

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	η	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		

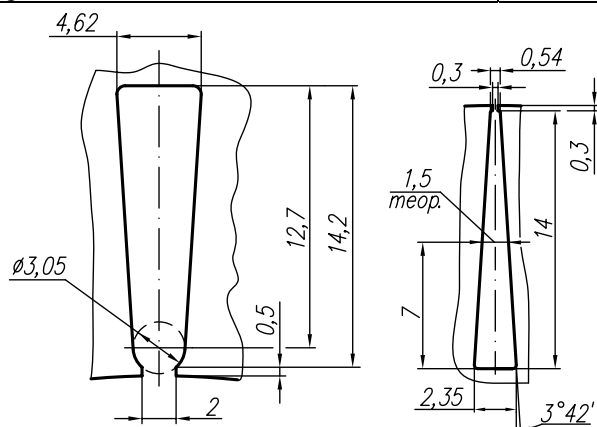


Рис. 1. Форма паза статора и ротора

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%
η	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.

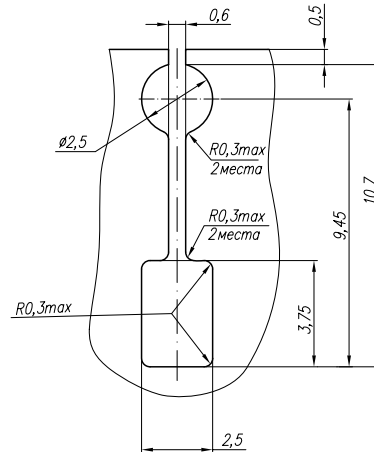


Рис. 2. Форма паза двухклеточного ротора

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
η	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.

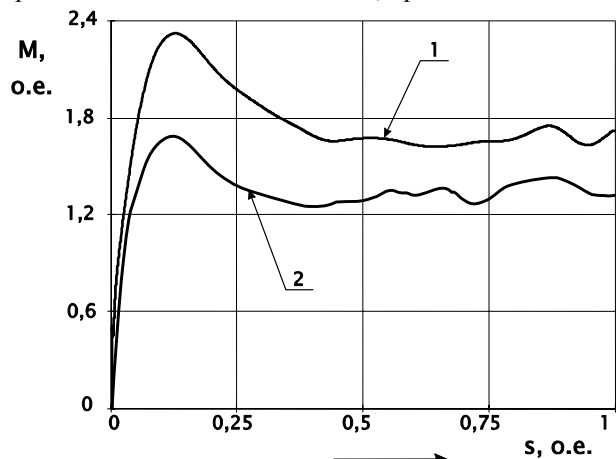


Рис. 3. Механическая характеристика двигателя:
1 – двухклеточный ротор;
2 – широкопазный ротор.

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.

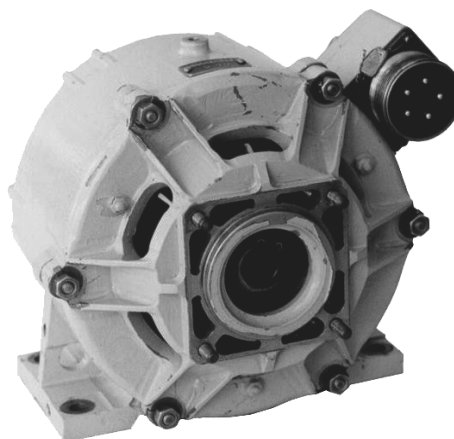


Рис. 4. Электродвигатель ДА-8

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

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ "ЭЛЕКТРОТОНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ" ФАРАДЕЯ

Боев В.М., д.т.н., проф.,
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Теоретические основы электротехники",
тел. (057) 707-69-61

Рогачев С.И., к.т.н., доц.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины".
тел. (057) 707-68-44

Приведений аналіз процесу проникнення магнітного поля в надпровідники першого і другого роду, заснований на використанні фарадєївської концепції "електротонічного стану" (векторного потенціалу).

Приведен анализ процесса проникновения магнитного поля в сверхпроводники первого и второго рода, основанный на использовании фарадеевской концепции "электротонического состояния" (векторного потенциала).

Статья посвящена 175-летию первой серии "Экспериментальных исследований по электричеству" М. Фарадея.

В работах [1, 2] предпринята попытка объяснения процесса электромагнитной индукции на уровне умозрительного анализа известных законов и экспериментальных фактов (которым главным образом и пользовался М. Фарадей в процессе своих экспериментальных исследований), основанная на использовании концепции "электротонического состояния", как суммы вихрей векторного потенциала, являющихся неотъемлемой частью всякого магнитного потока ($\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$).

Мы придаем большое значение такого рода анализу и наглядным представлениям физических процессов исходя из задач и целей преподавания теоретической электротехники и образовательного процесса в целом. В предисловии к "Трактату об электричестве и магнетизме" [3] Дж. К. Максвелл пишет, имея в виду преимущества способа мышления и выражений Фарадея в "Экспериментальных исследованиях по электричеству" [4]: "Для изучающего любой предмет чтение оригинальных трудов представляет собой большое преимущество, так как всегда наука наиболее полно усваивается при своем появлении на свет...". О самой концепции "электротонического состояния" и оценке ее Максвеллом в примечаниях редактора к "Избранным сочинениям" [3] читаем следующее: "Максвелл придавал идее Фарадея об "электротоническом состоянии" важнейшее значение. Он связывал его с представлением о магнитном потоке и его инерционных свойствах... Он вводит функцию вектор-потенциала, которая должна служить векторной характеристикой электротонического состояния".

Сам Максвелл в статье "О Фарадеевских силовых линиях" [3] пишет, имея ввиду идею "электрото-

нического состояния": "Только благодаря физической важности я изложил здесь математическое выражение одной из идей Фарадея...". И далее в "Трактате" [3]: "В результате целого ряда опытов, которые были основаны на тщательном размышлении, но без помощи математических вычислений, он пришел к идее, что существует нечто, что нам ныне известно как математическая величина и, что может быть даже названо основной величиной в теории электромагнетизма". То есть Максвелл рассматривает векторный потенциал (электротоническое состояние) как основную величину, характеризующую электромагнитное поле, что соответствует фундаментальности потенциалов в квантовой электродинамике, о которой говорит Р. Фейнман [5]: "В квантовой электродинамике в системе уравнений, заменяющих собой уравнения Максвелла, векторный и скалярный потенциалы уже считаются фундаментальными величинами. Векторы \vec{E} и \vec{B} постепенно исчезают из современной записи физических законов: их вытесняют \vec{A} и ϕ ".

В данной статье исследуется возможность описания с помощью концепции "электротонического состояния" явления сверхпроводимости, как крайнего проявления свойств электротехнических материалов, на уровне умозрительного восприятия экспериментальных фактов и результатов теоретических исследований этого явления.

Миткевич В.Ф. в работе [6] приводит мысленный эксперимент со сверхпроводящим тонкостенным тороидом, находящимся в магнитном поле соосного с ним прямолинейного проводника с током i_0 (рис. 1, а), и приходит к выводу, что в этом случае неприменима ни одна из трех формулировок закона электромагнитной индукции (Фарадея, Максвелла, Миткевича) [2, 6], а объяснение смысла происходящих явлений может быть дано исходя из идеи Фарадея об электротоническом состоянии.