

УДК 621.311.245

Шевченко Валентина Владимировна, канд. техн. наук, доц., профессор кафедры электрических машин;
e-mail: zurbagan@mail.ru, тел (+38) 050-407-84-54

Горюшкин Никита Игоревич, магистр кафедры электрических машин;
e-mail: goryushkinnikita@gmail.com, тел. (+38) 097-818-47-52

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Лизан Игорь Ярославович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры охраны труда и экологической безопасности. e-mail: mail-korpus1@yandex.ru, тел. (+38) 099-764-97-34

Учебно-научный профессионально-педагогический институт Украинской инженерно-педагогической академии, г. Артемовск, Донецкой обл., Украина, ул. Артема, 5, г. Артемовск, Донецкой обл., Украина, 84500

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ЗАМЕНЕ МАТЕРИАЛА ОБМОТКИ РОТОРА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИХ УЛУЧШЕНИЮ

В статье проанализированы вопросы изменения геометрии зубцовой зоны ротора асинхронного двигателя, которые необходимо выполнить при изменении материала обмотки ротора, с целью обеспечения достаточных пусковых характеристик и сохранения энергетических показателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, ротор, форма паза ротора, медная обмотка, алюминиевая обмотка

Шевченко Валентина Володимирівна, канд. техн. наук, доц., професор кафедри електричних машин;
e-mail: zurbagan@mail.ru, тел (+38) 050-407-84-54

Горюшкін Микита Ігоревич, магістр кафедри електричних машин;
e-mail: goryushkinnikita@gmail.com, тел. (+38) 097-818-47-52

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

Лизан Ігор Ярославович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри охорони праці і екологічної безпеки.
e-mail: mail-korpus1@yandex.ru, тел. (+38) 099-764-97-34

Учбово-науковий професійно - педагогічний інститут Української інженерно-педагогічної академії,
м. Артемівськ, Донецька обл., Україна, вул. Артема, 5, м. Артемівськ, Донецька обл., Україна, 84500

ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ ЗАМІНІ МАТЕРІАЛУ ОБМОТКИ РОТОРА І ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ЇХ ПОЛІПШЕННЯ

У статті проаналізовані питання зміни геометрії зубцевої зони ротора асинхронного двигуна, які необхідно виконати при зміні матеріалу обмотки ротора, з метою забезпечення достатніх пускових характеристик і збереження енергетичних показників.

Ключові слова: асинхронний двигун, ротор, форма паза ротора, мідна обмотка, алюмінієва обмотка

Shevchenko V.V., Ph.D., docent, professor the department of electrical machines;
e-mail: zurbagan@mail.ru, tel. (+38) 050-407-84-54

Goryushkin N.I., master - student the department of electrical machines,
e-mail: goryushkinnikita@gmail.com, tel. (+38) 097-818-47-52

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002

Lisan I.Y., Ph.D., docent, docent the department of occupational and environmental safety,
e-mail: mail-korpus1@yandex.ru, tel. (+38) 099-764-97-34

Educational Researcher professional pedagogical institute Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy,
Artemovsk, Donetsk region, Ukraine, str. Artem, 5, Artemovsk, Donetsk region, Ukraine, 84500

A COMPARISON OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR CHARACTERISTICS WITH SQUIRREL CAGE BY REPLACING THE MATERIAL OF THE ROTOR WINDING AND SUGGESTIONS FOR IMPROVEMENT

Have been analyzes the questions of the changes the geometry toothed zone asynchronous motor rotor, that must be done when changing the material of the rotor winding. It is noted that the use of the asynchronous generator with wound cast copper rotor winding instead of cast aluminum winding, is not a problem. But for motors with rotor copper windings should conduct additional studies to ensure acceptable starting characteristics and conservation of energy indicators. It was found that the deepening of rotor slot by 15 % will lead to increased influence of crowding out current and will provide for the asynchronous motor with a copper rotor winding same starting characteristics, which

have been the engine with aluminum one. The results were obtained under the condition of conservation cross-sectional area of the groove, i.e. copper consumption and cost.

Keywords: asynchronous motor, rotor, the shape groove of the rotor winding, copper winding, aluminum winding.

Введение

В настоящее время основным определяющим фактором выбора любого технического решения является оценка его энергоэффективности. Для принятия решения об изменении технического решения, расчетных параметров любой конструкции должно накопиться и стать возможным для использования достаточное количество инноваций в рассматриваемой и сопутствующих отраслях. Следует отметить целый ряд новых возможностей, которые можно использовать при проектировании современных электрических машин:

- новые материалы (новые марки электротехнических сталей, изоляционные материалы);

- новые технологии, которые были ранее недоступны (например, возможность выполнения литой медной обмотки короткозамкнутого ротора с обеспечением ее монолитности);

- новые эксплуатационные возможности (например, создание компактных, надежных, дешевых частотных преобразователей на базе нового класса *IGBT* транзисторов. Известно, что последнее значительно расширило области возможного использования асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым (КЗ) ротором, в качестве приводов с частотным управлением).

Использование асинхронных машин (АД) с медной обмоткой ротора, перспективно и в двигательном, и в генераторном режимах. Нарастание экологических проблем, сокращение запасов органического топлива привело к активному развитию энергетики от возобновляемых источников энергии, в частности, ветроэнергетики, которая является наиболее перспективным направлением развития нетрадиционной энергетики в Украине. Проведенные нами исследования, [1–4], показали, что для комплектации ветроэнергетических установок (ВЭУ) в диапазоне мощностей от 20 кВт до 200 кВт рентабельно использовать именно асинхронные генераторы. Актуально проведение работ по достижению в них большего значения КПД, что может быть достигнуто за счет использования в конструкции роторов медной короткозамкнутой обмотки.

Однако, если использование асинхронных генераторов с литой медной обмоткой ротора (ЛМОП), вместо литой алюминиевой (ЛАОР), не вызывает никаких проблем, то использование двигателей с ЛМОП требует дополнительных исследований, особенно в плане обеспечения допустимых пусковых характеристик.

Основная часть

Известно, что АД в момент пуска имеют две проблемы: меньший, чем номинальный, пусковой момент и большой пусковой ток, который может превышать номинальное значение тока в 5–8 раз. Также известно, что увеличение активного сопротивления обмотки ротора в момент пуска позволяет улучшить пусковые характеристики. Если не учитывать эти особенности и не вносить особые решения в конструкцию ротора (глубокий паз для реализации скин-эффекта), то плохие пусковые характеристики могут значительно усложнить возможность использования АД в электроприводах. В современных АД эта проблема фактически решена, но решена для АД с ЛАОР.

Для АД низкого напряжения уже с 1999 года действуют европейские правила, регламентирующие показатели энергетической эффективности. Согласно этим требованиям АД классифицируются по трем категориям: низкая, средняя и высокая. Эти соглашения, основанные на принципах энергосбережения и экологических требованиях, связанных с ужесточением современных требований к охране окружающей среды (*ISO 14001 standard*), требуют создания новых серий высокоэффективных двигателей. Средством достижения этой цели может быть применение новых современных материалов и инновационных технологий.

В соответствии с принятой ЕС и США (федеральный закон «Эраст») классификацией, значительная часть выпускаемых в Украине АД относится к низкому классу энергетической эффективности *EFF3* и уступает по массогабаритным показателям аналогам дальнего зарубежья. Такое положение снижает экспортные возможности Украины и конкурентоспособность на внешнем рынке. Необходимо добиваться для отечественных двигателей повышения коэффициента полезного действия (КПД).

На сегодняшний день можно выделить четыре основных направления развития технологий повышения энергоэффективности за счет минимизации потерь в асинхронных электроприводах, установленных в производстве [1]:

1) на этапе подготовки производства следует проводить подбор оборудования с минимальным запасом по мощности, то есть с номинальной мощностью, соответствующей расчетной мощности реализованных технологических процессов;

2) снижение потерь электрической энергии при ее преобразовании в механическую;

3) рациональное распределение реактивной составляющей потребляемой электрической энергии [2];

4) повышение эффективности использования электроэнергии посредством создания эффективных систем управления питания электроустановок, использования новых материалов (электротехнических сталей, проводниковых и изоляционных материалов) и технологий.

Во всем мире для повышения КПД асинхронных двигателей сейчас используют замену материала «беличьей клетки»: алюминия на медь. Исследования, проведенные в США, Франции, Италии, Германии, Польше, Бразилии, Индии и Корее показали, что применение в АД ЛМОР вместо ЛАОР в значительной степени решает проблемы энергоресурсосбережения. В США реализован проект стоимостью в 2 млн. долларов с целью исследования возможности использования ЛМОР для АД. Было определено, что использование меди приводит к уменьшению потерь в АД, позволяет выполнить его более компактным: уменьшить длину сердечника статора и ротора в АД открытого исполнения на 7,2%, закрытого - на 20% при увеличении КПД на 1,0–3,0%, [1]. Сокращение длины машины позволяет уменьшить расход меди, электротехнической стали и изоляционных материалов, сократить трудоемкость изготовления.

В США работа по внедрению ЛМОР начата в 1997 году Ассоциацией по развитию медных технологий. Для достижения цели Ассоциация объединила усилия экспертов и разработчиков 17 стран мира [2]. Долгое время оставалась нерешенной проблема обеспечения устойчивости литейных форм к эрозии от расплава меди. Промышленное производство рентабельных литейных форм в США для изготовления ЛМОР для АД позволило уже с 2002 года серийно изготавливать АД мощностью от 3 до 200 кВт с повышенным КПД на 1,2–3,2 % [3]. Германская фирма *SEW-Evrodride* с 2003 года поставляет на мировой рынок АД мощностью от 1,1 до 37 кВт, в которых обмотка ротора выполнена из меди литием под давлением. Такие двигатели имеют КПД 94–96 %, что значительно выше норм США («Эраст») и стран ЕС (*Premium Efficiency*), [4]. Аналогичные исследования велись и в других странах, и, начиная с 2004 г., начат серийный выпуск АД с ЛМОР в Италии и Франции, в Бразилии (фирма *WEG*), в Индии (фирма *Coimbatore Tamil Nadu*) и в других странах.

Анализ данных исследований подтвердил, что в случае использования для двигателей с ЛМОР машин, имеющих такие же конструктивные геометрические размеры, как АД с алюминиевой обмоткой, возможно повышение мощности в 1,3–1,7 раза, КПД – на 1,5–3,0 %, перегрузочной способности – в 1,4–1,7 раза, показателей надежности – в 1,5–2,5 раза.

Положительные аспекты использования меди для КЗ роторов очевидны, но необходимо вести оценку влияния изменения материала обмотки на характеристики АД, и, в первую очередь, на пусковые. Для АД с алюминиевой обмоткой вопросы улучшения пусковых характеристик практически решены выбором формы паза ротора, т.е. за счет использования

явления вытеснения тока. Но замена *Al* в «беличьей клетке» на *Cu*, имеющей меньшее удельное сопротивление, требует поиска новых решений для обеспечения допустимых пусковых характеристик, т.к. удельное сопротивление *Cu* при температуре $\theta_a = 20\text{ }^\circ\text{C}$ значительно меньше, чем удельное сопротивление *Al* ($\rho_{Cu} = 0,0175\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, $\rho_{Al} = 0,028\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$).

Для поиска решений необходимо определить конечную цель исследования. Например, пусть стоит задача так спроектировать АД с ЛМОР, чтобы его пусковые характеристики были такими же, как и серийных АД с ЛАОР. Понимая, что при проектировании серийных машин с ЛАОР нужные пусковых характеристики достигалась геометрией (в основном, глубиной) паза ротора, варьирование пусковых характеристик АД с ЛМОР проводим, изменяя глубину паза ротора. При этом необходимо сохранить требования технологического процесса: проведение надежной штамповки листов шихтованного сердечника ротора возможно при значении меньшего радиуса паза $r_{r2} \geq 1\text{ мм}$. Проведем анализ на примере серийного шестипольсного АД с КЗ ротором мощностью 1,5 кВт, с глубиной паза ротора $h_r = 19\text{ мм}$. На рис. 1 приведен эскиз зубцовой зоны ротора, на рис.2 – пусковые характеристики (зависимость тока ротора от скольжения $I_r' = f(S)$) для АД с ЛАОР и с ЛМОР.

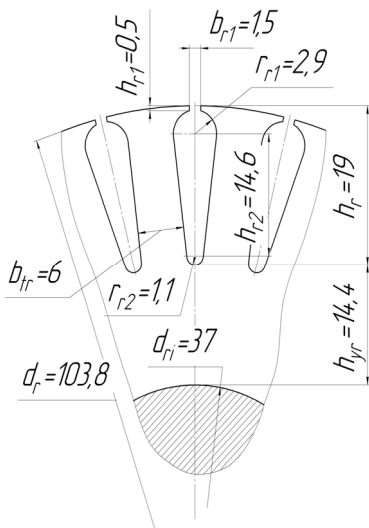


Рис. 1. Эскиз зубцовой зоны ротора АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР

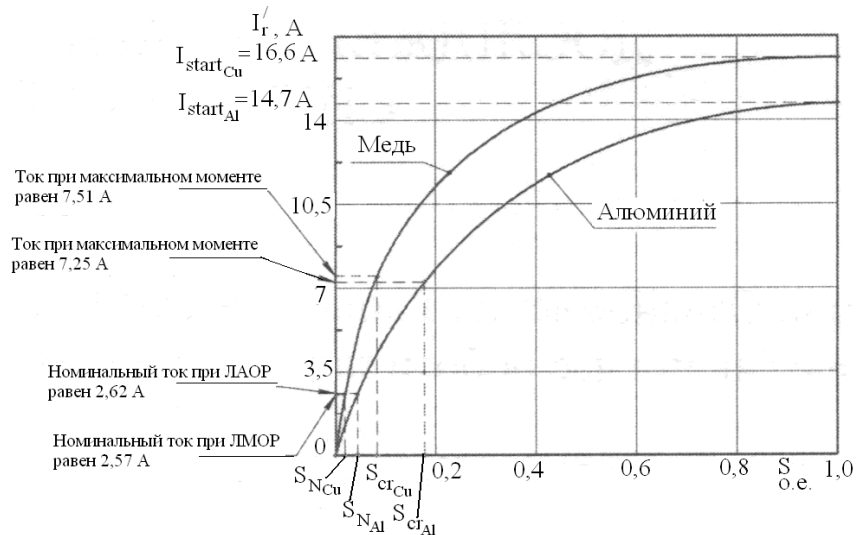


Рис. 2. Зависимость тока ротора от скольжения для АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР

Анализ характеристик позволяет отметить, что превышение пускового тока возросло от 5,6 в АД с ЛАОР до 6,3 в АД с ЛМОР.

На рис. 3 приведены пусковые механические характеристики: зависимость момента ротора от скольжения $M^* = f(S)$ для АД с ЛАОР и с ЛМОР. Анализ этих характеристик показывает, что при использовании медной «клетки» практически в 2 раза уменьшается пусковой момент. Он становится меньше номинального, что делает невозможным прямой пуск АД с ЛМОР с номинальной нагрузкой. Расчет параметров АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР представлен в табл. 1. В табл. 2 приведены данные по перегрузочной способности АД (k_M), указаны «броски» пускового тока (k_{SI}), относительное значение пускового момента по сравнению с номинальным моментом (k_{SM}):

$$k_M = \frac{M_{r\max}}{M_{rN}} ; \quad k_{SI} = \frac{I'_{rstart}}{I'_{rN}} ; \quad k_{SM} = \frac{M_{crit}}{M_{rN}} .$$

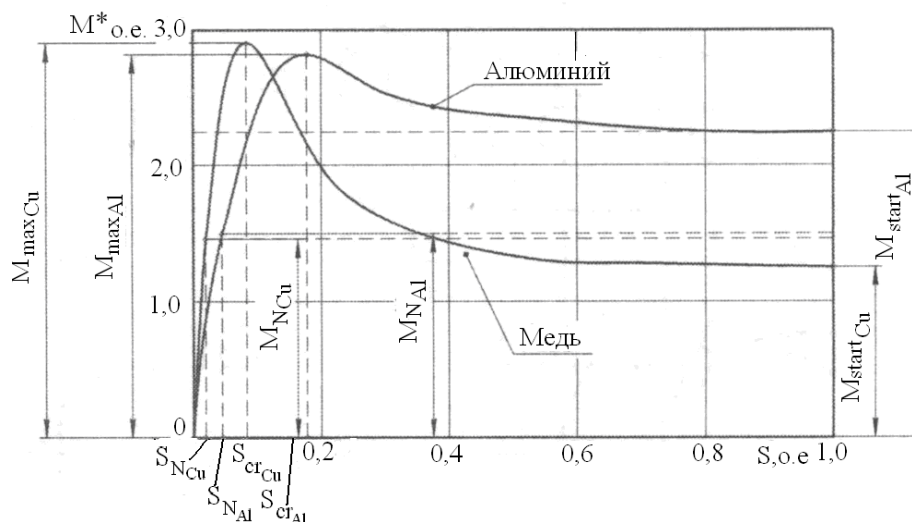


Рис. 3. Зависимость момента ротора от скольжения для АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР

Таблица 1

Некоторые данные АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР

№	h_r , мм	S_r , мм ²	$R_{r0} \cdot 10^{-5}$, Ом		I_{s1} , А		M_{rN} , Н·м		M_{crit} , Н·м		η_N , о.е.		M_{rstart} , Н·м	
			Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu
1	24	72	5,92	2,8	16,9	18,9	15	14,6	28,2	29	0,76	0,79	22,5	12,5
2	23	54,4	7,83	3,71	15,9	18,4	15,2	14,7	28,4	29,2	0,76	0,79	26,3	15,8
3	22	47,3	9,01	4,27	15,4	18,3	15,4	14,8	28,9	29,8	0,75	0,78	29,3	18,6
4	19	34,4	12,4	5,87	14,1	17,7	16	15	29,6	30,5	0,72	0,77	34	24,3

Таблица 2

Значения относительных коэффициентов, рассчитанных для АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР

№	Глубина паза, h_r , мм	k_M		k_{si}		k_{sm}	
		Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu
1	24	1,88	2	5,6	6,3	1,25	1,36
2	23	1,86	2	4,9	5,7	1,73	1,3
3	22	1,88	2,02	3,8	4,7	1,9	1,1
4	19	1,85	2,04	3,4	4,5	2,1	0,83

Расчеты проводились для двигателя с медной и алюминиевой «клетками» и с измененной глубиной паза (h_r). Результаты показали, что при сохранении мощности АД и габаритов:

- номинальный момент (M_{rN}) несколько уменьшается;
- максимальный момент (M_{crit}), а, следовательно, и перегрузочная способность машины, увеличиваются;
- на 3–5 % увеличивается КПД двигателя (η_N);
- в 1,5–1,8 раз уменьшается пусковой момент АД (M_{rstart}).

При уменьшении глубины паза пусковой момент увеличивается и уже при глубине на 3 мм больше (15 %) значение пускового момента в 1,1 выше номинального момента и возможен прямой пуск. В этом варианте сохраняется значение КПД ($\eta_N = 0,79$, табл. 1), несколько снижается «бросок» пускового тока.

На рис. 4 приведено сравнение изменения токов ротора (пусковая характеристика) АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР для двух высот паза ротора: 19 мм и 22 мм (обозначено, как «измененный паз», рис. 5).

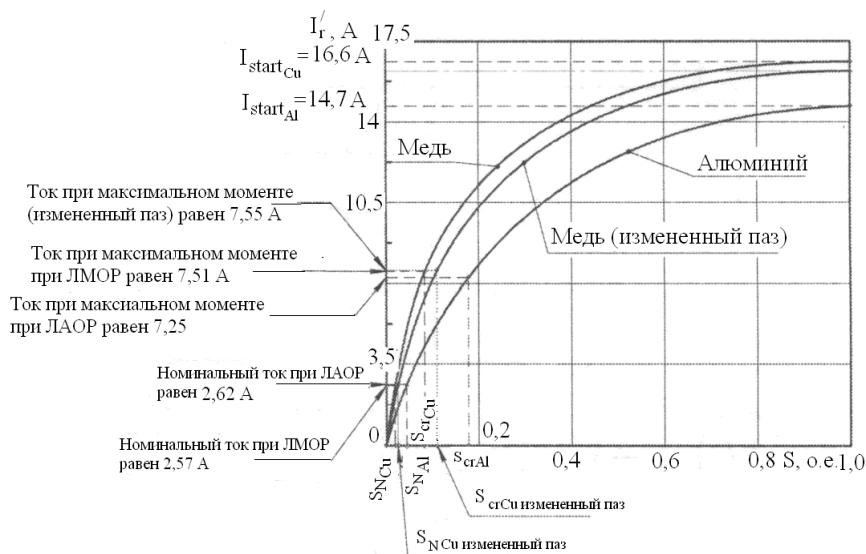


Рис. 4. Зависимость тока ротора от скольжения для АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР для двух глубин паза ротора: 19 мм и 22 мм («измененный паз»)

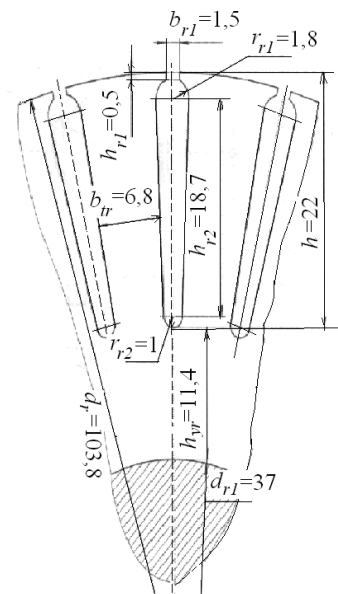


Рис. 5. «Измененный паз» ротора ($h = 22$ мм)

На рис. 6 приведено сравнение изменения моментов ротора (пусковая характеристика) АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР для двух высот паза ротора: 19 мм и 22 мм (см. рис. 1 и рис. 5).

Дальнейшее углубление паза приводит к улучшению пусковых характеристик, но потребует значительного уменьшения радиусов паза ротора и усложнения штамповочного оборудования. При постановке задачи обеспечения возможности прямого пуска двигателя ($M_{rstart} > M_{rN}$) достаточным является углубление паза при замене алюминия на медь на 15 %.

Для принятия окончательного решения об изменении геометрии зубцовой зоны ротора (увеличения глубины паза на 15 %) проанализируем энергетические характеристики АД с ЛАОР и с ЛМОР для двух высот паза ротора: 19 мм и 22 мм («измененный паз») по построенным рабочим характеристикам, рис. 7 и рис. 8. На рис. 8 символом «Cu» обозначены характеристики АД с медной обмоткой ротора (ЛМОР) с глубиной паза 19 мм, значком «"» обозначены характеристики для того же АД с глубиной паза 22 мм.

Анализ рабочих характеристик подтверждает, что увеличение глубины паза ротора на 15 % при замене алюминиевой обмотки ротора на медную, не ухудшает энергетические параметры машины (η и $\cos\phi$). Поэтому можно считать, что такое изменение является достаточным для обеспечения работоспособности двигателя.

Выводы

1. Применение в АД ЛМОР, вместо ЛАОР, соответствует требованиям общемировой политики энергоресурсосбережения: КПД двигателей увеличивается на 3 – 5%. Учитывая нарастающее распространение в качестве регулируемого электропривода АД, замена алюминиевой обмотки ротора на медную является существенным шагом в обеспечении технико-экономической рентабельности организации производства.

2. Замена Al в «беличьей клетке» на Cu, имеющей меньшее удельное активное сопротивление, требует поиска решений обеспечения допустимых пусковых характеристик.

3. Для обеспечения пусковых характеристик АД с медной «клеткой» на уровне таких же показателей, которые были у АД с алюминиевой клеткой, достаточно углубить паз ротора в среднем на 15 %, что приведет к усилению влияния эффекта вытеснения тока.

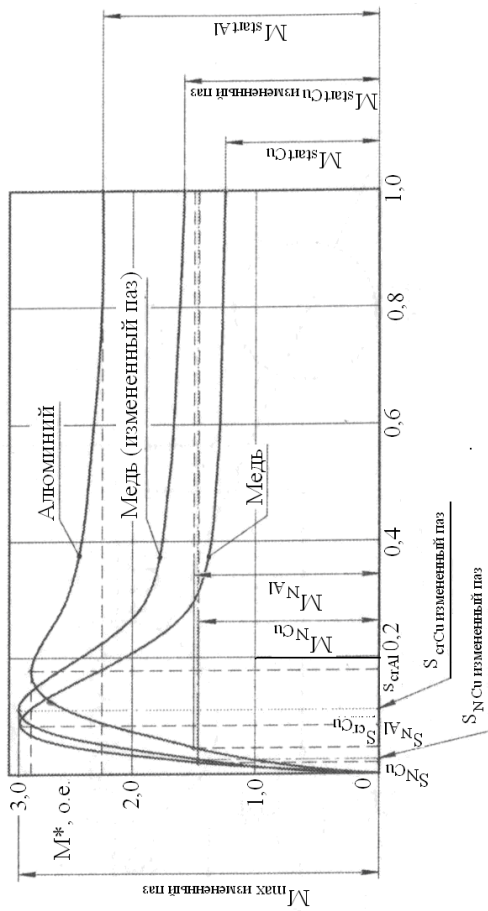


Рис. 6. Зависимость момента ротора от скольжения для АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР для двух высот паза ротора: 19 мм и 22 мм (обозначено, как «измененный паз»)

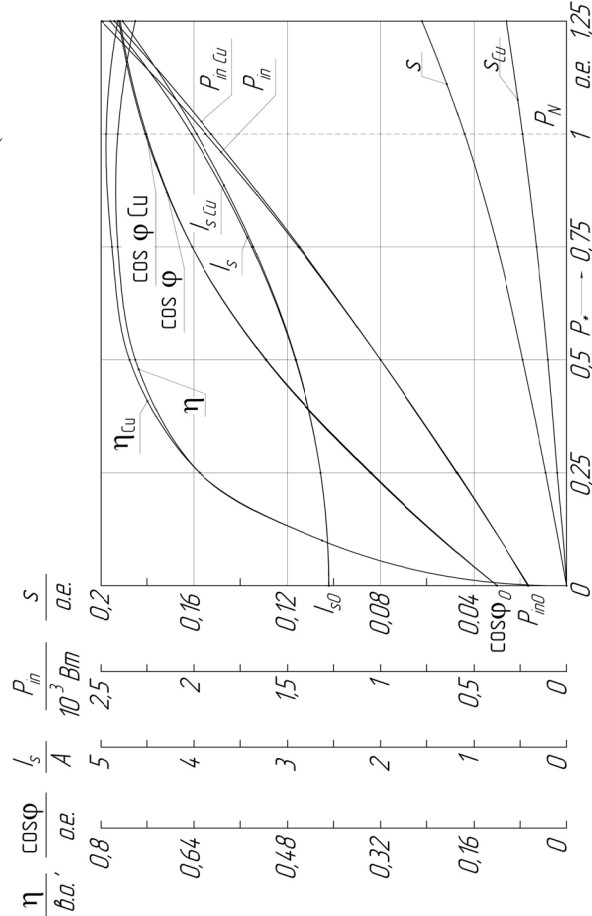


Рис. 7. Рабочие характеристики АД мощностью 1,5 кВт с ЛАОР и с ЛМОР для высоты паза ротора 19 мм

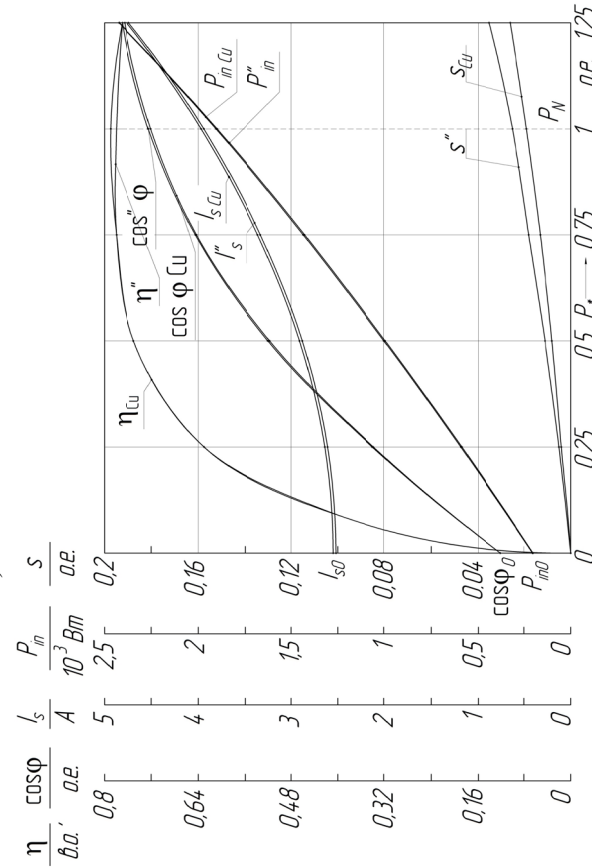


Рис. 8. Рабочие характеристики АД мощностью 1,5 кВт с ЛМОР для двух высот паза ротора: 19 мм и 22 мм

Результаты получены при выполнении условия незначительное изменение штамповочного оборудования, допустимое влияние на технологию штамповки, т.к. не требует значительного уменьшения радиусов пазов ротора, (см. рис. 1 и рис. 5).

Список использованной литературы:

1. Шевченко В. В., Книш С.Ю., Занихайло Е.О. Економічне порівняння вітроенергетичних установок з різними типами електричних генераторів змінного струму // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Харківський університет повітряних сил. – Харків. – 2011. – № 4 (94). – С. 94–98.
2. Шевченко В. В. Оценка технической и экологической перспективы развития энергетики Украины // Якість технологій та освіти. Збірник наукових праць. – Вип. 2. – Харьков, 2011. – С. 19–25
3. Шевченко В. В., Кулиш Я. Р. Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазона мощности // Вісник НТУ «ХПИ». – № 65. – 2013. – С. 107–117.
4. Горюшкин Н. И., Шевченко В. В. Влияние форм лопастей на энергетические параметры ветроэнергетических установок // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Збірник праць XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (15-17 жовтня 2014 р.). – Харків, НТУ «ХПІ». – 350 с. – С. 160.

References:

1. Shevchenko V. V., Knish S. Y., Zanihaylo E. O. Economic comparison of wind turbines with different types of electrical alternators [Ekonomichne porivnyannya vitroenergetichnih installations s riznimi types elektrichnih generatoriv zminnogo Strumu] // Information processing systems. The digest of scientific works. Kharkov Air Force University. – Kharkov. – 2011. – № 4 (94). – P. 94–98.
2. Shevchenko V. V. The Assessment of the technical and environmental perspectives of energy development in Ukraine [Ocenka tehnichej i jekologicheskoj perspektivy razvitija jenergetiki Ukrainy] // The quality of technology and education. The digest of scientific works. – Edition 2. – Kharkov, 2011 – P. 19–25.
3. Shevchenko V. V., Kulish Y. R. The possibility analysis of using different types of generators for wind turbines with the power range [Analiz vozmozhnosti ispol'zovaniya raznyh tipov generatorov dlja vetrojenergeticheskikh ustanovok s uchetom diapazona moshhnosti] // Bulletin of NTU "KPI". – № 65. – 2013. – P. 107–117.
4. Goryushkin N. I., Shevchenko V. V. The influence of the blades shapes on the wind turbines energy parameters [Vlijanie form lopastej na jenergeticheskie parametry vetrojenergeticheskikh ustanovok] // Information technology, science, engineering, technology, education, health: Collection of works of the XXII International Scientific Conference. – Part II. – (2014, October, 15–17) – Kharkov, NTU "HPI" . – P. 160

Поступила в редакцию 04.11 2014 г.