

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ

Чувашев В.А., к.т.н., Папазов Ю.Н., к.т.н., Чуванков В.Ю.  
Украинский НИИ взрывозащищенного и рудничного электрооборудования (УкрНИИВЭ)  
Украина, 83052, Донецк, ул.50-й Гвардейской дивизии, 17,  
тел: (062)348-18-94, факс: (062)382-93-52, e-mail: vach@list.ru

Паршиков А.М., д.т.н., профессор  
Донецкий национальный университет  
Украина, 83055, Донецк, ул. Университетская, 24, кафедра "Международная экономика"  
тел/факс: (062)338-42-54, e-mail: Parshikov@DonNU.Donetsk.ua

Велков А.А.  
Донецкий институт социального образования  
Украина, 83015, Донецк, ул. Университетская, 4,  
тел: (0622)94-00-41

*Аналізуються результати робіт по створенню асинхронних двигунів з литою мідною обмоткою ротора в Україні, США, Франції, Італії, Німеччині, Польщі, Бразилії і Індії. Испити показали, що двигуни мають більш високий коефіцієнт корисної дії при більшій корисній потужності в порівнянні з аналогом.*

*Анализируются результаты работ по созданию асинхронных двигателей с литой медной обмоткой ротора в Украине, США, Франции, Италии, Германии, Польше, Бразилии и Индии. Испытания показали, что двигатели имеют более высокий коэффициент полезного действия при большей полезной мощности в сравнении с аналогом.*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Программой "Українське вугілля" предусмотрено увеличение подземной добычи угля с 80 до 110 млн. т в 2010 году и до 125 млн. т к 2030 году [1]. Существенное повышение угледобычи возможно только за счет увеличения нагрузки на действующие угольные горизонты. Эта задача может быть решена путем совершенствования горной техники и повышения ее энерговооруженности.

Основным элементом электропривода горной техники являются взрывозащищенные асинхронные двигатели (ВАД). Увеличение их мощности, вращающего момента (в том же габарите), эффективности и надежности является условием роста дальнейшей производительности горных машин. Эта задача по актуальности выдвигается на первый план. В настоящее время, когда источники финансирования значительно сокращены, повышение эффективности ВАД возможно путем усовершенствования их проектирования и применения новых, нетрадиционных путей повышения их технического уровня.

Согласно прогнозам к 2015 году тарифы на электроэнергию по сравнению с действующими возрастут в 3,7 раза, поэтому проблема повышения энергетических показателей ВАД – коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) – является частью национальной программы энергосбережения [2].

Угольная промышленность Украины является одной из энергоемких отраслей экономики, поэтому главным направлением энергосбережения остается снижение суммарных и удельных затрат на добычу и транспортировку угля.

### АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Исследования, проведенные в США, Франции, Италии, Германии, Польше, Бразилии, Индии показали, что применение в асинхронных двигателях (АД) литой медной короткозамкнутой обмотки (ЛМКО) ротора вместо литой алюминиевой короткозамкнутой обмотки (ЛАКО) в значительной степени решает проблемы энерго-ресурсосбережения.

В США с 1997 г. действует федеральный закон ЕРАСТ, устанавливающий минимальный уровень эффективности АД, импортируемых в страну как непосредственно, так и в составе машин и механизмов. Согласно закону поставка двигателей с КПД ниже установленного облагается большими штрафами. В настоящее время все производимые в США двигатели соответствуют ЕРАСТ [3]. В 1999 г. Европейский Союз (ЕС) также принял классификацию АД по значению КПД. В соответствии с этой классификацией, начиная с 2000 г., вводятся три класса КПД: нормальный – EFF3, повышенный – EFF2, высокий – EFF1 [3]. Цель указанных классов эффективности – улучшить энергетическую эффективность промышленности. В 1998 г. 80% новых двигателей, отгруженных в ЕС, оставались еще в низшем классе – классе EFF3. Задача состояла в том, чтобы в 2003 г. только 20% двигателей было в низшем третьем классе.

Первые отечественные ВАД врубных машин 30-х годов XX века были изготовлены с медными стержневыми обмотками в форме глубокого паза. Обычно они выходили из строя после 3...4 месяцев эксплуатации. Двигатели добычных комбайнов также имели роторные обмотки в виде уложенных в пазы медных стержней (двигатели типа МД) или стержней

из сплавов цветных металлов (двигатель типа "Самсон") и приваренных к ним медных колец. Ряд фирм за рубежом и сейчас выпускает ВАД с подобными обмотками, так как у них отсутствует технология изготовления медных обмоток роторов методом литья.

Попытки использовать медь вместо алюминия для литья обмоток короткозамкнутых роторов АД в отечественной практике были предприняты ещё в 1937 году (ХЭМЗ, г. Харьков). Технология была весьма трудоёмкой и сложной и, кроме того, был высокий процент брака.

В 1967 году Л. Шетке (США) сообщил как о новейшем достижении в области литья из медных сплавов о том, что фирмой Т.Т. Castelli (Италия) отлиты из меди под давлением короткозамкнутые обмотки роторов для АД мощностью 1 кВт. Двигатель с таким ротором имел меньшие размеры по длине (в 2 раза) при той же мощности по сравнению с АД с ЛАКО [4]. Следует отметить, что способ литья не описан, данных о серийном выпуске нет.

В 1970 году ВНИИТЭлектромаш совместно с УкрНИИВЭ осуществил заливку медью экспериментальной партии обмоток роторов АД мощностью 2,2 кВт. Но серийное производство этих АД не освоено.

Проблемы заливки медью обмоток сердечников роторов обусловлены, главным образом, ее низкой жидкотекучестью, весьма активным взаимодействием с воздушной средой и литейной формой. Роторы имеют, как правило, большую длину, что при заливке может сопровождаться снижением электропроводности меди при введении компонентов для повышения ее жидкотекучести, а также чревато образованием литейных дефектов. В силу этих причин долгое время попытки организовать производство ВАД с ЛМКО ротора были неудачными.

Таким образом, предпринимались попытки освоения ЛМКО, как правило, на АД малых габаритов и с массой заливаемой меди до 3 кг. Вместе с тем, в связи с необходимостью внедрения энергосберегающих технологий добычи полезных ископаемых, интерес к ЛМКО ротора мощных АД возрастает. Поэтому в последние годы подобные исследования активизировались: создаются новые сплавы, в том числе с высокой электропроводностью, совершенствуется технология плавки и заливки обмоток роторов медью [5]. В США работу по внедрению литых медных обмоток инициировала в 1997 году Ассоциация по развитию "медных" технологий (Copper Development Association, CDA). Для достижения цели Ассоциация объединила усилия экспертов и разработчиков – Международной медной ассоциации (International Copper Association), Технологического института холодильной техники и кондиционеров (Air Conditioning and Refrigeration Technical Institute), фирмы Formcast, Inc. Денвер, шт. Колорадо с участием Министерства энергетики США. Были опробованы разные материалы для замены стали при изготовлении форм. Наиболее перспективными признаны никелевые сплавы INCONEL 617 (Special Metals Corporation, Хеннингтон, шт. Зап. Вирджиния) и Nicel Alloy 230 (Haynes International, Кокомо, шт. Индиана) [6]. Длительное время оставалась нерешенной проблема обеспечения стой-

кости литейных форм против эрозии ее расплавом меди. Но в последние годы в США, Франции, Германии и Италии освоено производство рентабельных литейных форм для изготовления медных литых обмоток роторов АД. Это позволило в США в 2002 году изготовить АД мощностью от 3 до 200 кВт, в т.ч. методом кокильного литья под давлением было отлито 140 роторов АД мощностью от 3 до 19 кВт [7].

Испытания АД (7 роторов с ЛМКО) мощностью 15 л.с. (11,2 кВт) при числе полюсов  $2p=4$  показали, что их КПД составил  $90,7 \pm 0,1\%$ , т.е. увеличился на 1,2% по сравнению с обмотками ротора, залитыми алюминием. При этом потери мощности в обмотке уменьшились в среднем на 40% (составили 157 вместо 261 Вт), а добавочные потери (измеренные) – на 23% (со 137 до 105 Вт). Механические потери (вентиляционные и на трение ротора о воздух) уменьшились на 37% (со 115 до 72 Вт) за счет более качественных медных отливок, не имеющих на своей поверхности "крылышек"; при этом обдув лобовых частей обмотки статора осуществлялся специальными вентиляторами на валу. Потери в обмотке статора при медной и алюминиевой обмотках ротора были неизменными (507 Вт), а потери в стали – 286 Вт. В результате общие потери уменьшились на 179 Вт (1127 вместо 1306 Вт), т.е. на 14%. Уменьшение потерь дает экономию электроэнергии 1600 кВт·ч в год при работе в продолжительном режиме непрерывно.

В двигателях с ЛМКО ротора произошло снижение  $\cos \phi$  с 0,815 до 0,79 (при заливке медью двухклеточных пазов ротора серийного АД) и скольжения с 2,22 до 1,37%, т.е. за счет увеличения частоты вращения соответственно возрастает нагрузка. Температура обмотки статора снизилась на 5°C, что способствует увеличению ресурса изоляции.

Моментные характеристики АД с ЛМКО (при таких же пазах, как у роторов с алюминиевой обмоткой) уменьшились: а) начальный пусковой момент – на 6%; б) момент трогания (динамический) – на 36%; в) максимальный момент – на 17%.

Однако авторы отмечают, что таких значений достаточно в связи с тем, что у АД с ЛАКО ротора значения указанных моментов были существенно завышены. Длина сердечников статора и ротора АД с ЛМКО была уменьшена в открытом исполнении на 7,2%; в закрытом – на 20%.

У АД мощностью 25 л.с. (18,5 кВт) с ЛМКО при испытании потери в обмотке ротора снизились на 40 %, общая сумма потерь – на 23%; температура обмотки – на 29°C.

Испытания АД различной мощности показали, что потери в обмотках с ЛМКО уменьшились на 40...58% по сравнению с алюминиевой обмоткой. В табл. 1 приведены предельные значения КПД, достигнутые различными исследователями США при применении ЛМКО ротора в АД с  $2p=4$  [7].

По расчетам специалистов США переход на ЛМКО роторов АД только в США позволит сэкономить 75...122 млрд. кВт·ч электроэнергии в год [6]. Помимо этого применение меди в обмотке ротора позволит выполнить АД более короткими и умень-

шить расход меди в статоре. Это дает экономию меди 90000 т в США и до 500000 т в мире [7].

Таблица 1  
Значения КПД двигателей с ЛМКО ротора  
в АД различной мощности

$P_2$ , кВт	КПД, %	Повышение КПД по сравнению с алюминиевой обмоткой ротора, %	Снижение потерь, %
3,0	86,4	3,2	19,0
7,5	86,5	1,5	10,0
11,2	90,7	1,2	11,4
18,5	92,5	1,6	17,6
30	90,1	1,3	11,6
90	92,8	1,4	16,3
200	93,0	1,0	12,5

Германская фирма SEW-Evrodribe в 2003 году выпустила на рынок отрезок серии АД мощностью от 1,1 до 37 кВт, в которых обмотка ротора выполнена из меди литьем под давлением. Такие двигатели имеют КПД 94...96%, что значительно выше, чем требования норм США (EPACT) и стран ЕС (Premium Efficiency) [8].

Специалисты Германского института меди (Deutsche Kupferinstitut, DKI) опубликовали результаты расчетов, которые показывают, что при применении АД низшего класса эффективности доля энергозатрат недооценивается. Стоимость израсходованной за год электроэнергии, потребляемой АД класса EFF3 в 5 раз превышает стоимость самого двигателя [6]. Таким образом, относительно дорогие АД классов EFF1 и EFF2 отличаются более высокой эффективностью.

В Италии и Франции в 2004 году проведены исследования АД с ЛМКО ротора мощностью 3,5; 7,5 и 15 кВт в комбинации с электротехнической сталью высшего качества (с удельными потерями 3,5 Вт/кг и высокой магнитной проницаемостью). Результаты исследований подтвердили существенное увеличение их КПД [9, 10].

Можно также отметить достижения в этом направлении фирм WEG (Бразилия) и Индии.

В Индии АД с ЛМКО ротора мощностью от 1,5 до 5,5 кВт были изготовлены шестью заводами. Эксплуатационные испытания этих АД были проведены в приводе насосов перекачки воды и в текстильной промышленности. Часовой расход электроэнергии при замене алюминиевой обмотки ротора АД на медную снизился в среднем с 1,95 до 1,68 кВт·ч. Это дало ежегодную экономию 2365 кВт·ч и снижение стоимости электроэнергии на 265 долл. США.

Стоимость АД с ЛМКО ротора составляла 167,08 долл. США, что на 10,35% выше, чем АД с алюминиевой обмоткой ротора. Срок окупаемости дополнительных вложений средств в высокоэффективный АД с ЛМКО ротора составляет всего 230 дней.

Таким образом, эксплуатационные испытания АД с ЛМКО ротора в США, Франции, Италии, Германии, Польше, Бразилии и Индии подтвердили предположение, что улучшенные технические характеристики и сбережения электроэнергии являются следствием использования АД нового поколения и,

что срок окупаемости более дорогого двигателя очень короткий [11].

Помимо экономии электроэнергии и материалов повышение КПД позволяет уменьшить выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу. В Великобритании АД потребляют около 43% всей электроэнергии и при ее производстве в атмосферу выбрасывается около 100 млн. т  $\text{CO}_2$ . Применение АД с ЛМКО ротора позволит уменьшить выброс  $\text{CO}_2$  на 3 млн. т. Для всей Европы экономия составила бы 1 млрд. ф.ст. и уменьшение выброса  $\text{CO}_2$  на 20 млн. т. Эта работа специалистов университета Кембриджа получила Королевскую премию по разделу "Охрана окружающей среды" [12].

Правительство Германии ратифицировав Киотский протокол, взяло на себя обязательство сократить выбросы "парниковых" газов до 2005 г. на 25% по сравнению с 1990 г. Существенный вклад в решение этой ответственной задачи должны внести энергоэффективные АД, применение которых позволит сократить ежегодное потребление энергии в Германии на 18,7 ТВт·ч и соответственно выбросы углекислого газа – на 11 млн.т. Если учитывать то обстоятельство, что каждый киловатт-час, сэкономленный электродвигателем, экономит 3 кВт·ч первичной электроэнергии (так как КПД производства и передачи электроэнергии составляет в среднем 33%), то вклад энергоэффективных электродвигателей может составить до 2,7 ТВт·ч или около 200 млн. евро.

#### ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Обобщить мировой опыт создания энергоэффективных асинхронных двигателей, определить достигнутый уровень энергетических показателей и пути дальнейшего их совершенствования.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проблему заливки обмоток роторов ВАД медью в УкрНИИВЭ решали с 70-х годов прошлого столетия. Необходимость в таких ВАД была обусловлена тем, что при разработке крепких и вязких горных пород и угля ВАД с ЛАКО ротора оказались **недостаточно эффективными**: имели недостаточную мощность в ограниченных габаритах, низкую перегрузочную способность и энергетическую эффективность, что, в конечном счете, сказывалось на долговечности, показателях надежности, приводило к росту стоимости единицы добываемой горной массы. Наличие провалов-"седел" в механической характеристике создавало вероятность "застревания" ВАД на промежуточной частоте вращения и, как следствие, приводило к выплавлению короткозамкнутой обмотки.

В связи с этим возникла **необходимость** в разработке нового недорогого технического решения для снятия вышеперечисленных проблем. В УкрНИИВЭ пошли по пути **замены алюминия на медь**. Было принято решение, и оно в дальнейшем оправдалось, создавать АД с ЛМКО ротора. Понадобился целый комплекс расчетно-теоретических и экспериментальных исследований для достижения этой цели. Одним из **перспективных направлений** явилась оптимизация формы и геометрических размеров паза ротора с функцией цели по **минимизации за-**

**трат** в производстве и эксплуатации АД нового поколения. Следует отметить, что такая работа проведена по всему ряду ВАД мощностью от **1,1 до 400 кВт только в УкрНИИВЭ.**

Уже первые опытные образцы комбайновых ВАД типа ЭКВ4-160 с ЛМКО ротора показали, что их технические характеристики (при  $U=660$  В, частоте тока 50 Гц и превышении температуры обмотки статора  $145^{\circ}\text{C}$  при классе нагревостойкости изоляции  $H$ ) существенно превышают аналогичные показатели ВАД со стержневыми обмотками роторов (табл. 2). Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что все показатели у ВАД с ЛМКО ротора лучше, чем с другими видами обмоток ротора.

Таблица 2  
Технические характеристики ВАД типа ЭКВ4-160 с различными обмотками роторов

Технические характеристики	Обмотка ротора		
	алюминиевая литая	медная стержневая	медная литая
Мощность в режиме S1, кВт	160	172	193
Мощность в режиме S4 (ПВ=60%; 30 пуск. в час; FJ=4), кВт	183	202	269
Максимальный вращающий момент, Н·м	2940	3918	4097
Пусковой вращающий момент, Н·м	2600	2800	2800
Номинальное скольжение, %	2,6	2,1	1,13
КПД, %	91,0	92,1	92,9
cosφ	0,81	0,83	0,85

Впервые в промышленных условиях ЛМКО ротора была применена в 1985 году в электродвигателях ЭКВ4УС2 и ЭВ5УС, установленных в приводе струговых установок УС2 и УС3. При проведении эксплуатационных испытаний ВАД в ш/у "Холодная балка-3" (г. Макеевка, Донецкой обл.) подтвердилось повышение мощности в габаритах аналога (ВАД с ЛАКО ротора) на 15...20% и перегрузочной способности в 1,4...1,7 раза. Скорость движения исполнительного органа установок УС2 и УС3 возросла с 1,6 до 3...4 м/с, а КПД увеличился на 1,5...2%. За время проведения испытаний (6 мес.) отказов ВАД не наблюдалось.

В это же время в УкрНИИВЭ были залиты медью в кокиль обмотки роторов ЭКВ4-160-3, у которых замена ЛАКО ротора на ЛМКО позволила повысить допустимую мощность на 35...37% (до 269 кВт) при том же статоре, а при увеличении магнитного потока на 10% мощность достигла 275 кВт.

В практике ОАО "Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса" (г. Первомайск, Луганской области) (ПЭМЗ) сварные медные обмотки ротора в настоящее время не применяются, а медные литые используются в ВАД мощностью до 400 кВт (длина сердечника ротора 605 мм, его диаметр 380 мм и масса расплава, заливаемого в кокиль, равна 135 кг). Результаты стендовых испытаний ВАД типа 2ЭКВ3,5 приведены на рис. 1 и в таблицах 3 и 4.

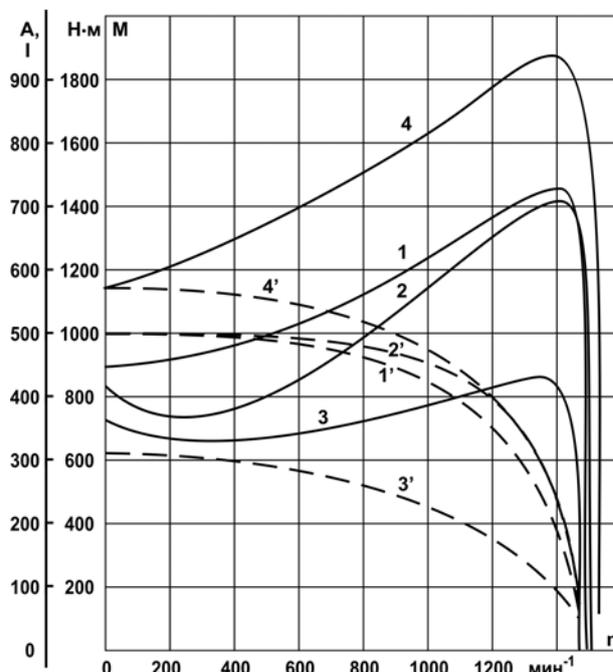


Рис. 1. Зависимость момента (сплошные кривые) и тока (пунктирные) от частоты вращения двигателя 2ЭКВ3,5-90 напряжением 660 В с ротором № 1 (1, 1'), № 2 (2, 2'), № 3 (4, 4') и серийного двигателя ЭКВ3,5-75 (3, 3')

Обработка и анализ результатов стендовых испытаний нескольких опытных образцов с ЛМКО ротора мощностью 90...210 кВт по сравнению с аналогичными с ЛАКО ротора показали следующее: а) благодаря росту удельной электропроводности материала обмотки ротора потери в ней снижаются в среднем на 25%; б) в связи с изменениями структуры и свойств электротехнической стали при заливке роторов медью и ее сплавами потери в стали снижаются в среднем на 6%; в) в связи с ростом сопротивления перехода "сердечник-обмотка" добавочные потери от поперечных токов снижаются в среднем на 12%; г) так как потери в обмотке ротора, добавочные потери и потери в стали снижаются, то уменьшается потребляемая мощность (при одинаковых размерах активных частей АД с ЛМКО и ЛАКО ротора), уменьшается ток в обмотке статора и потери в ней снижаются в среднем на 15%; д) в связи с уменьшением потерь в двигателе коэффициент увеличения мощности составляет в среднем 1,25, а КПД возрастает на 2...2,5%; е) благодаря возможности уменьшения высоты паза ротора при сохранении мощности снижается индуктивное сопротивление ВАД, возрастает cosφ в среднем на 0,04...0,06 и критический момент на 50...70%, что увеличивает перегрузочную способность и надежность ВАД; ж) в связи с уменьшением греющих потерь превышение температуры обмотки статора при сохранении мощности снижается в среднем на 15...20°C; з) в кривой механической характеристики отсутствуют провалы (минимальный момент выше пускового), что предотвращает "застывание" ротора на промежуточной частоте вращения; и) за счет анизотропии удельной

Таблица 3

## Результаты стендовых испытаний ВАД

Параметр	Результаты		
	расчета	испытаний	
		2ЭКВ3,5-90 с ЛМКОР	ЭКВ3,5-75 с ЛАКОР
Номинальное напряжение, В	660		
Номинальный ток, А	107,9	104,3	91
Потребляемая мощность в режиме S1, кВт	103,7	103	74,9
Номинальная мощность в режиме S1, кВт	90		64
Номинальная мощность в режиме S4, кВт	103	100	75
Продолжительность включения, %	60		40
Частота включений, ч <sup>-1</sup>	30		25
Коэффициент инерции	1,2		
Коэффициент увеличения мощности	1,25	1,34	-
КПД, %	87,2	88,0	85,4
Cosφ	0,841	0,85	0,81
Превышение температуры обмотки статора, °С	145		
Потери в стали, Вт	2390	2332	2410
Добавочные потери, Вт	570	550	620
Пусковой момент, Н·м	903	882	800
Минимальный момент, Н·м	-	-	728
Критический момент, Н·м	1510	1460	900
Ударный момент, Н·м	1026	1035	992
Ударный ток, А	875	849	853
Время разгона, с	0,35	0,31	0,46
Уровень звукового давления, дБ	-	65	86
Масса, кг	470	435	530

Таблица 4

## Результаты стендовых испытаний ВАД

Параметр	Результаты		
	расчета	испытаний	
		2ЭКВ3,5-210 с ЛМКОР	ЭКВ3,5-180 с ЛАКОР
Номинальное напряжение, В	660		
Номинальный ток, А	222,4	215	208
Потребляемая мощность в режиме S1, кВт	218,8	216	201,5
Номинальная мощность в режиме S1, кВт	200		161
Номинальная мощность в режиме S4, кВт	212	210	180
Продолжительность включения, %	60		
Частота включений, ч <sup>-1</sup>	30		
Коэффициент инерции	1,2		
Коэффициент увеличения мощности	1,19	1,24	-
КПД, %	91,4	92,2	89,0
Cosφ	0,868	0,88	0,85
Превышение температуры обмотки статора, °С	145		
Потери в стали, Вт	3870	3790	4500
Добавочные потери, Вт	870	830	1014
Пусковой момент, Н·м	2420	2500	2500
Минимальный момент, Н·м	-	-	1820
Критический момент, Н·м	3410	3800	2970
Ударный момент, Н·м	2750	2700	3100
Ударный ток, А	1800	1750	1950
Время разгона, с	0,3	0,25	0,41
Уровень звукового давления, дБ	-	73	92

электропроводности материала паза ротора по высоте пусковой момент увеличивается на 30...40 % при увеличении значения критического момента; к) дина-

мические характеристики (ударный момент и ток, время разгона) более благоприятны в связи с ростом пускового момента и отсутствием провалов в кривой

моментов; л) так как заливка роторов медью и ее сплавами не дает брака в короткозамкнутой обмотке, то не происходит искажения магнитного поля, при этом частично демпфируются свободные и резонансные колебания тока от высших гармонических, что обеспечивает снижение уровня звукового давления (шума) ВАД в среднем на 14...20 дБ; м) сокращается длина активной части ВАД в среднем на 15% при сохранении мощности и превышения температуры обмотки статора; н) расхождение расчетных и экспериментальных параметров и характеристик в основном не превышает допустимых пределов, а точность расчетов составляет  $\pm (5...10)\%$ .

В связи с тем, что продолжительность включения (ПВ) возрастает с 40 до 60%, а допустимая частота включения – с 25 до 30 ч<sup>-1</sup>, производительность горной машины (комбайна) возрастает в среднем на 20%.

Эксплуатационные испытания опытных образцов ВАД с ЛМКО ротора выполнены с целью определения их надежности и принятия решения о постановке на серийное производство. Опытные образцы были установлены в приводе очистных комбайнов К103М, КА80, МК67И, проходческого комбайна 4ПП-2 и магистрального конвейера ЛУ-120.

Двигатель 2ЭКВ3,5-90 проходил эксплуатационные испытания на шахте "Великомостовская №10" (г. Червоноград, Львовской обл.). Шахта отнесена к сверхкатегорийным по метану и опасной по взрывчатости угольной пыли. Коэффициент сопротивляемости угля резанию составляет 225 кг/см, длина лавы – 170 м, мощность пласта угля – 1,36 м, угол падения – до 4°. Привод комбайна К103М двухдвигательный, скорость подачи комбайна до 5 м/мин. Диаграмма тока приведена на рис. 2.

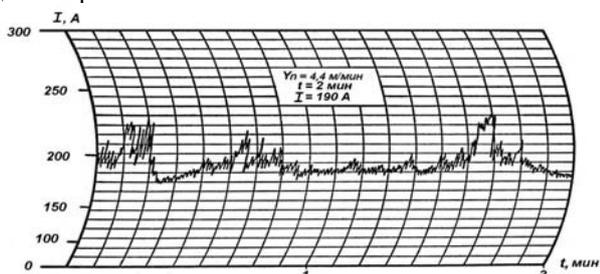


Рис. 2. Диаграмма тока 2ЭКВ3,5-90 при работе комбайна К103М, участок № 3, шахта № 10 "Великомостовская"

Двигатель 2ЭКВ3,5-210 испытывался на шахте им. Героев Космоса (г. Павлоград, Днепропетровской области). Шахта сверхкатегорийная. Коэффициент сопротивляемости угля резанию равен 300 кг/см, длина лавы – 198 м, мощность пласта – 0,55...0,98 м, угол падения – 2...4°. Скорость подачи комбайна КА80 до 2,5 м/мин. Диаграмма мощности приведена на рис. 3.

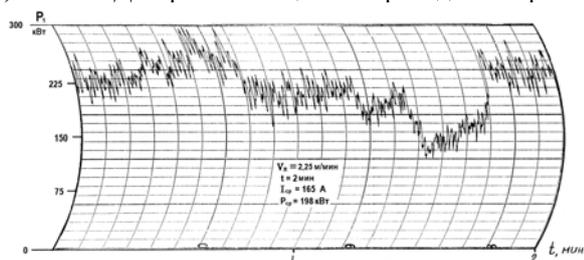


Рис. 3. Диаграмма мощности ЭКВ3,5-210 при работе комбайна КА-80, участок № 4, "Шахта им.Героев Космоса" ГХК "Павлоградуголь"

Двигатель ЭКВ4-140 проходил эксплуатационные испытания на шахте "Степная" (г. Першотравенск, Днепропетровской обл.). Шахта сверхкатегорийная. Коэффициент сопротивляемости угля резанию – 300 кг/см, длина лавы – 200 м, мощность пласта – 0,7...1,0 м, угол падения до 35°, скорость подачи комбайна МК67И до 2,7 м/мин. Диаграмма мощности приведена на рис. 4.

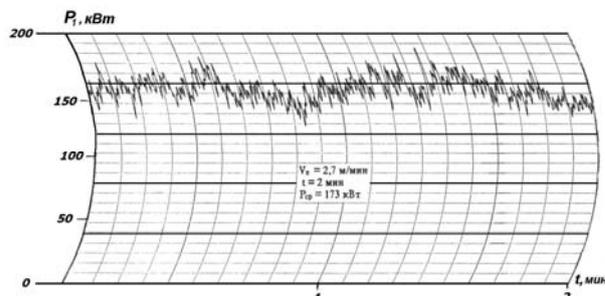


Рис. 4. Диаграмма мощности ЭКВ4-140 при работе комбайна МК67И, участок № 2, шахта "Степная"

Двигатель 4ЭДКО4-110 привода проходческого комбайна 4ПП2 работал на той же шахте в смешанном забое конвейерного штрека (25% угля и 75% породы с пределом прочности до 80 МПа), угол наклона  $\pm 12^\circ$ , длина тупиковой выработки до 500 м, площадь поперечного сечения забоя – 16 м<sup>2</sup>. Диаграмма мощности приведена на рис. 5.

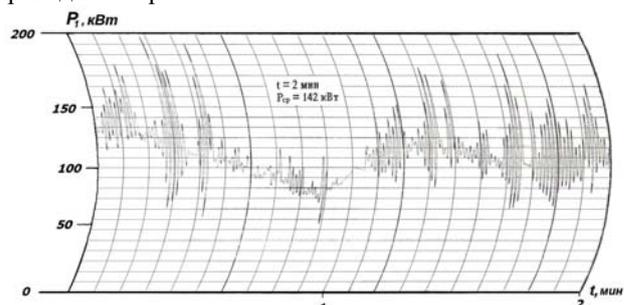


Рис. 5. Диаграмма мощности 4ЭДКО4-110 при работе проходческого комбайна 4ПП2, участок УПР-1, шахта "Степная" ГХК "Павлоградуголь"

Двигатель ВАО2-315L6 привода ленточного конвейера ЛУ120 длиной 1320 м с шириной ленты 1200 мм для транспортировки горной массы крупностью кусков угля до 500 мм и породы до 300 мм работал на той же шахте при скорости движения ленты 1,35 $\pm$ 0,25 м/с.

Отказов всех этих ВАД за время эксплуатационных испытаний не установлено.

Опыт работы очистных комбайнов К103М и КА-80 с новыми двигателями 2ЭКВ3,5-90 и 2ЭКВ3,5-210 с ЛМКО ротора подтвердил правильность выбора направления модернизации ВАД с точки зрения повышения их надежности, а также увеличения мощности, перегрузочной способности при уменьшении длины активной части на 15% (у 2ЭКВ3,5-90). Такие же результаты получены при работе очистных комбайнов 2ГШ-68Е и ГШ-68К и струговых установок СО-75, СН-75 и УСВ-2У с двигателями ЭКВ4-160-3, ЭКВ4-160-3М, ЭКВ4УС2М и ЭВ5УС с ЛМКО ротора.

**Технологические аспекты изготовления ВАД с ЛМКО ротора.** Анализ методов заливки обмоток роторов показывает, что заводы электротехнической промышленности освоили ряд способов заливки (на машинах литья под давлением, центробежный, вибрационный и статический) для АД с ЛАКО ротора. Технологического процесса заливки обмоток роторов медью не было, что потребовало поиска различных оригинальных технических решений. В связи с этим был принят прогрессивный метод плавки меди в электропечи типа ИСТ-0,16 (0,24). Индукционная печь позволяет быстро расплавлять медь (20 мин), а электромагнитное перемешивание металла обеспечивает интенсивную дегазацию.

Технология позволяет приготовить расплав меди с повышенной электропроводностью, отличается введением экспресс-контроля электропроводности расплава с поэтапным раскислением по результатам измерений фактической электропроводности.

Новая технология заливки усовершенствует известный способ гравитационного заполнения горизонтально расположенной формы с применением: теплоизоляции сердечника по наружной цилиндрической поверхности; подогрева сердечника в собранной литейной форме; вибрации формы в процессе заливки (при массе меди свыше 20 кг).

Непрерывным условием стабильного получения бездефектных отливок обмоток роторов по новой технологии является оценка степени технологичности для литья конструкций клеток роторов и улучшения ее за счет увеличения приведенной толщины стержней. Доказана необходимость введения показателей технологичности обмотки ротора как дополнительного условия при поиске на ПЭМВ оптимального варианта конструкции ВАД.

Для повышения стойкости кокилей используется специальное защитное покрытие их рабочей поверхности. Флюс, под слоем которого плавят медь, покрывая ее поверхность в индукционной печи, предохраняет от окисления.

Плавка ведется с расчетом одновременной готовности к заливке как меди, так и кокиля с сердечником ротора, нагретых до определенной температуры.

Создана новая технология изготовления роторов с ЛМКО экономичных ВАД мощностью от 1,1 до 400 кВт, которая ориентирована на применение только **отечественных** материалов и технологического оборудования [13].

Оригинальная экологически чистая и энергосберегающая технология заливки обмоток роторов медью и её сплавами, разработанная в УкрНИИВЭ, позволяет значительно упростить и удешевить заливку и полностью устранить брак, имеющий место при ЛАКО ротора.

**Патентная защита.** Конструкция ротора с ЛМКО и анизотропными свойствами медного сплава стержня ротора защищена патентом Украины № 27993 [14], а технология его изготовления – патентом № 21968 [15]. Патент № 27993 отмечен Почетной грамотой Государственного Департамента интеллектуальной собственности за 1-ое место в номинации

"Энергетика" на конкурсе Украины "Лучшее изобретение 2001 года".

Таким образом, то, что зарубежные фирмы планируют достичь в области изготовления АД с ЛМКО ротора к 2005...2007 годам (и лишь для двигателей мощностью до 200 кВт), в Украине выполнено на серийных образцах ВАД для привода горных машин мощностью до 355 кВт и опытных образцах мощностью до 400 кВт (табл. 5).

По сравнению с аналогами новое поколение ВАД в тех же габаритах обеспечивает: 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. При этом достигается снижение уровня звукового давления на 15...20 дБ, обеспечивается устойчивость режимов работы привода при стохастических нагружениях с частыми пусками (до 160 ч<sup>-1</sup>), исключается возможность возникновения искрения обмотки ротора и повышается ее термостойкость.

ВАД нового поколения обеспечивают энергетическую **эффективность** на уровне 1...2 классов EFF1 и EFF2 (Европейский союз) и федерального Закона ЕРАСТ (США), требующих максимальных уровней КПД.

Особенностью технологии изготовления роторов ВАД является применение сплава с **повышенной** удельной электропроводностью (58...60 МСм/м) и высокими литейными и механическими свойствами: предел текучести – 57 МПа; временное сопротивление на разрыв – 214 МПа; относительное удлинение – 48%; относительное сужение – 50% [16].

Сплав имеет высокую **демпфирующую способность**, что способствует уменьшению вибрации и шумов. Например, у электродвигателей 2ЭКВ3,5-90 привода очистного комбайна К-103М с обмотками ротора из нового сплава уровни звукового давления в октавных полосах спектра частот ниже в среднем на 21 дБ.

**Охрана окружающей среды.** Ресурсо-энергосберегающая **экологически чистая технология прошла экспертизу** и согласование с Луганской областной санэпидемстанцией (Украина) и Государственной инспекцией охраны окружающей среды и природных ресурсов (Россия, Татарстан, г. Альметьевск).

**Об экономической эффективности.** Как показано в [6], у АД мощностью 11,2 кВт уменьшение потерь электроэнергии дает экономию последней 1600 кВт·ч/год. Важным экономическим критерием является увеличение срока службы АД с ЛМКО ротора в два раза по сравнению с аналогом. При этом оптимизированная конструкция ротора с медной обмоткой имеет активную длину 152,4 мм, а с алюминиевой – 165,1 мм.

Алюминий дешевле меди на 20...25 центов США за 1 кг, однако при использовании отходов меди в Украине эта разница практически нивелируется. Учитывая, что применение меди в роторе позволяет на 10...15% уменьшить длину активных частей, уменьшается соответственно расход меди в обмотке статора и в целом себестоимость АД с ЛМКО ротора становится дешевле АД с ЛАКО.

Перечень ВАД с литой медной обмоткой ротора

Тип	Мощность, кВт, в режиме работы	Напря- жение, В	Размеры сердечника ротора, мм		Масса медной обмотки ротора, кг
			диаметр	длина	
<b>Комбайновые с водяным охлаждением</b>					
ЭКВ 2,5-30	37 при S4-60, 30 ч <sup>-1</sup>	660	148	265	11,2
ЭКВ 3-55	65 при S4-60, 30 ч <sup>-1</sup>		173	320	11,6
ЭКВ 3,5-90; ЭКВ 3,5-200М	90, 100, 210 при S4-60, 30 ч <sup>-1</sup>	660, 1140	198	270; 600	14,6; 35,4
ЭКВ4-140 ЭКВ4-160-2М	160, 270 при S4-60,30 ч <sup>-1</sup>	660 1140	234	530; 605	46,1; 56,7
ЭКВ4-150	150 при S1	1140, 660	254	340; 406	43,3; 51,85
ЭКВ5-250В	250 при S1	1140	272	500	61,2
2ЭДКВФ315LB4	315 при S1		284	580	72,36
ЭКВ5-200-2, ЭВ5УС	315 при S4-60, 30ч <sup>-1</sup> ; 200 при S4-90, 160ч <sup>-1</sup>	660, 1140	300	505	56,1
IEC-315 (Финляндия)	315 при S1		316	438	69,82
ЭКВ6-355	355 при S1	1140	340	470	99,42
<b>Комбайновые с воздушным охлаждением</b>					
4ЭДКО-110, 4ЭДКО4-120	120,140 при S4-60, 30 ч <sup>-1</sup>	660	230	510	50,25
<b>Струговые с водяным охлаждением</b>					
3ЭКВ4УС2	200 при S4-60, 120ч <sup>-1</sup>	660, 1140	230	510	44,7
<b>Конвейерные с воздушным охлаждением</b>					
2ЭДКОФ250; 2ЭДКОФ250 В4 2ЭДКВФ250 LA4	63...132, 200 при S1	1140/660	230	280; 510; 620	35,3; 44,7; 57,12
<b>Двухскоростные конвейерные с воздушным охлаждением</b>					
ЭДКВФ355 L12/4	132/400 при S1	1140, 660	380	605	134,3

Примечания:

1. Разработчик конструкций и технологий изготовления роторов с ЛМКО – УкрНИИВЭ.
2. Изготовители: ОАО "Первомайский электромеханический завод им. К.Маркса" (г. Первомайск, Луганская обл.), Харьковский государственный приборостроительный завод им. Т.Г. Шевченко.
3. ВАД типа ЭДКВФ355 L12/4 рассчитан на частоту вращения – 485/1485 об/мин.
4. Испытания опытных образцов выполнены в Испытательном сертификационном центре взрывозащищенного электрооборудования в соответствии с ГОСТ 183-74, ГОСТ 7221-80, ГОСТ 11828-86, ГОСТ 19929-87 и др.

Расчеты показывают, что срок окупаемости дополнительных затрат, связанных с применением ЛМКО ротора, в ВАД мощностью 210 кВт составляет около 1 года, что вполне приемлемо.

По данным специалистов ПЭМЗ для ВАД с ЛМКО ротора со среднестатистической мощностью 125 кВт при годовом выпуске 4000 шт. экономия электроэнергии у потребителя составит 41,5 млн. кВт·ч/год, а общий экономический эффект – не менее 6,0 млн. евро [17].

Задачи дальнейших исследований взрывозащищенных АД с ЛМКОР состоят в:

а) оптимизации параметров паза ротора и всей конструкции АД для различных применений, в частности, с учетом некоторых рекомендаций [18];

б) совершенствовании конструкции и системы охлаждения АД для дальнейшего повышения их технических показателей;

в) возможности применения высококачественных электротехнических сталей для улучшения энергетических показателей.

## ВЫВОДЫ

1. Изготовление литых медных обмоток роторов АД нового поколения на базе новой техногенно-экологически чистой ресурсо-энергосберегающей технологии признано одним из приоритетных направлений электромашиностроения XXI века.

Надежность, экономичность, соответствие требованиям международных норм – эти характеристики позволяют взрывозащищенным АД нового поколения занять прочные позиции на внутреннем и внешних рынках, так как они обеспечивают повышение полезной мощности, КПД, показателей надежности, улучшение формы механической характеристики, устойчивы в режимах работы с частыми пусками (до 160 ч<sup>-1</sup>).

2. Электродвигатели нового поколения обеспечивают:

- повышение энерговооруженности электропривода на 30...70% путем увеличения мощности АД без изменения установочно-присоединительных и габаритных размеров;

- устранение провалов в механической характеристике АД, повышение кратности пускового момента на 20...30%, а максимального момента – в 1,4...1,7 раза;

- повышение КПД на 1,5...3,0% и показателей надежности в 1,5...2,5 раза, в т.ч. полное устранение отказов по причине выхода из строя (выплавления) обмотки ротора;

- снижение уровня звукового давления на 15...20 дБ.

3. При годовом выпуске АД с медной литой обмоткой ротора 4000 шт. – экономический эффект составит около 6 млн. евро ежегодно благодаря росту производительности добычной горной техники, увеличению срока службы АД, уменьшению простоев, снижению удельного расхода электроэнергии и себестоимости продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мартовицкий В.Д. Техническое перевооружение угольной промышленности – интенсификация добычи и повышение уровня безопасности // Старопромислові регіони Західної і Східної Європи в умовах інтеграції : Зб. наук.пр.-Донецьк: ДонНТУ, 2003.-С. 116-119.
- [2] Вербовий А.П. Перспектива впровадження високо-ефективних енерго-зберігаючих асинхронних двигунів // Енергоінформ.- 2000.- № 23 (67).
- [3] Classifying motors according to energy efficiency // Siemens Automation and Drives. July, 2000.
- [4] Schetku L. Progress ricents dans la cauquile en cogutele des alliges an cuivre // Fenderic Belge (Belge).- 1968. № 38(1).- P. 5-19.
- [5] Проект стоимостью 2 миллиона долларов с целью применения медной обмотки в роторе электродвигателя. \$ 2m project aims to revive copper rotors for motors / Sacks Tony // Elec. Rev. (Gr.Brit.) [Elec.Rev.Int.]-1996.- 229, № 18.-С. 4.-Англ.
- [6] Альбертъян Н.А., Безрученко В.А. Резервы повышения коэффициента полезного действия двигателя.- ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, Электротехническая промышленность, 2004.-№-С. 44.
- [7] Peters D.T., Van Son D.J., Cowie J.D., Brush E.F. "Improved Motor Energy Efficiency and Performance through the Die-Cast Copper Rotor", Proc. of ICEM 2002 15th Intl Conference on Electrical Machines, Brugge, Belgium, August 2002, P. 117 (Book of Abstracts).
- [8] 04.06-21И.36. Резервы повышения коэффициента полезного действия асинхронных двигателей за счет применения медных литых короткозамкнутых обмоток. Kupfer-Druckgusslaufer-Shaffer sie den Durchbruch/ Greiner H.Elek. Masch. 2003. 82, №9, с.6-11, 5 ил. Библ.5.Нем. // РЖ.21И.Электрические машины и трансформаторы.-2004.-№6.-с. 4.
- [9] A.Ansel, O.Walti, S.F.Brundy. "Influence of copper pressure die-casting on induction machine magnetic behaviour". ICEM-2000, August, 2000, Espoo (Finland), Helsinki, P. 368-372.
- [10] F.Parasiliti, M.Villani, C.Paris, O.Walti. "Three-phase induction motor efficiency improvements with die-cast copper rotor cage and premium steel". SPEEDAM 2004, June 2004, Capri (Italy), P. 338-343.
- [11] Bruch E.F., Jr., Peters D.T., Cowie J.D., Doppelbauer M. Kimmich R. "Recent Advanced in Development of the Die-cast Copper Rotor Motor", Proc. of ICEM 2004 16 th Intl Conference on Electrical Machines, Crakow, Poland, September 2004, P.959-960 (Book of Digests, vol 3).
- [12] The induction motor– a state of the-aik technology? / Williamson Steve// Power Eng.J.-1996.-N6.-P. 247-254.
- [13] Чувашев В.А., Бурковский А.Н., Папазов Ю.Н., Чуванков В.Ю. Повышение энергетических показателей взрывозащищенных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб.науч. тр. УкрНИИВЭ. - Донецк: ООО "Юго-Восток, Лтд", 2005. - С. 155-166.
- [14] Пат. № 21968 Украина, МКИ6 В22 Д 19/01. Спосіб виготовлення литих короткозамкнугих роторів електродвигунів / Чувашев В.А., Костиця В.Г., Захарченко П.І., Диренко В.Г., Ширнін І.Г., Фіщенко С.П., Гіндес Л.П. -А1 №1072344; Заявл. 10.01.90; Опубл. 30.04.98; Бюл. № 2.- 4 с.
- [15] Пат. №27993 Україна, МКИ6 Н02К 17/16. Ротор електричної машини / Тахаутдінов Ш.Ф., Чувашев В.А., Захарченко П.І., Чуванков В.Ю., Броді В.Я та інші.- № 98052708; Заявл.26.05.1998; Опубл.16.10. 2000; Бюл. №5.-3 с.
- [16] Чувашев В.А. Концептуальные основы создания взрывозащищенных асинхронных двигателей с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора. Проблемы підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн.конф. м. Севастополь, 19-23 вересня 2005р.-Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2005.-139 с.
- [17] Програма создания асинхронных электродвигателей нового поколения на базе техногенно-экологически чистой технологи изготовления медных литых обмоток короткозамкнутых роторов на период 2000-2003 гг., Первомайск, Луганской обл., 2000.- 28 с.
- [18] Чувашев В.А., Чуванков В.Ю., Железняков А.В., Папазов Ю.Н., Демченко В.Н., Оленченко А.В., Велков А.А. Исследования взрывозащищенных асинхронных двигателей с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора. Проблемы підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн.конф. м.Севастополь, 19-23 вересня 2005р.-Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2005.- С. 140-143.

Поступила 26.05.06