

С. Е. ДЗЕНИС, главный конструктор, ПАО «ЭЛЕКТРОМАШИНА», Харьков

ПУТИ СНИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ПОДШИПНИКАХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При проектировании серий энергоэффективных двигателей способом повышения энергоэффективности двигателя является снижение всех видов потерь, в том числе механических потерь. В статье выполнен анализ потерь в подшипниках различных конструктивных исполнений и различных производителей, и смазках, описаны способы снижения механических потерь в подшипниках электродвигателей, даны рекомендации для практического конструирования. Приведены результаты испытаний двигателей с применением рекомендованных подшипников и смазок.

Ключевые слова: Проектирование асинхронных трехфазных электродвигателей, короткозамкнутый ротор, энергоэффективные электродвигатели, механические потери, потери в подшипниках.

Введение. Как известно, механические потери составляют достаточно весомый процент постоянно действующих потерь, которые практически не зависят от нагрузки. Поэтому снижение механических потерь является одним из инструментов проектирования энергоэффективных электродвигателей. Использование данного пути проектирования сдерживается несовершенством методик расчета механических потерь, которые носят полуэмпирический характер, и дают результаты вычислений с невысокой степенью точности, и недостаточным количеством данных о механических потерях серийных подшипников и смазок.

Анализ основных достижений. По имеющимся сведениям, механические потери в подшипниках электродвигателей общепромышленных серий не являлись ранее предметом отдельных пристальных исследований. При проектировании, задачи минимизации механических потерь ставились только для высокооборотных электродвигателей (20 000 и более об/мин.) [1], где в качестве эффективной меры борьбы с механическими потерями рекомендовалась замена подшипников качения на лепестковые или электромагнитные опоры [2]. Однако, подобные меры не применимы к общепромышленным электродвигателям, имеющим частоту вращения 3000 об/мин и менее, в силу конструктивных особенностей подобных опор, а так же с точки зрения достижения окупаемости энергоэффективных электродвигателей. С этой же точки зрения, нецелесообразно и выполнение иногда встречающихся рекомендаций [3] по применению подшипников более высокого класса точности, которые имеют более высокую стоимость, как самих подшипников, так и более высокие требования к посадочным и привалочным поверхностям подшипниковых узлов, что в свою очередь также увеличивает трудоемкость изготовления и себестоимость изделия. Таким образом, для проектирования общепромышленных энергоэффективных

© С. Е. Дзенис, 2014

двигателей, необходим поиск решений и разработка рекомендаций, позволяющих эффективно снизить механические потери в подшипниках, избегав при этом значительного удорожания стоимости изготовления подшипниковых узлов двигателей и подшипников, с целью получения экономического эффекта от внедрения энергоэффективных двигателей при производстве и эксплуатации.

Материал исследований. Как известно, механические потери зависят от частоты вращения вала электродвигателя и являются тем большими, чем выше частота вращения вала. Также, в общем случае, потери зависят от типоразмера подшипника, конструкции подшипника и подшипникового узла, применяемой смазки. Для выработки путей снижения механических потерь, был выполнен анализ потерь в электродвигателях отрезка в.о.в. 63-132, различных заводов производителей России, Украины и Белоруссии.

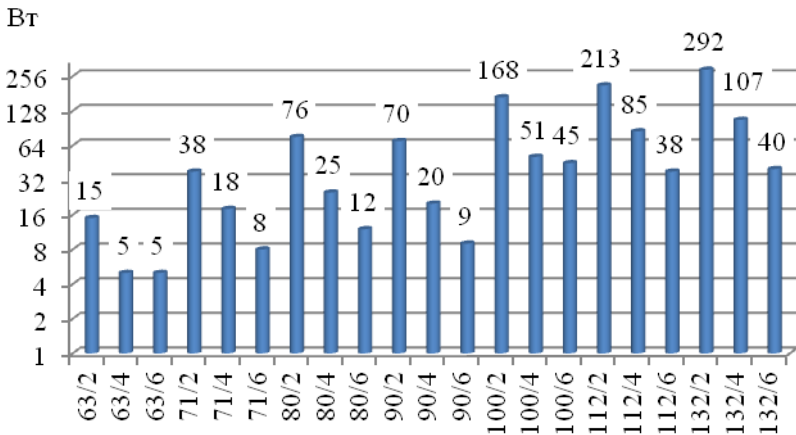


Рис.1 – Усредненные величины механических потерь в электродвигателях в.о.в. 63-132 с числом пар полюсов $2p=2,4,6$.

На рис.1 наглядно видна зависимость величины механических потерь от частоты вращения вала двигателя. Кроме этого анализ рис.1 позволяет предположить, что для двигателей с $2p=2,4$ снижение механических потерь является актуальной задачей, для реализации которой, выполнен более детальный анализ механических потерь в подшипниках и в вентузах на примере типопредставителя электродвигателя АИР80. Ниже приведены усредненные потери в двигателях с $2p=2, 2p=4, 2p=6$, полученные в результате испытаний электродвигателей производства заводов России, Украины и Белоруссии. Испытания и разделение потерь в электродвигателях проводились согласно требованиям стандарта ИЕС 60034-30-2. Образцы для испытаний были приобретены в оптовой и розничной продаже, и считались типовыми представителями серии, имеющими стабильные технические

показатели, учитывая то, что производство данных электродвигателей освоено и выпуск соответствует объему выпуска среднесерийного производства.

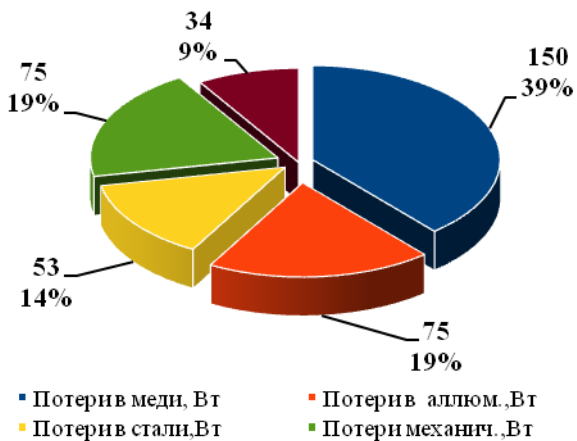


Рис. 2 – Типовое распределение потерь в АИР 80А2.

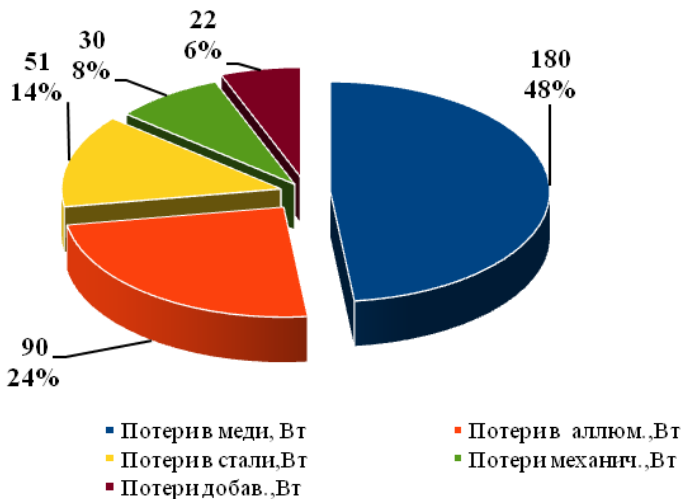


Рис. 3 –Типовое распределение потерь в АИР 80А4

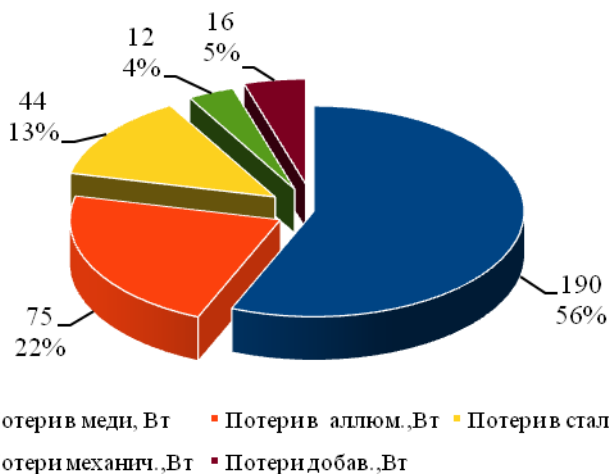


Рис. 4 – Типовое распределение потерь в АИР 80А6.

Как видно из диаграмм, приведенных на рис. 2-4, механические потери составляют значительную величину для двигателей $2p=2$, а именно до 19% всех потерь, что больше потерь в стали и сопоставимо с потерями в алюминиевой клетке ротора. Меньшую, но весомую величину механические потери составляют для двигателей $2p=4$, где они сопоставимы с потерями в сердечнике статора. Механические потери в двигателях $2p=6$ являются самыми меньшими из всех видов потерь для шестиполюсных двигателей, их величина незначительна и вряд ли представляют интерес с точки зрения практического повышения КПД двигателя.

Ниже приведены данные показывающие разделение механических потерь в подшипниковых узлах и вентиляционном узле.

Как видно из рис.5 доля механических потерь в подшипниках двигателей $2p=2,4$ превалирует над долей потерь на вентиляцию, для двигателей $2p=6$ потери на вентиляцию превышают потери в подшипниках. Снижение потерь в вентиляционных узлах двигателей связано с необходимостью проведения ряда сложных аэродинамических расчетов, и последующей экспериментальной проверкой расчетных данных, что является специфической и весьма трудоемкой задачей. Анализ фактического распределения соотношения механических вентиляционных потерь и механических потерь в подшипниках дает необходимые исходные данные для проведения работ по сокращению потерь в подшипниках.



Рис.5 – Усредненные данные разделения потерь в подшипниковых и вентиляционных узлах АИР 80А с числом пар полюсов $2p=2,4,6$.

Кроме этого, следует учесть так же то, что ряд европейских и китайских ученых занимающихся проблемами энергоэффективности двигателей высказывают предложения связанные увеличением диаметра и габаритов электродвигателя [4], что повлечет увеличение теплоотводящей поверхности, и уменьшение других видов потерь. Что в конечном итоге может привести к отказу от конструктивного использования вентиляционных узлов[5], по крайней мере, для шестиполюсных двигателей.

Эти, а также другие, вышеописанные соображения, заставляют сконцентрировать внимание на вопросах уменьшения механических потерь в подшипниках двух и четырех полюсных двигателей, как на действенном средстве повышения энергоэффективности, которое наряду с другими мероприятиями, которые не рассматриваются в данной статье, позволяют достигать старших уровней энергоэффективности по стандарту IEC 60034-30.

Результаты исследований. Для выполнения исследований был выбран экспериментальный способ определения величины механических потерь в подшипниках, по причине того, что известные традиционные аналитические методы расчета механических потерь в подшипниках дают результаты значительно отличающиеся от результатов, полученных при проведении испытаний двигателя в сборе, и еще более отличающиеся от результатов измерения механических потерь на трение шарикоподшипников по методике ВНИПП РМ №3-85. Кроме того, данные методики ориентированы в основном для расчетов открытых подшипников, работающих в масляной ванне [6], как правило, в методиках не учитывается влияние типа смазки и конструкции

подшипника, при применении этих методов для расчетов закрытых подшипников с пластическими смазками, они дают результаты, значительно отличающиеся от данных эксперимента. Существуют методики разработанные ведущими компаниями- производителями подшипников, например SKF, учитывающие множество факторов, в том числе, смазки и конструкцию подшипников. Расчеты по данным методикам дают гораздо лучшую сходимости результатов эксперимента и расчетов, однако все же имеют значительные расхождения с результатами экспериментов.

При определении механических потерь в подшипниках собранного электродвигателя пренебрегали потерями на трение ротора об воздух и потерями в уплотнениях двигателя. Испытуемые двигатели не имеют механических уплотнений по линии вала, и соответственно данный вид потерь отсутствует, потери от трения об воздух минимальны т.к. электродвигатели серии АИР имеют скорости вращения 3000 об/мин. и менее, двигатели имеют лакокрасочное покрытие на поверхности ротора, а также имеют неразвитую корону ротора, не содержащую лопаток или других выступающих элементов.

Целью проведения испытаний являлось определение фактических механических потерь на трение серийно изготавливаемых шарикоподшипников с различными типами смазок, перезакладываемыми в подшипник.

Испытания проводились над партией подшипников из 10 шт., и первоначально испытывались подшипники с одинаковой смазкой. Из общего числа подшипников показавших стабильные потери, отбирались по 3 образца подшипников, в которые последовательно перезакладывались несколько видов смазок, и проводились измерения механических потерь на трение с перезаложеной смазкой.

Измерение механических потерь на трение шарикоподшипников, производилось по методике ВНИИПП РМ №3-85, основанной на замере усилия удержания от проворота наружного кольца подшипника, при вращении внутреннего кольца с постоянной частотой равной 3000 об/мин. В случае получения неоднозначных результатов испытаний, проводились повторные испытания нового образца аналогичного подшипника.

Для проведения испытаний были закуплены серийно изготавливаемые шарикоподшипники радиальные однорядные, типоразмера 6204, со следующими исполнениями:

- открытого типа;
- с одной защитной шайбой (*_Z*);
- с двумя защитными шайбами (*_2Z*);
- двухсторонним уплотнением (*_2RS*).

Потери определялись при частоте вращения внутреннего кольца подшипника 2850 об/мин., при температуре приблизительно равной $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Ввиду большого объема экспериментальных данных, ниже приводятся только окончательные результаты для подшипников 6204ZZ.

Следует отметить, что наибольшие потери, при испытаниях с одинаковыми смазками имеют подшипники с двумя уплотнениями (RS), наименьшие потери имеют подшипники открытого типа, при этом потери подшипников с одной защитной шайбой (Z) имеют потери на 10-15 % выше, чем подшипники открытого типа. Также подшипники, имеющие одну защитную шайбу несколько дороже, чем полностью открытые, но значительно дешевле подшипников с уплотнениями.

При испытанных подшипников различных фирм производителей, а именно VBF (ЗАО «Вологодский подшипниковый завод»), АО «ХАРП», KINEX (Словакия), KG (КНР), NSK (Япония), SKF (Швеция), FAG (Германия) были получены следующие результаты для подшипников в различных конструктивных исполнениях и с одинаковыми смазками (см. рис.6), где на примере подшипников 6204ZZ показаны величины механических потерь в подшипниках различных производителей.

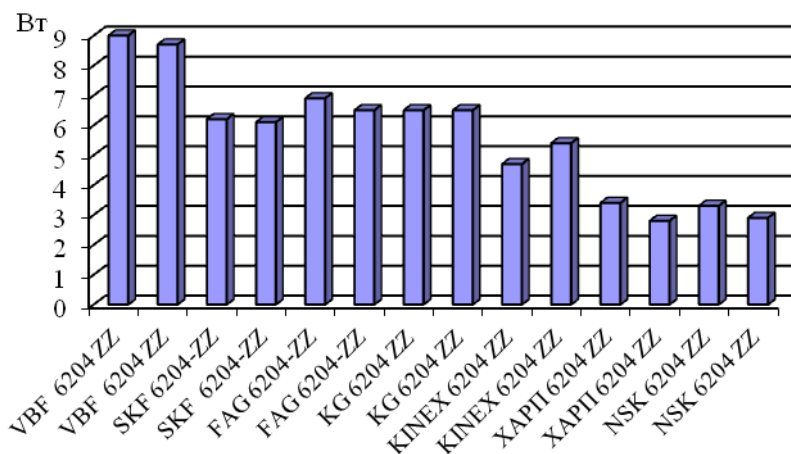


Рис.6 – Величины механических потерь в подшипниках 6204ZZ.

Из которых, меньшими потерями обладают подшипники производства ХАРП, KINEX, NSK. Сходные результаты получены для подшипников других исполнений.

Учитывая стоимость подшипников предназначенных для применения в общепромышленных электродвигателях, дальнейшие эксперименты продолжены с подшипниками, имеющими как наименьшие потери, так и наименьшую стоимость. На образцах подшипников производства ХАРП проводилось дальнейшее определение потерь в смазках.

Типы смазок испытываемых подшипников указаны на рис.7, на котором можно видеть результаты испытаний. Эксперименты проводились с применением смазок АЗМОЛ (Украина), TOTAL (Франция).

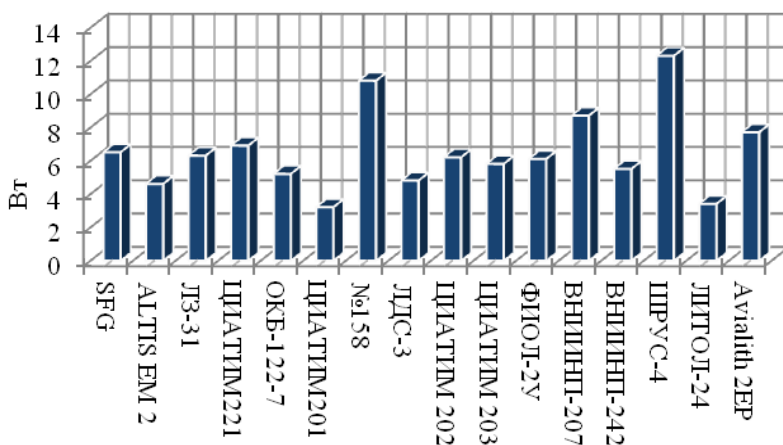


Рис. 7 – Механические потери в подшипниках 60204Z (производства ХАРП) с различными смазками по результатам испытаний

Из рис.7 видно, что наименьшие потери, из ряда смазок традиционно используемых для закладки в подшипники электродвигателей, имеют смазки ЛИТОЛ-24, ЦИАТИМ-221. Данные смазки имеют разные температурные диапазоны применения и могут быть рекомендованы для различных климатических исполнений электродвигателей.

Из смазок имеющих рабочий температурный диапазон от -40...+120 или близкий к этому, наименьшие потери имеет смазка ЛИТОЛ-24(в среднем 3,4 Вт). Для смазок имеющих рабочий температурный диапазон -60...+120 и близкий к нему наименьшие потери имеет смазка ЦИАТИМ-221(в среднем 7,2 Вт). Смазка ЛЗ-31, традиционно применяемая для заполнения подшипников.

Из смазок имеющих рабочий температурный диапазон от -40...+120 или близкий к этому, наименьшие потери имеет смазка ЛИТОЛ-24(в среднем 3,4 Вт). Для смазок имеющих рабочий температурный диапазон -60...+120 и близкий к нему наименьшие потери имеет смазка ЦИАТИМ- 221 (в среднем 7,2 Вт). Смазка ЛЗ-31, традиционно применяемая для заполнения подшипников общепромышленных серий электродвигателей с рабочим температурным диапазоном от -40...+120 имеет усредненные потери 6,3 Вт.

Подшипники 6204.2RS со смазкой ЛЗ-31 применяемые в серии общепромышленных электродвигателей имеют механические потери 30-35 Вт.

Экспериментальное подтверждение возможности применения в подшипниковых узлах электродвигателей подшипников 6204Z со смазками ЛИТОЛ-24, ЦИАТИМ-221, показало, что механические потери подшипниках в двухполюсного электродвигателя, значительно сократились и составили 9-10Вт, тогда как на серийном образце такого двигателя эти потери составляли 30Вт.

Следует отметить, что механические потери в подшипниках, установленных в электродвигатель, возросли примерно в 1,5 раза, что объясняется уменьшением радиального зазора в подшипниках при посадке на вал и в подшипниковые щиты, а также возникающими, за счет влияния допусков деталей, угловыми перекосами. Для проверки корректности выработанных рекомендаций был изготовлен образец электродвигателя АИР71 А2, с установленными в нем подшипниками 6204Z с заложенной смазкой ЛИТОЛ-24 и смазкой ЦИАТИМ-221. Данный электродвигатель прошел электрические, климатически испытания, испытания на степень защиты. По результатам испытаний на степень защиты и климатических испытаний было подтверждено соответствие двигателя требованиям к серийным электродвигателям серии АИР.

Таблица 1 – Сравнение механических потерь в серийном двигателе и модернизированном

	Серийный электродвигатель АИР71А2 с подшипниками 6204.2RS и смазкой ЛЗ-31	Образец АИР71А2 с подшипниками 6204.Z и смазкой ЛИТОЛ-24
Суммарные механические потери, Вт	41	19
Механические потери в вентиляционном узле, Вт	10	10
Механические потери в подшипниковых узлах, Вт	31	9

По результатам электрических испытаний было установлено, что доля суммарных механических потерь уменьшена на 53,6 %, и соответственно суммарные потери двигателя снизились с 220 Вт до 198Вт, что увеличило к.п.д. двигателя на 0,018 о.е. (с 0,773 до 0,791 о.е.).

Выводы.

1. Снижение механических потерь для двухполюсных двигателей является эффективным средством для повышения кпд. Для четырехполюсных двигателей – снижение механических потерь возможно но, малоэффективно, для шести полюсных двигателей уменьшение механических потерь не окажет значительного влияния на повышение энергоэффективности двигателя.

2. Смазки и подшипники, применяемые в подшипниках общепромышленных серий, не являются оптимальными, с точки зрения механических потерь.

3. Кроме общеизвестных зависимостей потерь в подшипниках от типоразмера подшипника, конструкции подшипникового узла, ширины дорожек, диаметра тела вращения подшипника, потери так же в значительной мере зависят от типа уплотнения подшипника и типа заложённой в подшипник смазки.

4. Значительной экономии можно добиться, применяя подшипники с одной защитной шайбой, что позволяет легко наполнять подшипник смазкой, создать условия для выхода лишней смазки из подшипника, избежать применения лабиринтных уплотнений со стороны полости статора электродвигателя.

5. Снижение механических потерь в подшипниках возможно без удорожания и увеличения класса точности подшипников и ужесточения требования по точности посадочных и привалочных поверхностей. Учитывая, что стоимость подшипников с одной защитной шайбой, ниже чем стоимость подшипников с 2-мя уплотнениями, стоимость смазок сопоставима, не требуется затрат на применение лабиринтных колец, класс точности подшипника не изменяется, то можно утверждать, что снижение механических потерь в подшипниках может быть достигнуто без удорожания изготовления двигателя.

При реализации данных рекомендаций в конструкциях энергоэффективных двигателей, дальнейшее снижение механических потерь в двигателях общепромышленной серии возможны за счет модернизации вентиляционных узлов.

Список литературы: 1. Прусаков А.С., Румянцев М.Ю. "Высокоскоростные электрокомпрессоры на основе вентиляльных двигателей на подшипниках с газовой смазкой, Московский энергетический институт", uCoz. uCoz, 2014. [web]. 24 июня 2014 <http://foil-bearing.ru/publ/vysokoskorostnye_ehlektrokompressory_na_osnove_ventilnykh_dvigatelej_na_podshipnikakh_s_gazovoj_smazkoj/1-1-0-3>. 2. М.Е. Захарова, М.Ю. Румянцев, С.И. Сигачев, А.В. Сизякин. "Применение высокоскоростных электротурбомашин малой мощности на летательных аппаратах", uCoz. uCoz, 2014. [web]. 26 июня 2014 <http://foil-bearing.ru/publ/primenenie_vysokoskorostnykh_ehlektroturbomashin_maloy_moshhnosti_na_letatelnykh_apparatakh/1-1-0-23>. 3. Муравлева О.О., Углянюк В.В. "Проектирование энергоэффективных асинхронных двигателей." Научно-техническая библиотека. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. [web]. 28 июня 2014 <www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2011/K04/114060.pdf>. 4. John Petro "Cost-effective construction of high efficiency motors", Join Reserch centre Institute for Energy and Transport(IET),European Commission 2014. [web]. 29 июня 2014 <<http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/publication/6th-international-conference-eemods-09-energy-efficiency-motor-driven-systems-vol-1>>. 5. Daniel Liang, Yang Xu, Yu Jiabin, Victor Zhou, Wang Qin, "Recent developments in copper rotor motors in china", Join Reserch centre Institute for Energy and Transport(IET),European Commission 2014. [web]. 28 июня 2014 <<http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/publication/6th-international-conference-eemods-09-energy-efficiency-motor-driven-systems-vol-1>>. 6. Ануриев В.И., Справочник конструктора машиностроителя. –М.:, Машиностроение, 2001. – No2, 91с.

Bibliography (transliterated): 1. Prusakov A.S., Rumjancev M.Ju. "Vysokoskorostnye jelektrokompressory na osnove ventil'nyh dvigatelej na podshipnikah s gazovoj smazkoj, Moskovskij jenergeticheskij institut", uCoz. uCoz, 2014. [web]. 24 ijunja 2014 <http://foil-bearing.ru/publ/vysokoskorostnye_ehlektrokompressory_na_osnove_ventilnykh_dvigatelej_na_podshipnikah_s_gazovoj_smazkoj>.

bearing.ru/publ/vysokoskorostnye_ehlektrokompresory_na_osnove_ventilnykh_dvigatelej_na_podshipnikakh_s_gazovoj_smazkoj/1-1-0-3>. **2.** M.E. Zaharova, M.Ju. Rumjancev, S.I. Sigachev, A.V. Sizjakin. "Primenenie vysokoskorostnyh jelektroturbomashin maloju moshhnosti na letatel'nyh apparatah", uCoz. uCoz, 2014. [web]. 26 ijunja 2014 <http://foil-bearing.ru/publ/primenenie_vysokoskorostnykh_ehlektroturbomashin_maloju_moshhnosti_na_letatelnykh_apparatakh/1-1-0-23>. **3.** Muravleva O.O., Ugljanjuk V.V. "Proektirovanie jenergojeffektivnyh asinhronnyh dvigatelej." Nauchno-tehnicheskaja biblioteka. Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij universitet, Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij universitet. [web]. 28 ijunja 2014 <www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2011/K04/114060.pdf>. **4.** John Petro "Cost-effective construction of high efficiency motors", Join Reserch centre Institute for Energy and Transport(IET),European Commission 2014. [web]. 29 ijunja 2014 <<http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/publication/6th-international-conference-eemods-09-energy-efficiency-motor-driven-systems-vol-1>>. **5.** Daniel Liang, Yang Xu, Yu Jiabin, Victor Zhou, Wang Qin, "Recent developments in copper rotor motors in china", Join Reserch centre Institute for Energy and Transport(IET),European Commission 2014. [web]. 28 ijunja 2014 <<http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/publication/6th-international-conference-eemods-09-energy-efficiency-motor-driven-systems-vol-1>>. **6.** Anur'ev V.I., Spravochnik konstruktora mashinostroitelja. – M.:, Mashinostroenie,2001. – No2, 912c.

Надійшло (received) 24.08.2014



Дзенис Сергей Евгеньевич
ПАО «ЭЛЕКТРОМАШИНА», главный конструктор,
г. Харьков.
E-mail: s_dzenis@rambler.ru