэффициент  $k_{инф}$  равен 1,112.

Чтобы проверить влияние  $k_{инф}$  на критерий ПЗ, была проведена оптимизация двигателя, изменяя значения частоты  $f$  в диапазоне от 45 до 55 Гц и длины статора  $L$  в диапазоне от 104 до 182 мм.

Таблица 1 – Сравнение показателей модификаций двигателя 4A160S4Y3

| Показатели \ Двигатели              | Серийный | Оптимизированный по критерию ПЗ | Оптимизированный по критерию КПД | Оптимизированный по модифицированному критерию ПЗ |
|-------------------------------------|----------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| ПЗ $\varepsilon_{ПЗ}$ , у.е.        | 4800     | 4771                            | 4811                             | 2781  |
| $\eta_{\varepsilon ПЗ}$             | 82,48    | 82,9                            | 83,14                            | 83,14   |
| $\eta_{АД}$                         | 84,13    | 84,55                           | 84,8                             | 84,8  |
| $\cos\varphi_{АД}$                  | 0,88     | 0,86                            | 0,89                             | 0,89  |
| Масса АД, кг                        | 120      | 119                             | 125                              | 125   |
| Стоимость АД, у.е.                  | 651      | 644                             | 677                              | 677   |
| Объем АД, $\text{дм}^3$             | 9,6      | 9,6                             | 10,5                             | 10,5  |
| $f$ , Гц                            | 50       | 52,5                            | 52,5                             | 52,5  |
| $W_I$                               | 112      | 107                             | 107                              | 107   |
| $q_{\varepsilon ф}$ , $\text{мм}^2$ | 2,45     | 2,57                            | 2,57                             | 2,57  |
| $L$ , мм                            | 130      | 130                             | 143                              | 143   |

Как видно из (рис. 4) положение экстремума не изменилось и осталось при значениях  $f$  и  $L$  соответственно 52,5 Гц и 143 мм, но величина ПЗ увеличилась, что также видно из (рис. 4).

При учете задаваемой инфляции на 9,6 % изменится величина модифицированного критерия приведенных затрат ЭП (с 2781 по 3077 у.е.)

### Выводы

1. Расчеты с использованием традиционного выражения критерия ПЗ показали существенное различие значений длины машины, которые отвечают максимуму диапазонного КПД и минимуму диапазонных ПЗ. Для приближения этих экстремумов в модифицированном критерии ПЗ был использован коэффициент значимости эксплуатации  $k_{\varepsilon}$ .

2. Значение модифицированного критерия ПЗ становится меньше 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 для различных проектных задач, мощностей, конструктивных исполнений РАД.

**Список литературы:** 1. *Прозоров В.А.* Стратегия системного проектирования электрических машин // Электротехника. – 2007. – №2. – С. – 14 – 18. 2. *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. **3.** The Scottish Power Electronics and Electric Drives Consortium," Speed software for electric machine calculations," [http:// www.speedlab.co.uk/index.html](http://www.speedlab.co.uk/index.html), [web], 2006 **4.** *Попов В.И., Современныe асинхронныe электрическиe машины: Новая Россиjsкая серия RA / В.И. Попов, Т.А. Ахунов, Л.Н. Макаров.* – М.: Изд-во «Знак», 1999 – 256 с. **5.** *Петрушин В.С.* Асинхронныe двигатели в регулируемом электроприводе: Учеб. пособ. для студ. высш. учеб. заведений. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 303 с. **6.** *Петрушин В.С.* Приведенныe затраты асинхронныx двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // *Электромашинобудовання та електрообладнання: Респ. міжвід.наук.-техн. зб.* – 2001. – №56. – С. 51 – 54. **7.** *Петрушин В.С.* Використання модифікованого критерію зведених витрат при розробці високоефективних асинхронних двигунів / *В.С. Петрушин, А.М. Якімець, Н.А. Волощук* // *Науково-технічний журнал «Електроінформ».* – 2008. – №2. – С. 6 – 7.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Prozorov V.A. "Strategiei sistemnogo proekirovaniia elektricheskikh mashin" *Elektrotehnika* No 2. 2007. 14 – 18. [Print]. **2.** Petrushin V.S., S.V. Rjabinin and A.M. Iakimets'. Programmnyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniia asinhronnykh korotkozamknytykh dvigatelej sistem reguliruемого jelektroprivoda. Patent UA, no.4065. CD. **3.** The Scottish Power Electronics and Electric Drives Consortium, "Speed software for electric machine calculations," [http:// www.speedlab.co.uk/index.html](http://www.speedlab.co.uk/index.html), [web], 2006 **4.** Popov V.I., T.A. Akhunov and L.N. Makarov. *Sovremennye asinhronnye elektricheskie mashiny. Novaia Rossijskaia seriia RA.* Moscow. "Znak", 1999 **5.** Petrushin V.S. *Asinhronnye dvigateli v reguliruемом elektroprivode.* Ucheb. posob. dlia stud. vyssh. ucheb. zavedenii. Odessa. Nauka i tekhnika, 2006. **6.** Petrushin V.S. Privedennnye zatraty asinhronnykh dvigatelei v chastotnom elektroprivode pri razlichnykh zakonakh upravleniia. *Elektromashinobudovannia ta elektroobladnannia.* Rесп. mizhvid.nauk.-tekhn. zб. No 56. 2001. 51 – 54. [Print]. **7.** Petrushin V.S., A.M. Iakimets' and N.A. Voloshchuk. Vikoristannia modifikovanogo kriteriiu zvedenikh vitrat pri rozrobttsi visokoeftivnykh asinhronnykh dviguniv. *Naukovo-tekhnichnii zhurnal "Elektroinform".* No 2. 2008. 6 – 7. [Print].

*Надійшла (received) 04 .08.2014*



Петрушин Виктор Сергеевич,  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. Электрических машин Одесск. нац. политехн. ун-та, 65044, Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ,  
тел. (048)734-8494.  
E-mail: viktor\_petrushin@ukr.net



Еноктаев Ростислав Николаевич,  
магистрант Одесск. нац. политехн. ун-та, 65044, Одесса,  
пр-т Шевченко, 1, ОНПУ,  
тел. (097)046-30-70.  
E-mail: rostik-enok@inbox.ru