

УДК 621.313

Опыт конструирования и освоения производства опытно-промышленной партии вентильно-индукторных двигателей

С.А. Глинкин, А.В. Захаров

ОАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения»,
г. Владимир, Российская Федерация
E-mail: main@nptiem.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В задачах исследования и разработки вентильно-индукторных двигателей существенный интерес имеют вопросы снижения акустического шума, уменьшения тепловых нагрузок обмотки статора. Эти вопросы во многом определяются конструкторскими решениями и технологией производства машины. Производство таких машин мировыми производителями освоено незначительно. Отсутствуют общепринятые конструкторские решения, проверенные технологии производства. Поэтому поиск и экспериментальная проверка того или иного конструкторского и технологического решения в целях его реализации в серийном производстве вентильно-индукторных двигателей являются актуальной задачей.

Материалы и методы: Экспериментальные исследования предполагаемых конструкторских решений проведены на макетных, опытных и промышленных образцах. Исследованы влияния технологии производства на критические характеристики электродвигателя: акустический шум, вибрацию, нагревы.

Результаты: Приведены энергетические и акустические характеристики, основные габаритные размеры разработанных электродвигателей. Показано, что равномерность воздушного зазора влияет на получаемые виброакустические показатели машин в той же степени, что и конструкция сердечников. Проведен анализ принятых конструкторских решений и технологии производства электродвигателя с точки зрения обеспечения равномерности воздушного зазора. Даны рекомендации по проведению приемо-сдаточных испытаний.

Выводы: Предложенные конструкторские и технологические решения, проверенные при изготовлении опытно-промышленной партии, позволяют ускорить освоение производства вентильно-индукторных двигателей на предприятиях, ориентированных на выпуск асинхронных машин. При этом точность изготовления деталей для вентильно-индукторного двигателя должна быть увеличена относительно нормальной точности узлов асинхронных машин.

Ключевые слова: вентильно-индукторный электродвигатель, технология производства, критические характеристики двигателя, акустический шум.

Experience of designing and mastering the production of a pilot-batch of switched-reluctance motors

S.A. Glinkin, A.V. Zakharov

JSC «NIPTIEM», Vladimir, Russian Federation
E-mail: main@nptiem.ru

Abstract

Background: Problems of acoustic noise reduction and minimization of stator winding thermal loads are of significant interest in switched-reluctance motor studies. These questions are largely determined by design solutions and production technologies. Few international producers are currently manufacturing such machines. There are no widely accepted design solutions, there is no proven technology of production. Therefore, an urgent task now is to find and experimentally test different design and technological solutions for their implementation in batch production of switched-reluctance motors.

Materials and Methods: The experimental investigations of alleged design solutions were conducted on prototype, experimental, and industrial models. We also investigated the influence of production technology on the critical characteristics of the motor: acoustic noise, vibration, heating.

Results: The paper presents power performance and acoustic characteristics and the main overall dimensions of the developed electric motors. It shows that the vibroacoustic parameters of the electric motor are affected by the uniformity of the air gap as much as by the cores design. The developed design solutions and technologies of electric drive production were analyzed in terms of ensuring the air gap uniformity. Recommendations were made on conducting acceptance tests.

Conclusions: The proposed design and technological solutions, tested in the pilot-batch production, can accelerate the production development of switched-reluctance motors at the enterprises manufacturing asynchronous machines. And the accuracy of switched-reluctance motor components manufacturing should be higher than that of asynchronous machine components production.

Key words: switched-reluctance motors, production technology, critical motor characteristics, acoustic noise.

В современной научной литературе широко представлены работы, посвященные исследованию и разработке электроприводов с вентильно-индукторными электродвигателями (ВИД) [1–4], а также самим индукторным машинам. В то же время внедрение электроприводов с ВИД в промышленность существенно отстает от темпов их разработки и исследования. Парадоксально, но электромеханические заводы не торопятся осваивать электродвигатели, простые и по конструкции, и по технологии изготовления.

В период с 2008 по 2011 г. специалисты ОАО «НИПТИЭМ» участвовали в разработке и освоении опытно-промышленной партии вентильно-индукторных двигателей ВИД80 2Н-2.2кВт в количестве 110 шт. Эти машины, предназначенные для работы в составе электропривода, который был разработан подразделениями НИУ МЭИ, изготавливались для использования в насосах подкачки горячей воды ЖКХ г. Москва [5] по проекту ОАО «МОЭК». Заказчиком и координатором выступило ООО «Центртехкомплект» (г. Москва).

Ниже представлены результаты, полученные при проектировании и освоении производством двухфазных вентильно-индукторных электродвигателей ВИД80, ВИД90 производства ОАО «НИПТИЭМ».

Вентильно-индукторные двигатели, разработанные и изготовленные в рамках данного проекта, имели двухфазную обмотку статора и

соответствующую несимметричную магнитную систему [6, 7]. Количество фаз было выбрано исходя из предпосылки минимизации силовых элементов схемы питания машины, вследствие чего направление вращения электродвигателя – неререверсивное. В ходе НИОКР, проводимых по указанной теме, были разработаны и изготовлены двигатели 4 типоразмеров (без учета конструктивных модификаций). В табл. 1 приведены их некоторые параметры.

Сопоставление основных энергетических показателей ВИД, приведенных в табл. 1, с аналогичными показателями асинхронных электродвигателей позволяет сделать вывод о большей энергетической эффективности индукторных машин в сравнении с асинхронными. Элементы чертежа общего вида, позволяющего оценить конструкцию электродвигателя, приведены на рис. 1.

В процессе проектирования значительное внимание было уделено снижению вибрационных и акустических показателей машин, работающих в приводе. Конструкция 6/3, предложенная НИУ МЭИ, имела высокий уровень звукового давления на трех опытных образцах (80–85 дБ). Конструкция 8/4, предложенная НИПТИЭМ, благодаря комплексному подходу к проектированию и значительному опыту в разработке таких машин, отличалась низким уровнем звукового давления (68–70 дБ).

Таблица 1. Основные параметры двигателей ВИД

Тип	z_s/z_R	P_2	$Da1$	$L1$	$2p$	n	к.п.д.	m_{Cu}	m_{FE}	$m_{дв}$
		кВт	мм			об/мин		кг		
ВИД80У-1.1	6/3	1,1	131	110	2	3000	86	2,5	6,4	16
ВИД80Н-1.1	8/4	1,1	131	100	4	3000	85	1,7	7,5	16
ВИД80Н-2.2	8/4	2,2	131	140	4	3000	87	2,3	10	22
ВИД80Н-3	8/4	3,0	149	140	4	3000	88	3,3	13	28

Примечание: z_s/z_R – соотношение зубцов статора к зубцам ротора, характеризующее конструкцию магнитной системы, P_2 – мощность электродвигателя, $Da1$ – внешний диаметр статора, $L1$ – длина пакета сердечника статора, $2p$ – число полюсов, n – частота вращения, m_{Cu} , m_{FE} , $m_{дв}$ – массы меди, стали активной части и полная масса двигателя, соответственно.

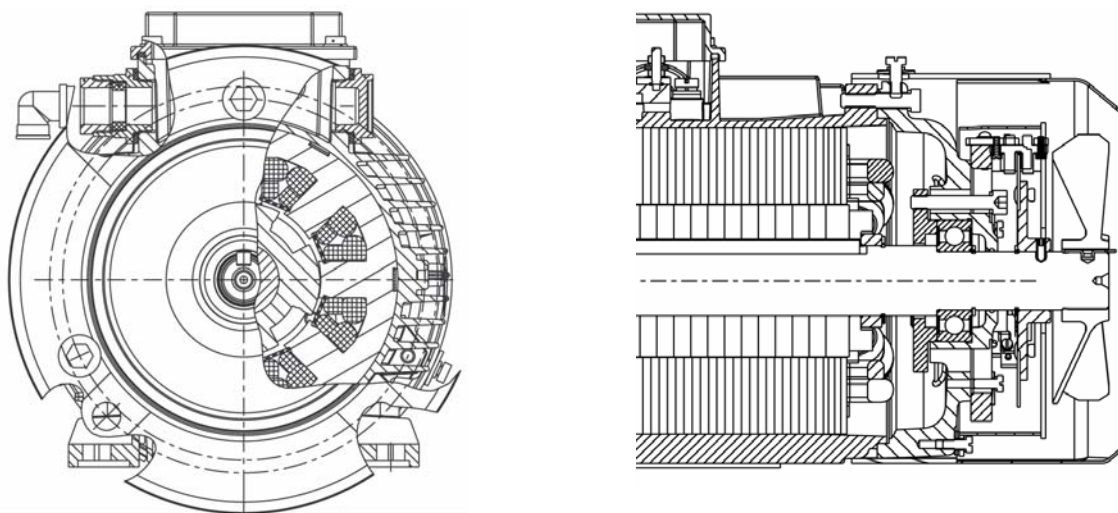


Рис. 1. Элементы чертежа общего вида ВИД80Н-2.2

Указанные показатели были достигнуты как за счет большей симметрии сил магнитного притяжения, так и за счет большей механической жесткости конструкции: отношение толщины ярма статора к ширине зубца статора у двигателя 8/4 составляет $h_j / b_{zs} = 0,77$ к $h_j / b_{zs} = 0,5$ для конструкции 6/3. На рис. 2 представлены эскизы сердечников ротора и статора ВИД80 конструкции 6/3 и 8/4.

Вибрационные характеристики макетных образцов находились в области менее 1,8 мм/с для виброскорости в радиальном и осевом направлениях, что удовлетворяет ГОСТ 20815-93 для машин с нормальной точностью.

Акустические испытания проводились в соответствии с ГОСТ в лаборатории виброакустики испытательного центра ОАО «НИПТИЭМ», имеющего соответствующее оборудование и сертификаты. При измерении вибрационных и акустических характеристик вентиляльно-индукторные двигатели вводились в режим синхронного вращения (коммутация по датчику положения ротора отключалась) при номинальном токе статора.

В рамках проекта сотрудниками кафедры «Автоматизированный электропривод» НИУ МЭИ было проведено исследование влияния гладких токов на величину звукового давления, которое показало снижение уровня звука на величину до 10 дБ в машинах с конструкцией 6/3. Существенного снижения уровня звука в электродвигателях конструкции 8/4 при использовании гладких токов выявлено не было.

Анализ результатов НИОКР определил дальнейшие перспективы электродвигателей с конструкцией 8/4 для их выпуска в опытно-промышленной партии количеством 110 шт.

В рамках конструкторско-технологической проработки проекта были выявлены следующие особенности производственного процесса:

1. Изготовление обмоток электродвигателя с помощью намотки провода на шаблон с последующим бандажированием катушки и ее укладки в пазы с запирающим катушек пазовыми клиньями не обеспечивает хорошего прижима катушки к сердечнику статора. Воздушный промежуток, образовавшийся между катушкой и сердечником, плохо заполняется пропиточным лаком (лак вытекает из воздушного промежутка), что приводит к увеличению теплового сопротивления и повышению температуры обмотки (рис. 3).

Существенное снижение теплового сопротивления между катушкой и сердечником может быть достигнуто за счет гарантированного прижима катушки к сердечнику (например, с помощью технологических зажимов), однако при таком способе пропитку обмотки необходимо осуществлять в зажимах, что исключает необходимость использования клиньев, но снижает технологичность и производительность пропитки. Применение двукратной пропитки пропиточными составами разной вязкости также позволяет снизить тепловое сопротивление между обмоткой и сердечником, что, однако, не так существенно, как пропитка в технологических зажимах.

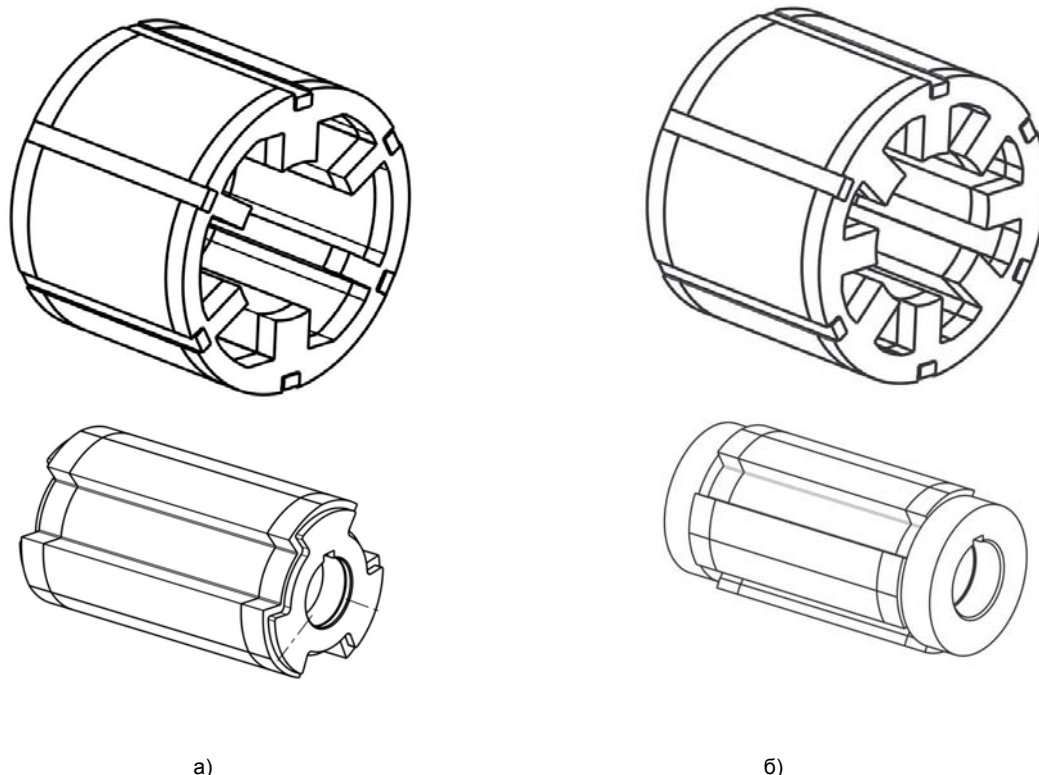


Рис. 2. Общий вид сердечников статора и ротора ВИД: а – ВИД конструкции с $z_s/z_r = 6/3$; б – ВИД конструкции с $z_s/z_r = 4/8$

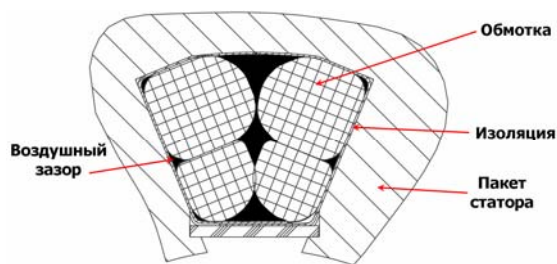


Рис. 3. Воздушные зазоры (выделены черным цветом) между элементами статора

2. Применение в конструкции вентиляционно-индукторных электродвигателей станин от общепромышленных асинхронных машин, имеющих большой вылет лобовых частей, нерационально с точки зрения использования объема двигателя. Поэтому при максимальном заполнении объема его корпуса активной частью края сердечника статора разделены со станиной зазором (посадка станины по длине ориентирована на активные части асинхронных машин, что на 10–15 % меньше, чем необходимо для сердечника вентиляционно-индукторного двигателя) (рис. 4).

3. Ротор, несмотря на кажущуюся конструктивную простоту и технологичность, сложен в сборке. На наш взгляд, его изготовление может упростить только применение пуклевки листов. Необходимо учитывать, что использование предварительного пакетирования ротора на технологической оснастке с дальнейшей горячей посадкой сердечника ротора на вал характеризуется повышенными трудовыми затратами, а

сборка пакета на валу не обеспечивает приемлемую точность размеров ротора.

В процессе производства опытно-промышленной партии был обнаружен существенный разброс виброакустических показателей машин (от 68 до 105 дБ) по уровню звуковой мощности L_w , скорректированному по шкале А в соответствии с ГОСТ Р 51402-99, ГОСТ Р 53148-2008. Ряд двигателей имел критический уровень звука (более 75 дБ). Поэтому для продолжения работы было необходимо установить причины повышенного шума [8]. В результате проведения исследований и приемо-сдаточных испытаний была набрана статистика измерений акустических показателей электродвигателей (данные приведены в табл. 2).

Таблица 2. Статистика акустических показателей ВИД80 2Н-2.2

Средний уровень звука, дБ	Количество двигателей				
	Всего	В партии №1	В партии №2	В партии №3	В партии №4
68	3		1		2
69	3	1			2
70	9	1	3	1	4
71	7	3		1	3
72	9	4		1	4
73	11	1		6	4
74	7			2	5
75	3	3			
ИТОГО с $L_w < 75$	52	13	4	11	24
ИТОГО с $L_w > 75$	20	5	1	3	11

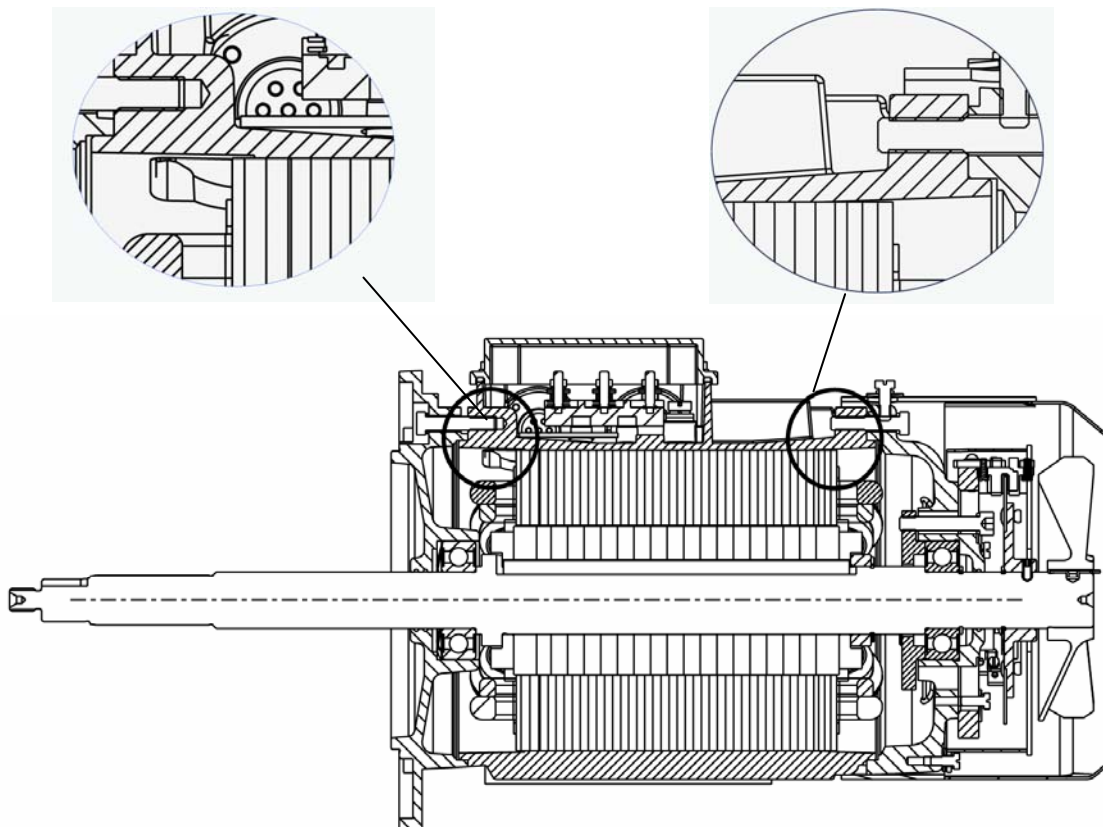


Рис. 4. Зазор между станиной и пакетом статора

Анализ данных испытаний показал, что часть электродвигателей отличается повышенным уровнем звукового давления при соответствии других технических показателей норме. Результаты вибрационных испытаний, в основном, коррелировались с акустическими, т.е. электродвигатели с $L_w > 75$ имели не только повышенный уровень звука, но и повышенный уровень вибрации. Виброскорость превышала значение $V > 1,8$ мм/с и достигала величины 4 мм/с. Двигатели с $L_w < 75$ дБ имели максимум виброскорости на низкой частоте, в двигателях с $L_w > 75$ дБ максимум виброскорости соответствовал высокой частоте.

На рис. 5 приведена зависимость уровня шума от его частоты для двух вентиляторно-индукторных двигателей с $L_w < 75$ дБ и $L_w > 75$ дБ, полученная на номинальной частоте вращения $n = 3000$ об/мин при проведении приемосдаточных испытаний.

На основании анализа экспериментальных акустических и вибрационных данных был сделан вывод о магнитной природе шума у двигателей с $L_w > 75$ дБ. Максимум уровня звука находился на частоте 800 Гц при частоте питания 100 Гц. Кратное снижение частоты питания кратно снижало частоту максимума уровня звука. Однако причина увеличения шума осталась невыясненной, так же как и технологические отклонения, вызывающие это явление. Для выяснения названных обстоятельств были проведены специальные эксперименты. Их результаты систематизированы в табл. 3. Также было исследовано влияние на

увеличение шума ряда других производственно-технологических факторов, таких как: сжатие пакета статора и ротора, гребенчатость пакета статора, зазор в подшипниках и замковых поверхностях. Это, безусловно, оказывало влияние на уровень шума, однако не увеличивало его значительно.

Реализация запланированных экспериментов определила необходимость введения двигателей в специальные режимы:

– *режим синхронного вращения на холостом ходу при номинальном токе* (датчик положения ротора отключен). Используется для измерения уровня шума;

– *режим синхронного вращения поля при заторможенном роторе* (датчик положения ротора отключен). Используется для определения задевания ротора за статор в намагниченном состоянии. Механический поворот ротора оператором эксперимента на зубцовое деление (управляемое шагание) позволяет определить, какие зубцы задевают друг за друга;

– *двигательно-генераторный режим*, при котором в цикле преобразования присутствует и генераторная, и двигательная составляющая (датчик положения ротора включен). В этом режиме можно создать номинальную токовую нагрузку машины, эквивалентную номинальной при ее вращении с коммутацией по датчику положения ротора, но без механического нагружения машины. Этот режим, отличающийся повышенной неравномерностью момента, использовался для ресурсных испытаний машины.

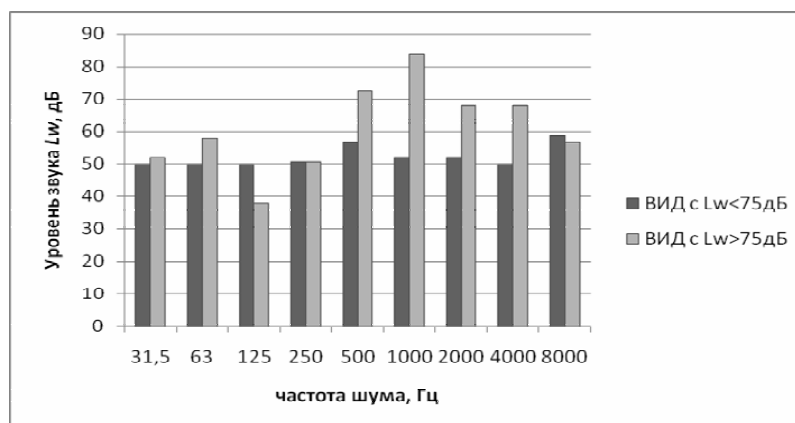


Рис. 5. Диаграмма зависимости уровня шума от частоты для двигателей с $L_w < 75$ дБ и $L_w > 75$ дБ

Таблица 3. Возможные причины повышенных акустических показателей

Возможная причина	Действия по выявлению	Результат на двигателе с $L_w > 75$ дБ	Результат на двигателе с $L_w < 75$ дБ	Влияние
Зазор между пакетом ротора и валом	Горячая посадка	–0–10 дБ	Нет	Слабое влияние
Зазор между пакетом статора и станиной	Горячая посадка	Нет	Нет	Не установлено
Неравномерность воздушного зазора	Измерение щупами	Невозможно определить результат		
	Окраска ротора	Выявлено	Выявлено	Причина шума
«Бананообразность» поверхности расточки статора	Измерение щупами на необработанном статоре	До 0,1 мм		Влияет на причину
Биение замков станины	Измерение на статоре	0,2–0,25	0,03–0,1	Влияет на причину
Биение зубцов ротора	Измерено при повторной шлифовке	0,1–0,2		Влияет на причину

На основании результатов проведенных исследовательских экспериментов были разработаны программы для следующих видов испытаний ВИД80 2Н-2.2:

- 1) приемо-сдаточные испытания;
- 2) ускоренное испытание на долговечность ступицы переднего щита (необходимость была вызвана быстрым износом поверхности ступицы);
- 3) испытание на задевание ротора о статор намагниченного электродвигателя.

Проведенные исследования позволили выявить, что причиной увеличения шума выше 75 дБ является задевание ротора за статор. Это объясняется уменьшением величины зазора при намагничивании машины, а также значительной неравномерностью воздушного зазора. Оценка величины уменьшения воздушного зазора за счет намагничивания в электродвигателях ВИД80 2Н-2.2 составляет около 0,1 мм при односторонней величине зазора 0,3 мм. Иными словами, если при сборке машины задевание ротора за статор при имеющейся неравномерности воздушного зазора не обнаруживается, то при намагничивании машины и соответствующем уменьшении воздушного зазора за счет деформации задевание может возникнуть и привести к резкому ухудшению виброакустических показателей.

Повышение точности изготовления конструктивных элементов машины, обеспечивающее максимально высокое значение суммарной неравномерности воздушного зазора менее 10 %, позволяет устранить явление повышения шума.

Заключение

Вентильно-индукторные двигатели, несмотря на их кажущуюся конструктивную простоту, требуют большей точности изготовления конструктивных деталей, чем асинхронные машины, поскольку индукторная машина более чувствительна к величине и равномерности воздушного зазора, геометрические размеры которого при работе двигателя изменяются за счет деформации сердечника статора.

Совершенствование вентильно-индукторных электродвигателей связано не только с разработкой новых конструкций индукторных машин и алгоритмов их управления, но и с совершенствованием технологии их производства. Разрешение технологических сложностей, связанных с обеспечением равномерности воздушного зазора и технологичного способа снижения теплового сопротивления между обмоткой и сердечником статора, позволит изготавливать вентильно-индукторные двигатели с характеристиками, не уступающими общепромышленным асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором.

Список литературы

1. Садовский Л.А., Виноградов В.Л. Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого электропривода // Электротехника. – 2000. – № 2. – С. 54–58.
2. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 72 с.
3. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 35–44.
4. Miller T. Switched reluctance motors and their control. – Oxford, 1993. – 200 с.
5. Алямкин Д.И. Разработка и исследование двухфазного вентильно-индукторного электропривода насосов горячего водоснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2012.
6. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications // CRC Press, 2001.
7. Шабает В.А., Захаров А.В. Экспериментальное исследование двухфазных нереверсивных вентильно-индукторных двигателей // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 44–47.
8. Глинкин С.А., Захаров А.В. Исследование причин критического ухудшения акустических показателей вентильно-индукторных электродвигателей // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2013. – С. 82–84.

References

1. Sadovskiy, L.A., Vinogradov, V.L. Elektrodvigateli s peremennym magnitnym soprotivleniem dlya sovremennogo reguliruemogo elektroprivoda [Motors with variable magnetic resistance for modern controlled electric drive]. *Elektrotehnika*, 2000, no. 2, pp. 54–58.
2. Kuznetsov, V.A., Kuz'michev, V.A. *Ventil'no-induktornye dvigateli* [Switched-reluctance motors]. Moscow, Izdatel'stvo MEI, 2003. 72 p.
3. Bychkov, M.G. Elementy teorii ventil'no-induktornogo elektroprivoda [Elements of switched-reluctance drive theory]. *Elektrichestvo*, 1997, no. 8, pp. 35–44.
4. Miller, T. Switched reluctance motors and their control. Oxford, 1993. 200 p.
5. Alyamkin, D.I. *Razrabotka i issledovanie dvukhfaznogo ventil'no-induktornogo elektroprivoda nasosov goryachego vodosnabzheniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development and analysis of a two-phase switched-reluctance electric drive for hot water pumps. Abstract of cand. tech. sci. diss]. Moscow, 2012.
6. Krishnan, R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. CRC Press, 2001.
7. Shabaev, V.A., Zakharov, A.V. Eksperimental'noe issledovanie dvukhfaznykh nereversivnykh ventil'no-induktornykh dvigateley [Experimental study of two-phase non-reversing switched-reluctance motors]. *Elektrotehnika*, 2003, no. 2, pp. 44–47.
8. Glinkin S.A., Zakharov A.V. Issledovanie prichin kriticheskogo ukhudsheniya akusticheskikh pokazateley ventil'no-induktornykh elektrodvigateli [A critical study of the causes of deterioration in acoustic performance switched-reluctance motors]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (XVII Benardosovskie chteniya)* [Abstracts of the International scientific and technical conference «State and prospects of electrotechnological development» (XVIIth Benardos readings)]. Ivanovo, 2013, pp. 82–84.

Захаров Алексей Вадимович,

ОАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения»,
кандидат технических наук, ведущий специалист по математическому моделированию и расчетам расчетно-теоретического сектора.

телефон (4922)33-13-37,

e-mail: zaharovav@ec.vemp.ru

Глинкин Сергей Александрович,

ОАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения»,
кандидат технических наук, ведущий инженер конструкторско-технологического отдела,

e-mail: main@nptiem.ru