

дежности. Полученные результаты по эксплуатационной надежности в дальнейшем могут быть использованы для постановки и решения ряда задач, например, проведение сравнительных технико-

экономических расчетов, определение оптимальной периодичности замен отдельных элементов деталей, узлов, а также при проектировании и изготовлении ЭМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В.В., Шевчук В.П. Программа оценки надежности электрических машин по эксплуатационным данным. Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009614199. Роспатент. Москва, 12.08. 2009.
2. Рябинин И.А., Киреев Ю.Н. Надежность судовых электро-энергетических систем и судового электрооборудования. – Л.: Судостроение, 1974. – 264 с.
3. Надежность электрооборудования угольных шахт / Б.Н. Ванев, В.М. Гостищев, В.С. Дзюбан и др.; Под ред. А.И. Пархоменко. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 1997. – 302 с.
4. Разгильдеев Г.И., Серов В.И. Безопасность и надежность взрывозащищенного электрооборудования. – М.: Недра, 1992. – 207 с.
5. Быков А.И., Ванев Б.Н., Главный В.Д. и др. Надежность взрывозащищенного и рудничного электрооборудования. – М.: Недра, 1979. – 302 с.
6. Вайда Д. Исследования повреждений изоляции / пер. с венг. под ред. Д.В. Разевига, М.: Энергия, 1968. – 400 с.

Поступила 15.03.2010 г.

УДК 621.313.333

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМЕТРИИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

П.В. Тютеева, О.О. Муравлева

Томский политехнический университет
E-mail: TyutevaPV@elti.tpu.ru

Предложен способ модернизации асинхронных двигателей при изменении геометрии машины, позволяющий спроектировать энергоэффективный асинхронный двигатель с наивысшим КПД IE3 согласно спецификации CEMEP. Возрастание цены асинхронного двигателя компенсируется уменьшением расходов, приходящихся на срок эксплуатации, а также увеличением срока службы и надежности.

Ключевые слова:

Асинхронные двигатели, энергоэффективность, модернизация, экономическая оценка.

Key words:

Induction motors, energy efficiency, modernization, economic evaluation.

Введение

Современные мировые темпы развития электромашиностроения ставят задачу дальнейшего повышения энергетических показателей общепромышленных электродвигателей. Анализ работ по разработке и изготовлению асинхронных двигателей (АД) различных типов в развитых странах показывает, что наиболее актуальным направлением в последние годы было создание АД с повышенным на 2...3 % КПД по сравнению со стандартными двигателями, что обосновано тем, что увеличение при этом стоимости АД быстро окупается за счет снижения эксплуатационных затрат из-за меньшего потребления электроэнергии [1]. Такие серии двигателей уже начали выпускать фирмы Brook Hansen, ABB, Siemens и многие другие предприятия по всему миру, в нашей стране выпуском подобных машин занимается концерн РУСЭЛПРОМ.

Использование энергосберегающих АД дает большой эффект в виде экономии электроэнергии, а также, что очень важно, позволяет существенно улучшить экологическое состояние страны. Направления развития электрических машин обусловлены следующими процессами: ростом цен на энергоносители, истощением мировых запасов жидких углеводородов. Это обуславливает, с одной стороны, ужесточение энергетических требований к промышленному оборудованию, а, с другой стороны, поиск энергосберегающих технологий. Разработка энергоэффективных электрических машин позволит частично решить проблему энергосбережения.

Целью данной работы является модернизация и совершенствование проектирования энергоэффективных асинхронных двигателей при изменении геометрии и их экономическая оценка.

Постановка задачи исследования

С каждым годом наблюдается ужесточение нормативов по уровню энергопотребления и КПД электрических машин, и, в частности, асинхронных двигателей. В 1998 г. начало действовать добровольное соглашение производителей АД, в котором даны уровни КПД, соответствующие классам энергоэффективности: низкий – EFF3, повышенный – EFF2, высокий – EFF1 [2]. Однако данное соглашение имело неоднозначную трактовку в странах-участниках, поэтому решением CEMEP (*Comite Europeen de Constructeurs de Machines Electriques et d'Electronique de Puissance*) [3] были определены новые уровни показателей энергоэффективности, действие которых начнется с 2010–2011 гг. Новый стандарт определяет следующие уровни показателя энергоэффективности (КПД) для низковольтных трехфазных АД номинальной мощностью 0,75...375 кВт: IE1 – стандартный уровень КПД, соответствует EFF2, IE2 – высокий КПД, соответствует EFF1 и IE3 – наивысший КПД (IE – International Efficiency). На рис. 1 представлены уровни КПД (η), соответствующие новым установленным уровням энергоэффективности для 4-полюсных АД общепромышленного исполнения [3], P_{2n} – номинальная мощность АД.

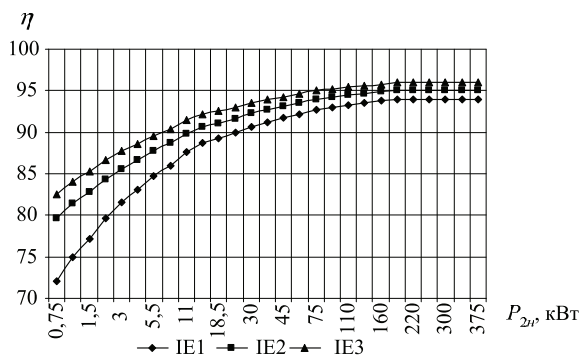


Рис. 1. Уровни КПД для нового стандарта энергоэффективности

Чем выше уровень энергоэффективности машины, тем сложнее ее изготовление и выше расход и стоимость активных материалов. Увеличение срока службы и повышенная надежность полностью компенсирует рост стоимости АД, а экономия электроэнергии обеспечивает малый период их окупаемости.

Таким образом, энергоэффективные двигатели – это асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, в которых благодаря заложенному при проектировании увеличению массы активных материалов и специальных приемов проектирования удается поднять номинальный КПД при некотором увеличении цены двигателя, энергоэффективные двигатели также обладают увеличенным сроком службы и меньшими значениями уровня шума и вибрации [4, 5]. В данной работе рассматривается возможность модернизации и получения энергоэффективных АД при изменении поперечного

сечения за счет использования машин большей высоты оси вращения.

Для проектирования энергоэффективных двигателей использовалась компьютерная модель проектирования энергоэффективных АД, математическая модель, на основе которой была создана компьютерная модель, более подробно рассмотрена в [4, 5]. Исходными параметрами принята геометрия базовых машин: внешний и внутренний диаметры статора и пазовые зоны, характеристики применяемых активных, изоляционных и конструктивных материалов. В качестве выходных параметров компьютерной модели приняты энергетические характеристики: КПД, потери (электрические в обмотках статора $P_{\sigma 1}$ и ротора $P_{\sigma 2}$), и экономические характеристики, которые позволяют оценить стоимость модернизации АД при повышении уровня энергоэффективности: цена АД $U_{\text{двиг}}$, стоимость затрат приходящихся на срок эксплуатации Z_m , дополнительный срок окупаемости $\Delta T_{\text{ок}}$, коэффициент экономичности $k_{\text{э}}$, стоимость повышения КПД на 1 % $\Delta U_{\%}$.

Дополнительный срок окупаемости определяется как отношение увеличения стоимости АД $\Delta U_{\text{двиг}}$ к годовому экономическому эффекту за счет снижения энергопотребления:

$$\Delta T_{\text{ок}} = \frac{\Delta U_{\text{двиг}}}{\Delta C_{\text{э}}},$$

где $\Delta C_{\text{э}}$ – уменьшение годового потребления электроэнергии.

Коэффициент экономичности определяется из выражения:

$$k_{\text{э}} = \frac{C_a}{U_{\text{двиг}}},$$

где ΔC_a – стоимость активных потерь электроэнергии.

Стоимость повышения КПД на 1 % при проектировании энергоэффективного АД рассчитывается следующим образом:

$$\Delta U_{\%} = 0,01 \cdot \frac{U_{\text{двиг}_{i+1}} - U_{\text{двиг}_i}}{\eta_{i+1} - \eta_i},$$

где $U_{\text{двиг}_{i+1}}$ и $U_{\text{двиг}_i}$ – значения стоимости машины при изменении входных данных при проектировании энергоэффективных АД, η_{i+1} и η_i – значения КПД при изменении входных данных при проектировании энергоэффективных АД.

Результаты моделирования

Для расчетов использовались АД современной серии 6А, выпускаемой ОАО «Сибэлектромотор», г. Томск. Расчет энергетических и экономических характеристик производится на основе компьютерной модели проектирования энергоэффективных АД.

На рис. 2 приведены данные расчета энергетического показателя (КПД) при использовании ма-

шин большей высоты оси вращения, а, следовательно, изменении площади поперечного сечения (с базового АД 6А80В4 на габариты 6А90S4 и 6А90L4). Как видно из рис. 2, использование данного способа модернизации АД позволяет получить машину с уровнем энергоэффективности, соответствующим классу IE2. Однако, чтобы получить машину с более высоким классом энергоэффективности IE3, требуется дальнейшее изменение геометрии машины и увеличение расхода активных материалов. Дополнительно повысить КПД можно за счет увеличения длины сердечников статора и ротора l_δ [5] на 20 % у двигателя 6А90L4, рис. 2.

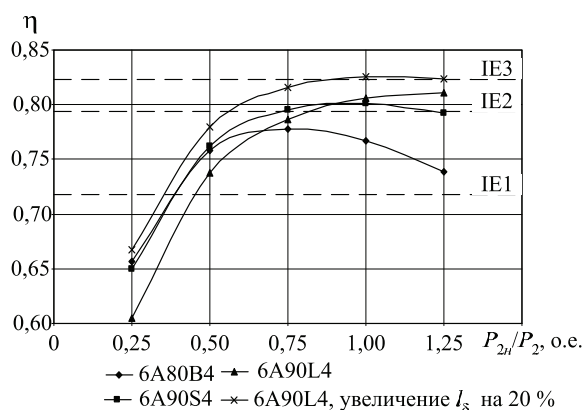


Рис. 2. Зависимость КПД асинхронных двигателей от мощности (базовый 6А80В4, $P_{2н}=0,75$ кВт)

На рис. 3 и 4 представлены зависимости изменения электрических потерь в обмотках статора и ротора, возникающие при изменении поперечной и продольной геометрии. Как видно из рис. 3, двигатель с габаритом 6А90L4 и увеличенным значением длины сердечников на 20 % обладает наименьшим значением электрических потерь в статоре по сравнению с базовым АД 6А80В4. Снижение потерь в номинальном режиме составляет 44 %, снижение электрических потерь происходит за счет уменьшения сопротивления обмотки статора.

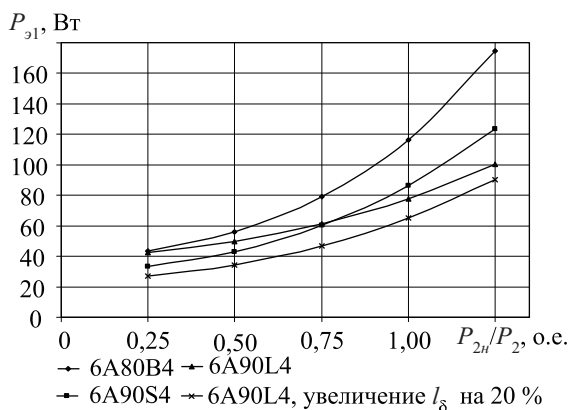


Рис. 3. Зависимость электрических потерь в статоре асинхронных двигателей от мощности (базовый 6А80В4, $P_{2н}=0,75$ кВт)

Электрические потери в роторе у 6А90L4 с увеличенным значением длины сердечников на 20 %

(рис. 4), оказываются примерно равными потерям в АД без изменения продольной геометрии. Уменьшение электрических потерь в роторе по сравнению с базовой машиной составляет более 50 %. Именно снижение электрических потерь в большей степени влияет на улучшение показателя энергоэффективности АД и возможность получения машины с уровнем, удовлетворяющим новейшим требованиям СЕМЕР. Уменьшение электрических потерь в АД обуславливает снижение превышения температуры в обмотках статора и ротора, что положительно сказывается на ресурсе изоляции, увеличивая надежность двигателя в целом.

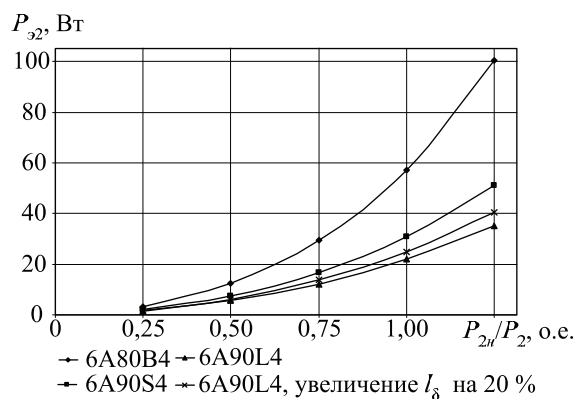


Рис. 4. Зависимость электрических потерь в роторе асинхронных двигателей от мощности (базовый 6А80В4, $P_{2н}=0,75$ кВт)

В таблице представлены данные по энергетическим характеристикам при изменении поперечной геометрии в соответствии с требованиями по энергоэффективности СЕМЕР.

При переходе на класс энергоэффективности IE3 за счет снижения потерь возникающих в двигателе, удастся снизить затраты приходящиеся на срок эксплуатации (таблица) на 14,6 %, цена двигателя же возрастает на 55 % по сравнению с базовым двигателем 6А80В4. Коэффициент экономичности снижается почти в 2 раза, снижение коэффициента экономичности указывает на более низкие значения потерь электроэнергии, приходящиеся на срок эксплуатации. При эксплуатации предпочтительнее использовать машины с меньшим значением энергетического коэффициента, т. к. меньший энергетический коэффициент означает меньшее значение потерь электроэнергии, возникающих в АД.

Таблица. Экономические характеристики АД при изменении поперечной геометрии

Показатель	6А80В4 (базовый АД)	6А90S4	6А90L4	6А90L4, увеличение l_δ на 20 %
Класс энергоэффективности	IE1	IE2	IE2	IE3
Z_r , р.	26060	23380	23610	22260
$C_{двиг}$, р.	2312	2806	3204	3584
$k_{э}$	1,43	0,99	0,84	0,67

Дополнительный срок окупаемости при внедрении энергоэффективного АД с классом энергоэффективности IE3 составляет менее одного месяца, что повышает конкурентоспособность создаваемых энергоэффективных машин. При этом стоимость модернизации АД или стоимость повышения КПД на 1 % равна 215,25 р. для АД номинальной мощностью 0,75 кВт, что составляет около 10 % от цены базового двигателя.

Выводы

Показано, что способ модернизации асинхронных двигателей на основе серии 6А при изменении поперечного и продольного сечения машины за счет изменения габарита и длины сердечников ста-

тора и ротора позволяет спроектировать энергоэффективный двигатель с наивысшим КПД IE3 согласно спецификации СЕМЕР. Общее снижение потерь в асинхронном двигателе достигает 33,3 %, в том числе снижение электрических потерь в статоре до 44 %, а в роторе – около 50 %. Дополнительный срок окупаемости при внедрении энергоэффективного асинхронного двигателя IE3 составляет менее одного месяца при возрастании цены по сравнению с базовой машиной на 55 %. Стоимость модернизации двигателя или стоимость повышения КПД на 1 % составляет около 10 % от цены базовой машины. Возрастание цены двигателя компенсируется за счет уменьшения расходов приходящихся на срок эксплуатации, а также увеличения срока службы за счет повышения надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивокобыленко В.Ф., Бурковский А.Н. Пути повышения энергоэффективности предприятий топливно-энергетического комплекса Донбасса // Труды науково-практична конференція «Донбас 2020: наука і техніка – виробництву». – 5–6 лютого 2002 г. – Донецьк, 2002. – С. 356–359.
2. Электродвигатели EFF1. Преимущества высокого КПД // Энергоэффективность. – 2005. – № 1. – С. 20–21.
3. New efficiency classes for low-voltage three-phase motors (IE-Code). 2009. URL: <http://www.cemep.org/index.php?id=53> (дата обращения: 25.08.2009).
4. Муравлева О.О., Тютёва П.В. Особенности проектирования асинхронных двигателей в современных условиях // Проблемы энергетики (Казань). – 2008. – № 7–8/1. – С. 173–183.
5. Муравлева О.О., Тютёва П.В. Совершенствование асинхронных двигателей для регулируемого электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 177–181.

Поступила 12.01.2010 г.