

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудин И.В., Ищенко В.П., Малкин А.И. Экспериментальное исследование течения наполненного полимера при наличии свободной поверхности // Тепло- и массоперенос. — Минск, 1972. — Т. 3. — С. 167–172.
2. Шрагер Г.Р., Козлобродов А.Н., Якутенок В.А. Моделирование гидродинамических процессов в технологии переработки полимерных материалов. — Томск: Изд-во ТГУ, 1999. — 230 с.
3. Ищенко В.П., Козлобродов А.Н. Заполнение вертикальных цилиндрических каналов неньютоновской жидкостью // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1985. — Вып. 2. — № 10. — С. 34–42.
4. Smith T.G., Wilkes J.O. Laminar free surface flow into a vertical cylinder // Comput. and Fluids. — 1975. — V. 3. — № 1. — P. 51–68.
5. Козлобродов А.Н., Шрагер Г.Р. Анализ напряженного состояния поверхностного слоя полимерной массы при заполнении крупногабаритных пресс-форм // Механика композитных материалов. — 2001. — № 4. — С. 559–575.
6. Березин И.К., Голубицкий А.М., Иванов В.А. Растекание неньютоновских жидкостей под действием силы тяжести // Инженерно-физический журнал. — 1990. — Т. 58. — № 3. — С. 447–455.
7. Липанов А.М., Альес М.Ю., Константинов Ю.Н. Численное моделирование ползущих течений неньютоновских жидкостей со свободной поверхностью // Математическое моделирование. — 1993. — Т. 5. — № 7. — С. 3–9.
8. Хусид Б.М. Растекание неньютоновской жидкости по горизонтальной плоскости с интенсивными процессами тепло- и массообмена на поверхности слоя // Инженерно-физический журнал. — 1983. — Т. 45. — № 1. — С. 51–60.
9. Смольский Б.М., Шульман З.П., Гориславец В.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов. — Минск: Наука и техника, 1970. — 440 с.
10. Шульман З.П. Конвективный тепло-массоперенос реологически сложных жидкостей. — М.: Энергия, 1975. — 352 с.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1973. — 847 с.

Поступила 28.06.2006 г.

УДК 621.313.333:658.562

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

О.О. Муравлева, П.В. Тютёва

Томский политехнический университет
E-mail: MuravlevaOO@tpu.ru, TyutevaPV@sibmail.com

Предложено новое направление совершенствования асинхронных двигателей для регулируемого электропривода при изменении массогабаритных показателей, что позволит улучшить энергетические показатели и уменьшить затраты, приходящиеся на срок эксплуатации. Проанализированы результаты математического моделирования. Произведен расчет экономической эффективности при проектировании энергоэффективных асинхронных двигателей.

Введение

Энергосбережение, точнее рационализация производства, распределения и использования всех видов энергии, стало одним из основных приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Потенциал энергосбережения в России по оценкам специалистов составляет 40...45 % современного энергопотребления в стране, что составляет 360...430 млн т условного топлива. Треть этого потенциала экономии имеют отрасли топливно-энергетического комплекса, другая треть сосредоточена в энергоемких отраслях промышленности и строительстве, свыше 25 % — в жилищно-коммунальном хозяйстве, 7 % — на транспорте и 3 % — в сельском хозяйстве [1]. Европейский же потенциал в энергосбережении оценивается в 160 млн т условного топлива, что существенно ниже данного показателя в России. Энергоемкость выпускаемой отечественной продукции, как правило, в 2,5...3 раза выше, чем в Европе и США, что дает основание рассматривать российский потенциал энергосбережения как огромный, пока не используемый должным образом ресурс экономического и социального развития, сосредоточенный во всех сферах практической деятельности.

Структура потребителей электроэнергии в России выглядит примерно следующим образом: электроприводы — 60 %, электрический транспорт — 9 %, электротермия и электротехнология — 10 %, освещение и прочие потребители — 21 %. По данным европейских экспертов стоимость электроэнергии, потребляемой ежегодно средним двигателем в промышленности, в 5 раз превосходит его собственную стоимость. Очевидно, что за время службы двигателя (десять лет) энергетическая составляющая несоизмеримо выше составляющей, связанной с капитальными затратами, в связи с чем забота об оптимизации именно энергетической составляющей является особенно важной.

Современный уровень развития силовой электроники, микропроцессорных систем управления и контроля, теории и средств автоматического регулирования позволяет широко использовать эти теоретические и технические достижения для решения задач энерго- и ресурсосбережения. Современные преобразователи частоты обеспечивают качество регулирования скорости асинхронных двигателей (АД), не уступающее приводам постоянного тока. Хорошо известные преимущества

асинхронного короткозамкнутого двигателя, такие как высокая надежность, меньшая стоимость, простота изготовления и эксплуатации в сочетании с обеспечиваемыми в настоящее время высокими регулировочными и динамическими показателями превращают асинхронный частотно-регулируемый электропривод в доминирующий тип регулируемого электропривода, массовое применение которого позволяет решать не только технологические задачи, но и проблему энергосбережения.

Промышленность поднимается из кризиса, и сейчас требуется большое количество электроэнергии. Это возможно обеспечить двумя путями:

- вводом новых генерирующих мощностей;
- удовлетворением требований промышленности за счет энергосбережения.

Первый путь связан с большими капитальными вложениями и большим сроком ввода этих мощностей, что тормозит развитие промышленности. Второй путь можно обеспечить путем внедрения регулируемого электропривода с энергосберегающими асинхронными двигателями. Если вопросу энергосбережения при внедрении регулируемого электропривода уделяется достаточное внимание, то вопросу создания специальных энергосберегающих АД, работающих в составе электропривода, внимания практически не уделяется. А ведь именно в АД происходят основные потери электрической энергии, возникающие при работе электропривода. Поэтому требуется разработка новых подходов к совершенствованию АД, предназначенных для регулируемого электропривода.

Целью данной работы является совершенствование асинхронных двигателей для регулируемого электропривода с учетом их экономической эффективности.

Постановка задачи исследования

Асинхронный электродвигатель, как электро-механический преобразователь энергии, является основным устройством, входящим в состав электропривода. Объекты нашего внимания – АД с короткозамкнутым ротором. Происходящие экономические изменения определили необходимость совершенствования АД и определили новые направления их разработки. Основным направлением совершенствования стандартных АД является повышение энергоэффективности [1].

Энергоэффективность АД характеризуется уровнем КПД (η) и коэффициентом мощности ($\cos\varphi$). В Европейском сообществе и Российской Федерации в 2000 г. были приняты нормы на КПД АД. Евронормы СЕМЕР для двух- и четырехполюсных АД мощностью от 1,1 до 90 кВт предусматривают три уровня КПД: нормальный – EFF3; повышенный – EFF2 и высокий – EFF1 (EFF – efficiency class) [1]. Нормы EFF2 и EFF1 частично приведены в [1]. К уровню EFF3 относят значение КПД ниже уровня EFF2. Нормы ГОСТ Р 51677-2000 охватывают двигатели всех полюсностей в диапазоне мощности от 1,1 до

400 кВт. Они предусматривают два уровня КПД, которые практически совпадают с уровнями Евронорм СЕМЕР (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics): нормальный EFF2 и повышенный EFF1.

В последнее время появилось новое направление в создании энергосберегающих АД – это проектирование АД с большими, по сравнению с базовыми машинами, массогабаритными показателями, которое и реализовано в данной работе. Для создания энергосберегающих АД для работы в системе регулируемого электропривода возможны следующие пути их проектирования [2]:

- без изменения поперечной геометрии при изменении длины сердечников статора и ротора;
- без изменения поперечной геометрии при изменении длины сердечников статора и ротора, а также изменении обмоточных данных машины;
- с изменением поперечной геометрии статора и ротора.

В работе были рассмотрены два первых способа проектирования энергосберегающих АД. Для расчетов использовалась математическая модель оценки экономической эффективности при проектировании АД. Она охватывает основные этапы проектирования АД, такие как электромагнитный [3] и тепловой расчеты машины [4], также включает в себя экономический расчет, позволяющий оценить оптимальность спроектированной машины на стадии проектирования. Математическая модель оценки экономической эффективности может быть использована для расчетов любых АД средней мощности общепромышленного исполнения. Любой из этапов расчета может быть выполнен отдельно, также на любом из этапов возможна корректировка. Преимуществом математических моделей является, прежде всего, то, что они исключают физический эксперимент.

Исходными параметрами приняты поперечная геометрия базовых машин: внешний и внутренний диаметры статора и пазовые зоны, характеристики применяемых активных, изоляционных и конструктивных материалов. Ограничивающими факторами расчета являлись коэффициент заполнения паза и нагрев обмотки статора. Для расчета тепловой картины машины использовался метод тепловых схем, основанный на широком использовании тепловых сопротивлений, которые соединяются в тепловую сеть, имитирующую реальные пути передачи тепловых потоков в машине. Метод тепловых схем получил наиболее широкое распространение ввиду простоты и достаточной точности расчета [4]. В АД средней мощности используется изоляция с классом нагревостойкости F, обладающим предельно допустимым превышением температуры частей электрической машины 100 °С, при температуре газообразной среды +40 °С и высоте над уровнем моря не более 1000 м. Так как статор АД в установившемся режиме является наиболее нагретой частью электрической машины, то в качестве выходного параметра теплового расчета принято

значение среднего превышения температуры обмотки статора (Θ_m). Значение среднего превышения температуры обмотки статора позволяет ориентировочно судить о надежности спроектированной электрической машины. Общеизвестно, что превышение рабочей температуры изоляции на 5...10 °С снижает ее долговечность в 2 раза.

В качестве выходных параметров математической модели оценки экономической эффективности приняты энергетические характеристики: КПД и коэффициент мощности, а также экономические показатели, такие как приведенные затраты Z_m на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию двигателя за нормативный срок окупаемости и годовые затраты на активные потери электроэнергии C_a для технико-экономического обоснования выбора оптимального варианта

$$Z_m = C_o + \sum_{i=1}^{t_n} (C_a)_i,$$

где C_o – полная себестоимость двигателя; C_a – годовые затраты на активные потери электроэнергии; t_n – нормативный срок окупаемости,

$$C_o = C_m + C_{tr} + C_{вн},$$

где C_m – затраты на материалы; C_{tr} – трудовые затраты; $C_{вн}$ – внепроизводственные расходы,

$$C_a = \Pi_a t K P_2 \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right),$$

где Π_a – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; t – число часов работы двигателя в год; K – коэффициент загрузки; P_2 – полезная мощность на валу двигателя; η – КПД двигателя при действительной нагрузке.

Критерием экономической эффективности при выборе наилучшего варианта служат наименьшие приведенные затраты Z_m на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию двигателя за нормативный срок окупаемости [5, 6]. Кроме того, принимается во внимание предварительная стоимость двигателя $\Pi_{\text{двиг}}$, которая учитывает полную себестоимость двигателя, а также норму прибыльности ρ_n предприятия производителя

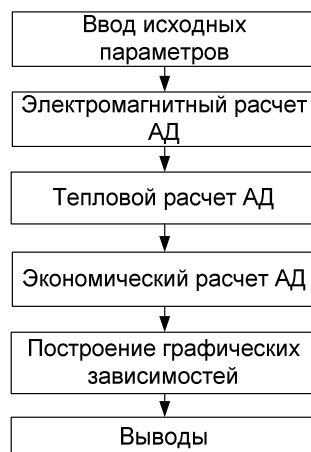


Рис. 1. Алгоритм расчета экономической эффективности АД

$$\Pi_{\text{двиг}} = C_o (1 + \rho_n).$$

Алгоритм расчета экономической эффективности АД показан на рис. 1.

Задача моделирования заключается в том, чтобы, руководствуясь заданными геометрическими размерами машины определить экономическую эффективность при ее эксплуатации и принять решение о целесообразности реализованного направления совершенствования АД.

Анализ результатов моделирования

Для моделирования были взяты АД с короткозамкнутым ротором АИР112М2, АИР112М4. АИР112М4 был выбран, как наиболее распространенный АД со стабильными параметрами при изготовлении, а АИР112М2 чаще всего используется в жилищно-коммунальном хозяйстве. В качестве путей проектирования энергосберегающих АД, использованных в данной работе, можно выделить следующие:

- увеличение длины сердечников статора и ротора (l) без изменения числа витков обмотки статора (w_1);
- увеличение длины сердечников статора и ротора и уменьшение числа витков обмотки статора.

Изменение длины сердечников статора и ротора машины было взято в диапазоне от 100 до 130 % от базовой длины, а изменение числа витков обмотки статора – от 100 до 85 % от базового значения.

На рис. 2 представлены зависимости комплексного показателя эффективности представляющего собой произведение коэффициента мощности и КПД спроектированных двигателей при изменении обмоточных данных и длины сердечников статора и ротора. Как видно из рисунков, при увеличении массы АД происходит улучшение энергетических показателей за счет уменьшения электрических потерь, приходящихся на обмотку статора и ротора. При этом комплексный показатель эффективности оказывается выше, чем у базового двигателя для вариантов с одновременным изменением числа витков в обмотке фазы статора и длины сердечников статора и ротора. Наилучший комплексный показатель эффективности получается при уменьшении числа витков в обмотке фазы статора на 10 % от базового значения.

На рис. 3 представлены зависимости годовых затрат на активные потери электроэнергии в зависимости от длины сердечников статора и ротора при изменении числа витков в обмотке фазы статора. За счет улучшения энергетических показателей происходит снижение годовых затрат на активные потери электроэнергии, которые являются основной статьей расходов при эксплуатации АД. Наименьшее значение активных потерь электроэнергии получается при уменьшении числа витков в обмотке фазы статора на 15 % от базового значения.

На рис. 4 представлены зависимости приведенных затрат на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию АД за нормативный срок окупаемости

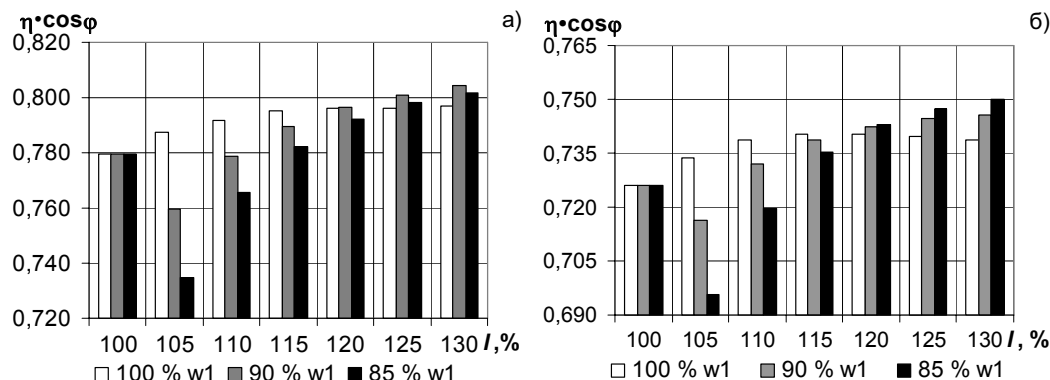


Рис. 2. Комплексный показатель эффективности $\eta \cdot \cos\phi$ в зависимости от длины сердечников статора и ротора при изменении числа витков в обмотке фазы статора для: а) АИР112М2; б) АИР112М4

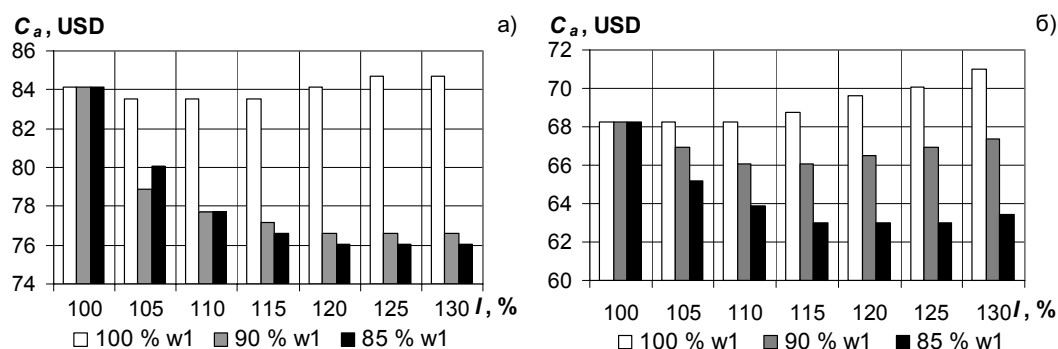


Рис. 3. Годовые затраты на активные потери электроэнергии в зависимости от длины сердечников статора и ротора при изменении числа витков в обмотке фазы статора для: а) АИР112М2; б) АИР112М4

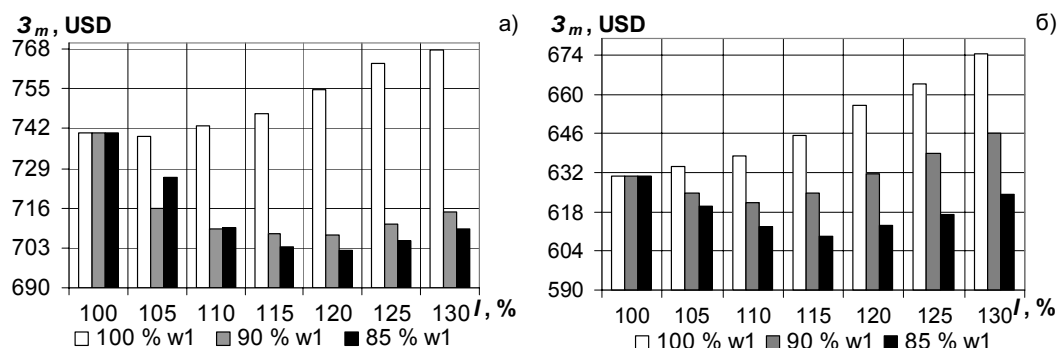


Рис. 4. Приведенные затраты на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию асинхронного двигателя за нормативный срок окупаемости в зависимости от длины сердечников статора и ротора при изменении числа витков в обмотке фазы статора для: а) АИР112М2; б) АИР112М4

при изменении обмоточных данных и длины сердечников статора и ротора. Приведенные затраты на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию двигателя за нормативный срок окупаемости и годовые затраты на активные потери электроэнергии получаются минимальными при уменьшении числа витков обмотки фазы статора на 15 %. Снижение приведенных затрат на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию АД за нормативный срок окупаемости происходит за счет снижения годовых затрат на активные потери электроэнергии. При этом минимальные значения приведенных затрат приходятся на варианты расчета при одновременном изменении длины сердечников и числа витков в обмотке фазы статора.

На рис. 5 представлены зависимости стоимости короткозамкнутого АД при изменении обмоточных данных и длины сердечников статора и ротора. Как и ожидалось, АД оказывается несколько дороже своего аналога за счет увеличения затрат на материалы, которые являются основными расходами, включаемыми в себестоимость, а также за счет роста трудовых затрат. Рост стоимости АД происходит линейно; связано это с тем, что затраты на материалы растут пропорционально увеличению длины сердечников. Но некоторое увеличение стоимости АД за счет увеличения расхода активных материалов компенсируется за счет уменьшения годовых затрат на активные потери электроэнергии.

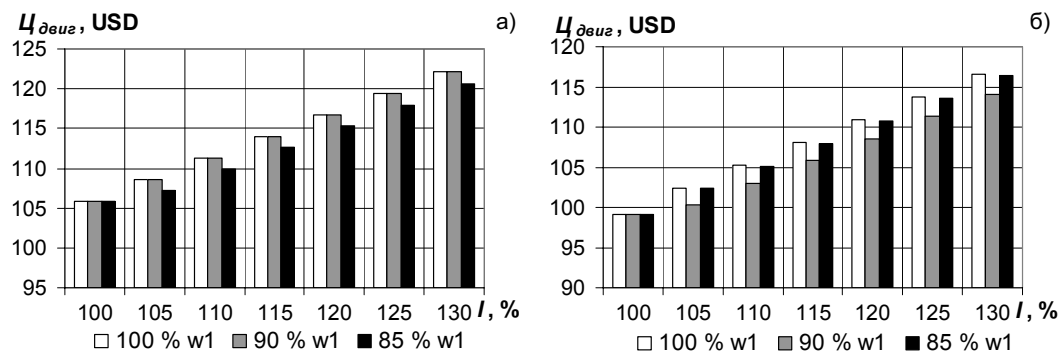


Рис. 5. Стоимость короткозамкнутого АД в зависимости от длины сердечников статора и ротора при изменении числа витков в обмотке фазы статора для: а) АИР112М2; б) АИР112М4

Заключение

Реализация предложенного направления совершенствования АД для регулируемого электропривода, связанного с увеличением массогабаритных показателей АД, позволяет спроектировать машину, обладающую улучшенными энергетическими характеристиками и меньшими затратами, приходящимися на срок эксплуатации. При этом лучшие энергетические показатели получаются при одновременном изменении длины сердечников и числа витков в фазе обмотки статора. Спроектированные АД обладают энергетическими показателями, которые соответствуют повышенному уровню КПД согласно Еuronormам CEMEP EFF2 и нормальному уровню КПД согласно ГОСТу Р 51677-2000.

Энергетические показатели оказываются выше для варианта расчета при уменьшении числа витков сердечников статора на 10 % при относительном значении длины сердечников 125 %, а приведенные затраты на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию двигателя за нормативный срок окупаемости и годовые затраты на активные потери электроэнергии ниже для варианта при уменьшении числа витков в обмотке фазы статора на 15 % и относительном значении длины сердечников 115 %. Это ещё раз подтверждает тот факт, что оптимальный асинхронный двигатель должен выбираться для конкретных условий эксплуатации.

Улучшенные энергетические характеристики позволяют уменьшить затраты, приходящиеся на

срок эксплуатации, что компенсирует увеличение стоимости асинхронного двигателя. Минимальное значение приведенных затрат на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию асинхронного двигателя за нормативный срок окупаемости получается при уменьшении числа витков в обмотке фазы статора на 15 % и относительном значении длины сердечников 115 %, таким образом, спроектированные двигатели являются более выгодными с экономической точки зрения.

Стоимость асинхронного двигателя для любого варианта расчета оказывается выше, чем у аналога, за счет увеличения расхода активных материалов, а также роста трудовых затрат. Но некоторое увеличение стоимости спроектированного асинхронного двигателя компенсируется уменьшением затрат, приходящимся на срок эксплуатации для вариантов расчета с уменьшенным числом витков в обмотке фазы статора. Анализ результатов моделирования показывает, что увеличение длины сердечников свыше 115...120 % от базовой длины нецелесообразно.

В дальнейшем предполагается реализация направления совершенствования АД, связанного с проектированием энергосберегающих АД при изменении поперечной геометрии статора и ротора. Это позволит перейти на высокий уровень КПД согласно Еuronormам CEMEP EFF1 и повышенный уровень КПД согласно ГОСТу Р 51677-2000. Однако для этого потребуются проведение дополнительных научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липатов Ю.А. Энергосбережение: реальность и перспективы // Приложение к журналу «ТЭК и ресурсы Кузбасса». – 2005. – № 2. – С. 22–25.
2. Муравлев О.П., Муравлева О.О., Тютеева П.В. Асинхронные двигатели как основа энергосберегающих технологий в регулируемом электроприводе // Актуальные проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий: Труды Всеросс. научно-техн. конф. с международным участием. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ – УПИ, 2006. – С. 286–291.
3. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.
4. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
5. Асинхронные двигатели общего назначения / Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
6. Муравлева О.О., Усачева Т.В. Оценка экономической эффективности при изготовлении асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 186–189.

Поступила 22.09.2006 г.