

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Шарабан Ю.В.

Государственное предприятие "Харьковское агрегатное конструкторское бюро"  
Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 132, ГП "ХАКБ"  
тел. (057) 707-02-71, факс (057) 707-02-73, e-mail: khadb@ukr.net

*Наведено аналіз переваг і недоліків заходів щодо підвищення пускових характеристик асинхронних двигунів, призначених для приводу авіаційних агрегатів.*

*Приведен анализ преимуществ и недостатков мероприятий по повышению пусковых характеристик асинхронных двигателей, предназначенных для привода авиационных агрегатов.*

Авиационные асинхронные двигатели питаются напряжением 115/200 В частотой 400 Гц от бортовой системы электроснабжения. При повышении частоты тока прямопропорционально увеличиваются индуктивные сопротивления и при отсутствии скин-эффекта остаются неизменными активные сопротивления. При использовании раскроя магнитопроводов двигателей, работающих на частоте 50 Гц, прямопропорционально частоте увеличивают номинальную мощность и обратнопропорционально частоте уменьшают число витков обмотки. Это приводит к тому, что активные и индуктивные сопротивления уменьшаются обратнопропорционально квадрату числа витков, но соотношение между активными и индуктивными сопротивлениями остается прежним, но уменьшенным по сравнению с его значением при частоте 50 Гц в 8 раз. Увеличение индуктивных сопротивлений приводит к тому, что при одинаковом раскрое магнитопровода общепромышленного и авиационного асинхронного двигателя механическая характеристика последнего резко снижается и значения кратностей моментов не соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к авиационным электродвигателям. Опыт проектирования и эксплуатации асинхронных двигателей для авиационных агрегатов показывает, что такие двигатели должны иметь повышенные пусковые характеристики. Требуемые уровни кратностей моментов и пускового тока могут быть достигнуты при:

- 1) увеличении магнитного потока;
- 2) увеличении наружных диаметров статора и ротора и соответствующем уменьшении длины пакета магнитопровода, позволяющими нарастить высоту паза ротора и добиться увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений ротора в пусковом режиме за счет вытеснения тока и демпфирования магнитного потока рассеяния соответственно;
- 3) использовании конфигурации пазов, обеспечивающей усиление скин-эффекта и демпфирование магнитного потока рассеяния;
- 4) применении двойной клетки ротора;
- 5) использовании для клетки ротора материалов с повышенным удельным сопротивлением;
- 6) уменьшении сечения короткозамыкающего кольца.

Возможно также применение той или иной совокупности перечисленных мероприятий.

Целью настоящей работы является анализ недостатков и преимуществ некоторых мероприятий по обеспечению требуемых кратностей моментов и пускового тока, иллюстрированный конкретными внедренными конструкторскими решениями и разработка рекомендаций по проектированию авиационных асинхронных двигателей.

Для экспериментального определения пусковых параметров были изготовлены глубокопазные двигатели номинальной мощностью 8 кВт, предназначенные для привода насосной станции, с тремя конструктивными исполнениями короткозамкнутых роторов – с пакетом, шихтованным из листов электротехнической стали 2411 толщиной 0,35 мм; с пакетом, состоящим из четырех пластин толщиной 9 мм каждая из стали 10895; и со сплошным (массивным с пазами) пакетом из этой же стали. Стержни, выполненные из алюминия А5, были приварены к короткозамыкающим кольцам. Форма паза статора и ротора приведена на рис. 1. В этом двигателе с глубокими трапециевидными пазами в роторе используется явление вытеснения тока в стержнях обмотки ротора, обусловленное пазовыми потоками рассеяния. Результаты испытаний двигателей с данными роторами при номинальной мощности  $P_{2H} = 8$  кВт приведены в табл. 1.

Самым тяжелым режимом является запуск двигателя в составе насосной станции при температуре окружающей среды и рабочей жидкости в гидросистеме минус 60°C. Двигатель со сплошным ротором запускается в составе насосной станции при температуре минус 60°C, при этом время выхода станции на номинальный режим составляет 0,9 с. Двигатель с ротором, состоящим из четырех пластин, выводит насосную станцию, на номинальный режим за 1,2 с, а с шихтованным ротором – за 1,4 с при номинальном напряжении 115/200 В и частоте 400 Гц.

При пуске двигателя со сплошным (массивным) ротором пусковой момент и пусковой ток увеличились на 20%, но в то же время при нагрузке увеличилось скольжение и потребляемый ток по сравнению с двигателем, имеющим шихтованный ротор.

Исследования [1] показывают, что при малых скольжениях и при одинаковых токовых нагрузках статорных обмоток такие двигатели развивают

Таблица 1

Наименование параметра		Конструкция пакета ротора с пазами			
		Шихтованный		Состоящий из четырех пластин	Сплошной
		Расчет	Фактически		
Ток холостого хода, А	$I_{XX}$	14	18	16,6	18
Потребляемая мощность XX, Вт	$P_{1XX}$		575	1130	1550
Коэффициент мощности XX	$\cos\varphi_{XX}$		0,09	0,19	0,25
Номинальный ток, А	$I_H$	33,2	34	36,5	40,5
Потребляемая мощность при $P_{2H}$ , Вт	$P_{1H}$		8670	9750	10100
Номинальная частота вращения, об/мин	$n$	11820	11680	11620	11670
Скольжение, %	$s$	2,25	2,66	3,16	2,75
КПД	$\eta$	0,91	0,91	0,81	0,79
Коэффициент мощности	$\cos\varphi_H$	0,79	0,74	0,76	0,71
Пусковой ток, А	$I_{II}$	125	122	142	147
Кратность пускового тока	$K_{II}$	3,9	3,58	3,89	3,63
Пусковой момент, Н·м	$M_{II}$	8,77	8,7	9,75	11,2
Кратность пускового момента	$K_{MII}$	1,35	1,32	1,477	1,697
Максимальный момент, Н·м	$M_{\max}$	13,9	11,2		
Кратность максимального момента	$K_{M\max}$	2,1	1,7		

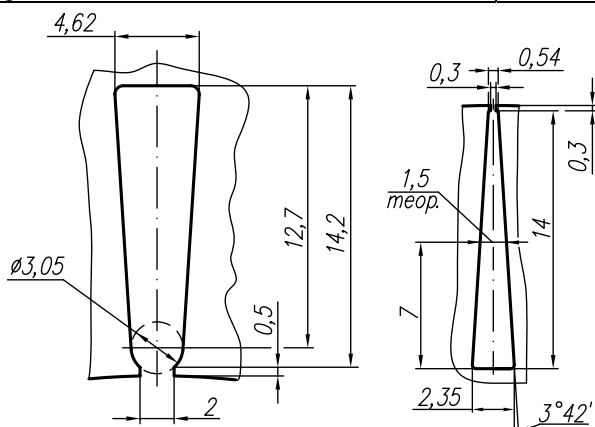


Рис. 1. Форма паза статора и ротора

вращающий момент, составляющий 70-80% вращающего момента, развиваемого асинхронной машиной с шихтованным ротором; в то же время при больших скольжениях они могут развивать вращающий момент, в несколько раз больший, чем у обычной асинхронной машины.

Такой двигатель может оказаться предпочтительным при больших скольжениях вследствие своей высокой добротности в условиях частых пусков и реверсов в различных механизмах.

Для электрических машин с массивными роторами характерно повышенное значение добавочных потерь на поверхности ротора. Эти потери складыва-

ются из ряда составляющих и оказывают влияние на снижение энергетических характеристик двигателей.

Снижение добавочных потерь на поверхности массивного ротора может быть достигнуто за счет увеличения воздушного зазора, выполнения рифлений на поверхности ротора или установки в пазах магнитных клиньев.

С целью проверки возможности повышения энергетических характеристик электродвигателя, статор был подвергнут магнитокапсулированию ферромагнитодиэлектрической массой ФМДМ, предназначенной для изготовления магнитных клиньев в пазах и проведены испытания двигателя с указанными роторами. Результаты испытаний двигателя до и после магнитокапсулирования статора приведены в табл. 2.

Анализ приведенных данных свидетельствует о снижении добавочных потерь в электродвигателе, т.к. уменьшение потребляемой мощности в режиме холостого хода составляет для сплошного ротора 46,5%, для ротора из четырех пластин – 27%, для шихтованного ротора – 13%; потребляемого тока на 11,9%, 9% и 4,7% соответственно. КПД в номинальном режиме (8кВт) электродвигателя с ротором из четырех пластин увеличился на 3%, двух остальных практически не изменился.

Добавочные потери, не связанные с образованием полезного вращающего момента и представляющие собой сумму потерь от рабочей гармоники и высокочастотных потерь от высших гармоник поля в воздушном зазоре, уменьшились.

Таблица 2

Наименование параметра		Шихтованный ротор		Ротор из четырех пластин		Сплошной ротор	
		до	после	до	после	до	после
Режим холостого хода	Ток холостого хода, $I_{XX}$ , А	17,8	17	17,67	16,07	17,83	15,7
	Потребляемая мощность, $P_{1XX}$ , Вт	590	520	1300	950	1550	830
	$\cos\varphi_{XX}$	0,096	0,088	0,21	0,17	0,25	0,15
Режим номинальной мощности (8 кВт)	Ток, $I_H$ , А	34	33,8	37,3	37,07	40,5	40,67
	Потребляемая мощность, $P_{1H}$ , Вт	8700	8630	9900	9800	10100	10010
	КПД	0,91	0,92	0,79	0,82	0,79	0,79
	$\cos\varphi_H$	0,74	0,74	0,78	0,77	0,71	0,71

Применение магнитных клиньев для улучшения энергетических, механических и виброакустических характеристик машин переменного тока целесообразно при любой форме пазов статора [2]. Они снижают амплитуду зубцовых гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре, добавочные потери и вибрации магнитного происхождения.

Также были проведены испытания двигателя при мощности 8 кВт на шихтованном роторе с увеличенным воздушным зазором между ротором и статором. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Наименование параметра	Величина воздушного зазора, мм		Изменение
	0,25	0,3	
$I_{XX}$	18	19,4	+7,7%
$P_{1XX}$	610	620	+1%
$I_H$	34	35,8	+5%
$P_{1H}$	8670	9200	+6%
$\eta$	91	87	-4%
$M_{II}$	8,27	8,45	+2%
$I_{II}$	116	130	+12%
$K_{MII}$	1,25	1,28	+2%

Увеличение воздушного зазора привело к незначительному увеличению пускового момента, но также и к ухудшению энергетических характеристик.

Но из этого не следует, что увеличение воздушного зазора нецелесообразно. На тех двигателях, где достаточно велики добавочные потери и где снижение добавочных потерь с увеличением воздушного зазора больше, чем их прирост в обмотке статора за счет увеличения реактивной составляющей тока, может наблюдаться увеличение КПД [3]. Кратности моментов возрастают в любом случае с увеличением воздушного зазора, в особенности кратности минимального момента.

Статор двухклеточного двигателя не отличается от статора двигателя с трапецидальным пазом (рис. 1), ротор имеет двойную беличью клетку.

Форма паза ротора приведена на рис. 2.

Верхняя клетка выполнена из латуни, нижняя из меди. Латунь имеет большее удельное сопротивление и меньшее сечение, чем медь, поэтому активное сопротивление верхней, пусковой обмотки больше, чем нижней, рабочей обмотки.

Принцип действия двухклеточного двигателя основан на том, что в первый момент пуска, когда частота тока в роторе примерно равна частоте тока в обмотке статора, верхняя клетка имеет меньшее индуктивное и полное сопротивление и при большем активном сопротивлении по ней протекает больший ток, чем по нижней клетке, поэтому наибольший вращающий момент в основном развивает лишь верхняя клетка. А по мере разгона и при достижении полной скорости индуктивные сопротивления обеих клеток уменьшаются и токи в них определяются активными сопротивлениями клеток.

Верхняя и нижняя клетки могут иметь или одно общее короткозамыкающее кольцо или каждая из обмоток может замыкаться своим собственным кольцом.

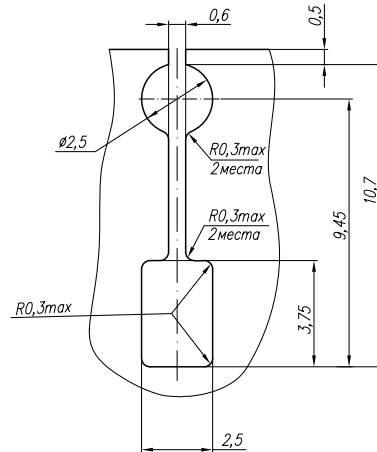


Рис. 2. Форма паза двухклеточного ротора

Таблица 4

Наименование параметра	Расчет	Конструкция короткозамыкающего кольца ротора			
		Общее кольцо (толщина 8мм)	Раздельные кольца (толщина 8мм)	Раздельные кольца (толщина 5мм)	Раздельные кольца (толщина 3мм)
$I_{XX}$	14	19,92	19,42	21	20,46
$P_{1XX}$		725	725	725	725
$\cos\varphi_{XX}$		0,105	0,112	0,100	0,102
$I_H$	33,4	36	36,43	36,97	37,47
$P_{1H}$		9140	9020	9100	9190
$n$	11820	11640	11610	11530	11230
$s$	1,57	3	3,25	3,91	6,41
$\eta$	0,92	86,7	87,6	86,1	83,1
$\cos\varphi_H$	0,75	0,71	0,717	0,714	0,711
$I_{II}$	146	112,5	110	107,5	100
$K_{II}$	4,37	3,13	3,02	2,91	2,67
$M_{II}$	11,6	11,2	11	10,5	9,75
$K_{MII}$	1,8	1,7	1,66	1,59	1,48

Таблица 5

Исполнение ротора	$M_{II}/M_H$		$M_{max}/M_H$		$M_{min}/M_H$		$I_{II}/I_H$	
	Расчет	Факт.	Расчет	Факт.	Расчет	Факт.	Расчет	Факт.
Глубокопазный	1,35	1,32	1,8	1,7	0,84	1,2	3,9	3,58
Двухклеточный	1,8	1,7	2,1	2,2	1,16	1,6	4,37	3,125

Сечение медной клетки в данном роторе выбрано таким образом, чтобы в номинальном режиме эквивалентное сопротивление ротора было таким, как у ротора с алюминиевой клеткой.

Были проведены испытания двигателей с общим для двух клеток короткозамыкающим кольцом на роторе, с разделенными кольцами и с кольцами уменьшенной толщины. Уменьшенная толщина колец более предпочтительна при производстве роторов, т.к. место соединения кольца со стержнями надежнее проваривается при их сварке.

Результаты испытаний двигателя при мощности 8 кВт с двухклеточным ротором приведены в табл. 4.

При запуске в составе насосной станции при температуре окружающей среды и рабочей жидкости минус 60°C двигатель с двухклеточным ротором и шихтованным магнитопроводом вышел на номинальный режим и обеспечил нормальное функционирование насоса, который при увеличенном моменте обеспечил номинальные параметры расхода и давления жидкости.

Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что наилучшие пусковые характеристики имеет двигатель с общим короткозамыкающим кольцом. Уменьшение сечения кольца или разделение колец в данной конструкции ротора не привело к увеличению пусковых характеристик.

Соотношения между фактической кратностью пускового и максимального моментов и кратностью пускового тока для широкопазных (с трапецидальными пазами) и двухклеточных двигателей, реально применяемых в авиационных агрегатах, полученные при испытаниях этих двигателей, приведены в табл. 5.

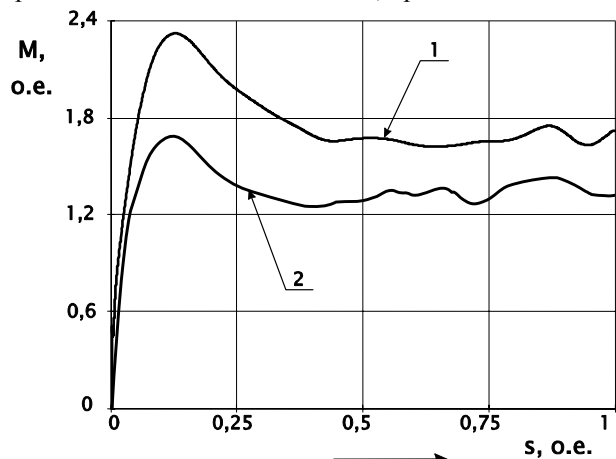


Рис. 3. Механическая характеристика двигателя:  
1 – двухклеточный ротор;  
2 – широкопазный ротор.

Увеличение пускового момента двигателя с двухклеточным ротором по сравнению с широкопазным составляет 29%, механическая характеристика (рис. 3) смещается в сторону больших моментов.

Сравнение результатов испытаний широкопазного и двухклеточного ротора на одном и том же двигателе (на одном статоре) показывает, что наилучшие пусковые характеристики имеет двигатель с двухклеточным ротором. Поэтому, несмотря на то, что КПД такого двигателя несколько ниже, чем у широкопаз-

ного, с целью исключения затяжных пусков, обеспечения нормальной работы авиационных агрегатов во всем диапазоне рабочих нагрузок и температур предпочтительно применение именно такого двигателя.

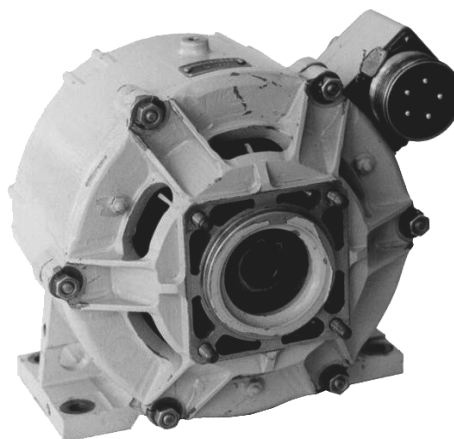


Рис. 4. Электродвигатель ДА-8

Спроектированный и изготовленный, исходя из этих принципов, асинхронный двигатель ДА-8 с номинальной мощностью 8 кВт (рис. 4) имеет полную массу 8,5 кг, т.е. удельную массу 1,06 кг/кВт и удельную мощность 0,94 кВт/кг. Масса активных частей (ротор и статор с обмоткой) составляет 5,7 кг, т.е. удельные показатели активных частей составляют соответственно 0,71 кг/кВт и 1,4 кВт/кг.

Двигатель ДА-8 прошел весь цикл стендовых наземных испытаний и в настоящее время проходит летные испытания в составе насосной станции на борту самолета АН-148.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Куцевалов В.М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: "Энергия", 1979.
- [2] Макаров Ф.К. Электрические машины переменного тока с магнитными клиньями. – М.: Энергоиздат, 1981.
- [3] Бакумов Ю.В., Кожарин А.С., Финкельштейн В.Б. Раскрой жесткой маловиброактивных двигателей // Проблемы технической электродинамики. Вып. 39.-К.: "Наукова думка", 1973.

Поступила 04.04.2006