

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЛИВКИ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА МЕДЬЮ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ПОТЕРИ В СТАЛИ

Иванов В.А., к.т.н., Гривин С.А.,
Государственное предприятие завод "Электротяжмаш"
Украина, 61055, Харьков, пр. Московский, 229
тел: (0572)95-64-01, 95-61-88, факс: (0572) 95-63-70, e-mail: etm@spetp.com.ua

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

Експериментально підтверджений вплив технології заливання короткозамкнутої обмотки ротора міддю на магнітні властивості електротехнічної сталі в вибухозахищених асинхронних двигунах потужністю до 400 кВт. Істотне зниження втрат у сталі сердечника ротора (і підвищення ККД на 1,2...1,8%) буде відбуватися також і в тягових асинхронних двигунах потужністю від 400 до 1200 кВт для нових транспортних засобів, що живляться від перетворювачів частоти від 48 до 150 Гц.

Експериментально підтверджено вплив технології заливки короткозамкнутої обмотки ротора міддю на магнітні свойства електротехнической стали во взрывозащищенных асинхронных двигателях мощностью до 400 кВт. Существенное снижение потерь в стали сердечника ротора (и повышение КПД на 1,2...1,8%) будет происходить также и в тяговых асинхронных двигателях мощностью от 400 до 1200 кВт для новых транспортных средств, питаемых от преобразователей частоты от 48 до 150 Гц.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

С целью повышения энергетических характеристик взрывозащищенных асинхронных двигателей (ВАД) в УкрНИИВЭ созданы ВАД с литой медной короткозамкнутой обмоткой (ЛМКО) ротора для привода горных машин, погружных электродвигателей для нефтедобывающих скважин и электромеханических ключей, применяемых при развинчивании-свинчивании колонны труб скважин. Кроме повышения коэффициента полезного действия (КПД) эти ВАД имеют повышенные полезную мощность (P_n) и коэффициент мощности ($\cos\varphi$), а также уменьшенный уровень звукового давления в сравнении с ВАД с литой алюминиевой короткозамкнутой обмоткой (ЛАКО) ротора при одних и тех же габаритных размерах.

Результаты экспериментальных исследований ВАД типа ЭКВ габарита 3,5 дм по высоте для привода очистных комбайнов приведены в таблицах 1 и 2. Расчетные значения КПД определены с учетом того, что потери в обмотке ротора с ЛМКО уменьшаются, так как удельная проводимость меди выше, чем алюминия (57 и 28 МСм/м соответственно). И, тем не менее, действительное значение КПД оказалось выше расчетного. Было высказано предположение, что в результате заливки обмотки ротора медью при температуре 1150-1250 °С изменяются магнитные свойства электротехнической стали (ЭТС) таким образом, что удельные потери, а значит и общие потери в стали, уменьшаются. Это приводит к повышению КПД, что в расчетах не учитывалось.

В случае с ЛАКО ротора этого не происходит, т.к. температура заливочного алюминия более низкая (~700 °С).

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Это предположение подтверждено, в частности, в статье французских исследователей [1], экспериментально доказавших, что магнитные свойства ЭТС существенно изменяются в лучшую сторону за счет теплового воздействия в процессе заливки обмотки ротора медью. Поэтому и потери в стали такого сердечника уменьшаются по сравнению с ЛАКО.

Энергетические соотношения в переменном электромагнитном поле определяются теоремой Умова-Пойнтинга

$$[\vec{E} \cdot \vec{H}] = \vec{S}, \quad (1)$$

где \vec{E} – вектор напряженности электрического поля в листах ЭТС; \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля; \vec{S} – вектор Умова-Пойнтинга, который, судя по его размерности ($\text{В} \cdot \text{А} / \text{м}^2$), характеризует мощность, приходящуюся на единицу поверхности.

В случае ЛМКО ротора значения E и H уменьшаются по сравнению с ЛАКО ротора. Как было показано в [2], поперечное сопротивление между обмоткой и сердечником ЭТС изменяется по экспоненциальной зависимости

$$Z_{Cu} = Z_{Al} \cdot \exp(0,5 \cdot b^* \cdot T_{Cu} / T_{Al}), \quad (2)$$

где Z_{Cu} , Z_{Al} – поперечное сопротивление ротора с обмоткой из литой меди и из алюминия; b^* – относительная ширина зубцов ротора; T_{Cu} , T_{Al} – температура плавления меди и алюминия.

Так как $T_{Cu} > T_{Al}$, то $Z_{Cu} > Z_{Al}$. Это приводит к уменьшению электрических потерь в ЭТС, косвенно вызывает уменьшение электрической составляющей E вектора Умова-Пойнтинга.

Таблица 1

Результаты стендовых испытаний ВАД типа 2ЭКВ3,5-100 и ЭКВ3,5-75

Тип электродвигателя	U_n , В	I_n , А	P_n (S1), кВт	P_n (S4), кВт	ПВ, %	$Z, \text{ч}^{-1}$	FJ	K_p	КПД, %	$\cos\varphi$	$\Theta, \text{°C}$	$P_{ст}$, Вт	$P_{доб}$, Вт	M_n , Н·м	M_{min} , Н·м	M_m , Н·м	$I_{уд}$, А	t_n , с	P , дБА	Q , кг
Расчет	660	107,9		103				1,25	87,2	0,841		2390	570	903	-	1510	875	0,35	-	470
2ЭКВ 3,5-100 с ЛМКО (факт)		104,3	100	101,4	60	30	1,2	1,34	88,0	0,85	145	2332	550	882	-	1460	849	0,31	65	435
ЭКВ 3,5-75 с ЛАКО		91	64	75	40	25		-	85,4	0,81	125	2410	620	800	710	900	853	0,46	81	530

Таблица 2

Результаты стендовых испытаний ВАД типа 2ЭКВ3,5-210 и ЭКВ3,5-180

Тип электродвигателя	U_n , В	I_n , А	P_n (S1), кВт	P_n (S4), кВт	ПВ, %	$Z, \text{ч}^{-1}$	FJ	K_p	КПД, %	$\cos\varphi$	$\Theta, \text{°C}$	$P_{ст}$, Вт	$P_{доб}$, Вт	M_n , Н·м	M_{min} , Н·м	M_m , Н·м	$I_{уд}$, А	t_n , с	P , дБА
Расчет	660	222,4		212				1,19	91,4	0,868		3870	870	2420	-	3410	1800	0,3	-
2ЭКВ 3,5-210 с ЛМКО (факт)		215	200	210	60	30	1,2	1,24	92,2	0,88	145	3790	830	2300	-	3300	1750	0,25	67
ЭКВ 3,5-180 с ЛАКО		208	161	180				-	89	0,85		4500	1014	2500	1820	2970	1950	0,41	92

Магнитная составляющая H этого вектора связана с магнитной индукцией B и магнитной проводимостью ЭТС μ соотношением

$$B = \mu \cdot H. \quad (3)$$

При неизменном B (магнитный поток в ВАД - const) уменьшение H связано с увеличением μ при заливке обмотки ротора медью. В то же время

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; μ_r – относительная магнитная проницаемость, характеризующая свойства ЭТС в отношении ее сопротивления магнитным силовым линиям.

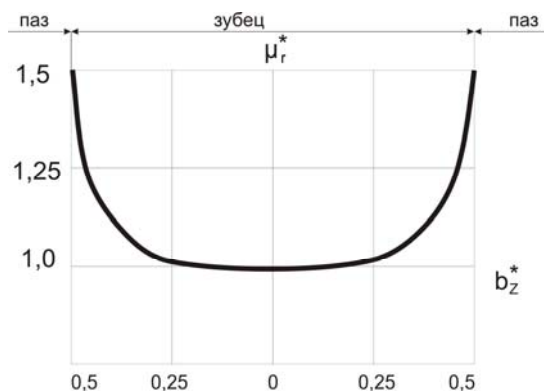
Известно, что ЭТС – это магнитномягкий ферромагнитный материал с круто поднимающейся основной кривой намагничивания и малой площадью гистерезисной петли. При заливке обмотки ротора медью происходит неравномерное нагревание ЭТС по ширине зубца, в результате чего часть его площади подвергается воздействию температуры, превышающей температуру точки Кюри (769 °C). При этом основная кривая намагничивания преобразуется в частную, несимметрическую петлю гистерезиса, у которой при периодическом изменении H максимальные значения $(+H_{max}) \neq (-H_{max})$ и центр петли не совпадает с началом координат. Оставшаяся площадь зубца, в которой температура точки Кюри превышает температуру ЭТС при заливке обмотки ротора медью, не подвергается изменениям петли гистерезиса.

Судя по предварительным расчетам потерь в стали ВАД с ЛМКО ротора, а также с учетом данных [1], изменение $\mu_r^* = \mu_r(Cu) / \mu_r(Al)$ находится в зависимости от относительной ширины зубца b_z^* (рис. 1.)

В зависимости от длины l и площади поперечного сечения зубцов S магнитное сопротивление ЭТС

$$R_M = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} \quad (5)$$

Таким образом, основная причина уменьшения потерь в стали при заливке роторов медью заключается в уменьшении R_M , так как происходит изменение угла наклона начальной кривой намагничивания частной петли гистерезиса в пределах ширины зубца по сложному закону в соответствии с кривой, приведенной на рис. 1.

Рис. 1. Зависимость $\mu_r^*(b_z^*)$ в ЭТС ротора ВАД с ЛМКО

В процессе изготовления сердечников ротора ВАД их ЭТС подвергается термическому воздействию. При этом изменяется химический состав, структура кристаллической решетки, зернистость стали, состояние поверхностных слоев и магнитные свойства [3]. Это приводит к изменениям составляющих по-

терь на вихревые токи и добавочные потери. По данным УкрНИИВЭ при изготовлении ВАД с ЛМКО ротора изменяются μ_r и R_M в зоне зубцов и частично в спинке ротора. Это приводит к уменьшению потерь в стали за счет уменьшения такой важной составляющей, как потери на гистерезис от основной волны магнитного потока.

В вихревом магнитном поле магнитные силовые линии направлены к стали ЭТС под углом α'

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu_r} \pm \frac{\mu_0 \cdot A}{B_H}, \quad (6)$$

где α – угол наклона в безвихревом поле ($\alpha = 90^\circ$); A – линейная нагрузка; B_H – нормативная составляющая индукции.

При намагничивании ЭТС нужно преодолеть силы элементарных магнитов, следующих за внешним магнитным полем с запаздыванием. Работа, необходимая для преодоления этих сил, переходит в тепло, вызывая потери.

При заливке обмотки ротора медью в областях сердечника, примыкающих к пазам (зубце, спинке) в связи с ростом μ_r уменьшается α' , что приводит в свою очередь к уменьшению коэрцитивной силы H_c частных потерь гистерезиса, т.е. к уменьшению ширины петли гистерезиса, а, значит, и потерь на гистерезис.

Зная зависимости $\mu_r(b_r)$ и используя современные методы численного анализа, нетрудно определить удельные потери на гистерезис и вихревые токи ВАД с ЛМКО ротора

$$P_{2\gamma\delta} = C_2 \cdot f \cdot B^\alpha; \quad (7)$$

$$P_{e\gamma\delta} = C_e \cdot f^2 \cdot B^\alpha, \quad (8)$$

где C_2 – коэффициент, зависящий от марки ЭТС и ее μ ; f – частота переменных токов в обмотке ротора; $\alpha = 2$ (при $B = 0,8 \dots 1,6$ Тл); C_e – коэффициент, зависящий от марки ЭТС, μ и толщины листов.

Удельные потери в стали на 1 кг

$$P_{c\gamma\delta} = P_{10/50} \cdot (f/50)^{1/3} \cdot B^\alpha, \quad (9)$$

где $P_{10/50}$ – потери при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц.

Практически авторы всех классических учебников по электрическим машинам предполагают, что потерями в стали магнитопровода ротора, в виду малой f , можно пренебречь. Мы считаем, что это не совсем корректно, т.к. приводит к существенным расхождениям в определении КПД расчетным и экспериментальными путями.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Цель проведенных в данной работе исследований – определение влияния теплового воздействия на потери в электротехнической стали сердечника ротора при заливке его обмотки медью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованиями установлено, что потери в зубцах ротора при существующих номинальных скольжениях в ВАД с ЛАКО ротора

$$P_z = K_{gz} \cdot P_{10/50} \cdot \left(\frac{B_{z\text{cp}}}{10^4}\right) \cdot Q_z \cdot \frac{f}{50}, \quad (10)$$

где K_{gz} – коэффициент увеличения потерь в зубцах вследствие влияния технологических факторов, в т.ч. температуры заливочного материала; $B_{z\text{cp}}$ – среднее значение индукции в зубцах, Гс; Q_z – масса зубцов.

В роторе ВАД существует бесконечный ряд высших гармоник, создаваемых короткозамкнутой обмоткой, которые существенно влияют на P_z (а значит и на $P_{\text{ст}}$), особенно в режиме работы ВАД в зоне насыщения. Возникающие при этом поверхностные потери в зубцах от вихревых токов определяются зависимостью

$$P_{zv} = \frac{\Delta \cdot \tau_v}{\mu} \cdot \omega_v^{1,5} \cdot B_{0v}^2 \cdot Z \cdot e_z \cdot l, \quad (11)$$

где τ_v – полюсное деление v -той гармоники; ω_v – угловая скорость v -той гармоники; B_{0v} – индукция в воздушном зазоре v -той гармоники; Z – число зубцов; l – длина сердечника ЭТС.

Поверхностные потери в зубцах от гистерезиса

$$P_{z\Gamma} = f_v \cdot \tau_v \cdot B_{0v}^{1,6} \cdot (t-s) \cdot l \cdot Z, \quad (12)$$

где f_v – линейная частота v -той гармоники; t – зубцовое деление; s – раскрытие паза, мм.

Потери в стали сердечника ротора

$$P_{\text{ст}} = K_{\text{обр}} \cdot P_{c\text{уд}} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_i^\alpha \cdot \sigma_i, \quad (13)$$

где $K_{\text{обр}}$ – коэффициент, учитывающий влияние механической обработки и изоляционного покрытия листов ЭТС ($K_{\text{обр}} = 1,4 \dots 1,8$). При учете термического воздействия заливаемого металла $K_{\text{обр}}$ уменьшается на 10...15% в зависимости от габарита и мощности АД; B_i и σ_i – индукции и массы частей магнитопровода (зубца, спинки).

Значения β и $P_{c\text{уд}}$ приведены в таблице 3.

Из-за действия гармоник магнитной индукции высокой частоты и амплитуды потери в стали ротора и статора имеют один порядок (по данным [4] потери в стали $P_{\text{ст}}$ в роторе составляют от 20 до 25% общих потерь в стали).

Таблица 3

Марка ЭТС ($\Delta = 0,5$ мм)	$P_{c\text{уд}}$, Вт/кг		β
	без учета термического воздействия	с учетом термического воздействия	
2013,2011,2212	2,5...2,6	2,1...2,2	1,5
2312	1,75	1,5	1,4
2411	1,6	1,4	1,3

Особенно существенное снижение потерь в ЭТС сердечника ротора будет происходить в АД с ЛМКО

ротора мощностью свыше 100 кВт при питании от источников регулируемой частоты. Так, например, для новых транспортных средств (тепловозов, электровозов, дизель-поездов, электропоездов) ГП завод "Электротязмаш" (г. Харьков) разработало тяговые электродвигатели типа АД 914 У1 мощностью 1200 кВт, питаемые от преобразователей частоты [5], технические характеристики которых приведены на рис. 2.

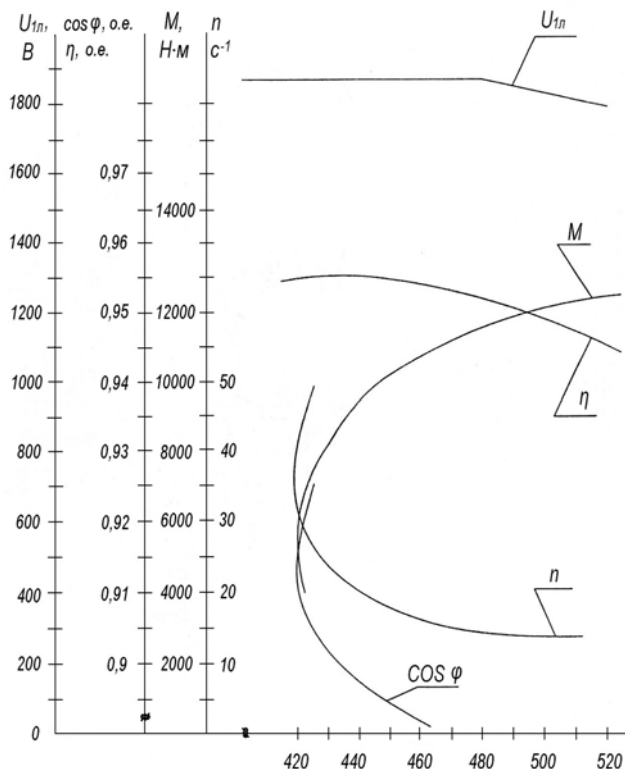


Рис. 2. Рабочие характеристики электродвигателя асинхронного тягового типа АД 914 У1 для привода колесных пар локомотивов. Исполнение защищенное с независимой вентиляцией. Технические данные: режим работы – продолжительный; Мощность 1200 кВт; линейное напряжение – 1870 В; ток 450 А; частота – 48...146,5 Гц; частота вращения 1138 об/мин; частота вращения max – 3030 об/мин; момент номинальный – 10000 Н·м; момент пусковой - 12000 Н·м; расход воздуха – 1,12 м³/с; КПД – 95,5%; cosφ = 0,88

Рабочая полоса частот таких АД находится в зоне 48...146,5 Гц, при этом в полосе частот свыше 100 Гц (около 80% рабочего цикла локомотивов) и скольжении 3...5% основная частота перемагничивания достигает 8...12 Гц, а от действия высших гармонических порядка $\nu=5,7$ и основных зубцовых $\nu=11,13$ она увеличивается пропорционально порядку гармоник. Следовательно, при питании АД от преобразователя частоты, являющегося источником высших гармоник, возрастут потери в стали сердечника ротора.

Анализ результатов экспериментальных исследований ВАД типа 2ЭКВ-3,5 (табл.1 и 2) показал, что потери в стали у ВАД с ЛМКО ротора на 3,3...18,7% меньше, чем у ВАД с ЛАКО, в то время как полезная мощность на 16...33 кВт больше.

Еще большего эффекта следует ожидать от применения ЛМКО ротора в тяговых АД электродвигате-

лях типа АД 914, АД 900, АД 901, АД 902 и АД 906, питаемых от преобразователей частоты. По предварительным расчетам уменьшение потерь в стали составит на 20...25%, что в совокупности со снижением потерь в обмотке ротора позволит увеличить КПД на 1,2...1,8%.

ВЫВОДЫ

Одним из наиболее эффективных и недорогих методов повышения энергетической эффективности асинхронных двигателей типа АД 914 является применение ЛМКО ротора.

Термообработка пазов ротора при заливке его обмотки медью улучшает магнитные свойства электротехнической стали.

С учетом того, что потери уменьшаются и в обмотке ротора, КПД АД с ЛМКО увеличивается на 1,2...1,8%.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.Ansel, O.Walti, J.F.Brudny. Influence of copper pressure die-casting on induction machine magnetic behaviour // ICEM 2000, 28-30 August, Espoo Finland, pp. 368-371.
- [2] Чувашев В.А., Папазов Ю.Н., Чуванков В.Ю. Асинхронные двигатели с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора // Электротехника і Електромеханіка.- 2004.-№3.-С. 65-67.
- [3] Голубович А.И., Сафонов А.С. Формирование требований к свойствам сердечников магнитопроводов при изготовлении электрических машин // V Международная конференция "Электротехнические материалы и компоненты". Труды. Крым, Алушта, 2004.С. 324-325.
- [4] Cëster. Etude des pertes magnetiques supplementaires les machines asynchrones alimentees par onduleur a modulation de largeur d'impulsion // These de doctorat en Genie Electrique, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 1996. [5] Иванов В.А., Гривин С.А., Евзикова Э.Г. Высокоиспользуемые частотно-регулируемые асинхронные электродвигатели. – V Международный симпозиум "Элмаш-2004". Труды симпозиума, Москва, 2004, том II, С. 110.

Поступила 28.09.2005