

* * *

Сверхскоростные и сверхскоростные асинхронные машины за рубежом: обзор публикаций

ШУМОВ Ю.Н.

В результате обзора около 50 зарубежных публикаций рассмотрены тенденции развития сверхскоростных и сверхскоростных асинхронных машин мощностью от нескольких микроватт до нескольких мегаватт и частотой вращения от $10 \div 10^3$ до 10^6 мин⁻¹.

Ключевые слова: асинхронная машина, сверхвысокая и сверхвысокая частота вращения, обзор зарубежных публикаций

Trends in the development of super- and ultrahigh-speed induction machines with capacities ranging from a few microwatts to several megawatts and rotation frequencies from $10 \div 10^3$ to 10^6 min⁻¹ are considered on the basis of reviewing around 50 foreign publications.

Key words: induction machine, rotation frequency, review of foreign publications

В настоящее время нет устоявшейся терминологии и разделения машин на группы по значению частоты вращения. Так, в англоязычной технической литературе частоту вращения $(100 \div 500) \cdot 10^3$ мин⁻¹ называют «very high speed», «high speed», «mega speed», «ultra speed»; в отечественной литературе — «сверхвысокоскоростной», «высокоскоростной», «сверхскоростной». Условимся, учитывая [1–3], электрические машины с частотой вращения $(3 \div 10) \cdot 10^3$ мин⁻¹ называть высокоскоростными, $(10 \div 200) \cdot 10^3$ — сверхскоростными и от $200 \cdot 10^3$ до нескольких миллионов — сверхскоростными.

Поскольку будем рассматривать асинхронные машины (АМ) с частотой вращения от $10 \cdot 10^3$ мин⁻¹ до 1–1,5 млн об/мин, то всю эту группу АМ будем называть сверхскоростными (САМ). Область применения САМ непрерывно расширяется. Они используются для привода компрессоров, воздухоподъемников, турбоагрегатов, вентиляторов, насосов, шпинделей, центрифуг, маховичных накопителей энергии, в качестве двигатель-генераторов газовых турбин, в устройствах микросистемной техники.

Известно [3], что предельная мощность вращающейся электрической машины при прочих равных условиях обратно пропорциональна квадрату частоты вращения. Поэтому, если при частоте вращения порядка $10 \cdot 10^3$ мин⁻¹ САМ можно выполнить на несколько мегаватт, то при частоте вращения 10^6 мин⁻¹ — на десятки и сотни ватт.

Сверхскоростные асинхронные машины можно разделить на 2 группы: АМ от нескольких мегаватт (нижний диапазон частоты вращения) до нескольких киловатт при частоте вращения порядка $(100 \div 200) \cdot 10^3$ и микромашины для микросистемной техники мощностью от микроватт до нескольких сотен ватт (частота вращения выше $200 \cdot 10^3$ мин⁻¹).

Научными центрами по исследованию, разработке новых конструкций, отдельных вопросов теории САМ первой группы, в частности для диапазона частоты вращения от $10 \cdot 10^3$ до $(30 \div 70) \cdot 10^3$ мин⁻¹ и мощности 20–1000 кВт, можно считать технические университеты HUT, Espoo и LUT, Lappeenranta (Финляндия). Учеными этих университетов опубликованы многочисленные статьи и

сделаны доклады на международных конференциях, защищено несколько докторских диссертаций по тематике САМ (Saari J., Nurppunen J., Ldhteemдki J., Antila M.).

Основными проблемами для САМ являются механическая прочность ротора и надежная работа подшипниковых узлов. Считается [1], что шихтованный ротор по соображениям прочности можно применять до частоты вращения в несколько десятков тысяч оборотов в минуту, производители же с целью улучшения энергетических показателей стараются использовать эту конструкцию при частоте вращения до $100 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ и окружной скорости до 250 м/с.

В вопросе выбора конструкции ротора нет единого подхода. Так, шихтованный ротор использовался для турбокомпрессоров с параметрами: $P=21 \text{ кВт}$, $n=47 \text{ мин}^{-1}$ [4]; $P=11 \text{ кВт}$, $n=56,5 \text{ мин}^{-1}$ [5]; $P=60 \text{ кВт}$, $n=60 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ [6, 7]. Короткозамкнутая обмотка ротора (КЗО) может выполняться не только из упрочненной меди, но и из алюминия [8], титана [9, 10], а также из композиций металлов [4].

Известно, что САМ с массивным ротором имеет неудовлетворительные энергетические показатели [1], поэтому производители или применяют в массивном роторе короткозамкнутую обмотку (КЗО) [11], или выполняют на поверхности ротора аксиальные пазы и радиальные кольцевые канавки [12, 13] и устанавливают короткозамыкающие кольца (КЗК) [14]; в некоторых случаях функцию КЗО выполняют торцевые участки массива ротора [12]. В отдельных конструкциях применяется покрытие поверхности ротора медью [15–17] или сплавами металлов [18].

В таблице приведены данные некоторых САМ большой и средней мощности.

Приведем некоторые примеры САМ в диапазоне больших и средних мощностей. В университете LUT (Финляндия) был разработан асинхронный турбогенератор $P=1 \text{ МВт}$, $n=14 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$, некоторые параметры генератора: $2p=2$; диаметр ротора $D_2=270 \text{ мм}$; активная длина статора $l_1=276 \text{ мм}$; число пазов статора $Z_1=60$; число пазов ротора $Z_2=40$; пазы ротора прямоугольные $40 \times 25 \text{ мм}$; воздушный зазор $\delta=3 \text{ мм}$; скольжение $s=1\%$; функцию КЗК выполняют торцевые участки ротора шириной 20 мм. Обмотка статора двухслойная с шагом $u=5/6$, для охлаждения служит воздух, нагнетаемый турбиной низкого давления [12].

В [28] исследовалось влияние на показатели асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора (АДКЗ, $P=20 \text{ кВт}$, $n=30 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$) материала магнитопровода. Для одного варианта использовалась кремнистая сталь с содержанием кремния 4%, для другого – кобальтовая сталь (49%

кобальта, 1,9% ванадия, 49,1% железа). При этом варьировались размеры паза и число витков обмотки статора; КЗО ротора медная, подшипники шариковые прецизионные. Высота оси вращения 80 мм, $l_1=100 \text{ мм}$. Исследование показало, что при использовании кобальтовой стали показатели АД улучшаются, уменьшается нагрев, но стоимость двигателя значительно возрастает, к тому же кремнистая сталь более технологична.

В [15] исследовалось влияние конструкции ротора на энергетические показатели двигателя. При этом испытывались промышленный АДКЗ ($P=65 \text{ кВт}$, $n=30,6 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$) для привода компрессора, а также аналогичные АД: один с массивным ротором и аксиальными пазами, другой с омедненным массивным ротором.

В [26] изучались прочность шихтованного ротора и работа активных магнитных подшипников. Некоторые конструктивные параметры и данные испытуемого АДКЗ: $P=100 \text{ кВт}$; $n=30 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$; $D_2=117,8 \text{ мм}$; $l_1=170 \text{ мм}$; $Z_2=26$ (пазы круглого сечения, закрытые); сталь FeSi_3 толщиной 0,15 мм; диаметр стержня обмотки 9 мм; диаметр вала $d_B=60 \text{ мм}$. Испытания показали, что при $n=30 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ напряжение стали ротора составило 398 Н/мм^2 при пределе текучести 450 Н/мм^2 и окружной скорости $V=185 \text{ м/с}$.

Швейцарская фирма *Elektromaschinen und Antriebe* выпускает АДКЗ общепромышленного назначения ($P=60 \text{ кВт}$, $n=60 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$) [7]. Вал имеет повышенную жесткость, причем номинальная частота вращения больше первой критической. Однако разработчики приняли повышенное значение $\lambda=l_1/D_1=3,8$, что усложняет работу подшипников и увеличивает вибрацию. Окружная линейная скорость составляет 157 м/с (в статье указано $V=270 \text{ м/с}$).

Некоторые параметры АДКЗ: $D_a=135 \text{ мм}$, $D_2=50 \text{ мм}$, $l_1=190 \text{ мм}$.

Фирма GEC (США) совместно с другими коммерческими организациями приняла участие в проекте по разработке встраиваемого АДКЗ для промышленного турбокомпрессора [4]. Параметры АДКЗ: $P=21 \text{ кВт}$; $n=50 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$; $D_a=127 \text{ мм}$; $D_2=51 \text{ мм}$; $l_1=102 \text{ мм}$; $d_B=30 \text{ мм}$; $\delta=1,27 \text{ мм}$; $Z_1=24$; $Z_2=17$; $\eta=94\%$; сталь кремнистая толщиной 0,36 мм; первая критическая скорость $57 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$; $V=160 \text{ м/с}$; КЗК имеют повышенное сечение и опираются на вал, что уменьшает потери в роторе и увеличивает прочность КЗО. Одновременно с АДКЗ были спроектированы синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) и вентильно-индукторный реактивный двигатель (ВИРД) в тех же габаритах. Сравнение этих двигателей с АДКЗ показало, что АДКЗ в два раза де-

Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Назначение САМ, конструкция ротора	№ источника по списку литературы
$10 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$	массивный с медной КЗО, газовый компрессор	19
$8 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$	массивный с аксиальными пазами, газовый компрессор	19,20
$6,9 \cdot 10^3$	$14,7 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, газовый компрессор	21
$6 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	массивный с КЗО, турбокомпрессор	22
$6 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, газовый компрессор	23
$2,6 \cdot 10^3$	$11 \cdot 10^3$	массивный с алюминиевой КЗО, компрессор	8
10^3	$20 \cdot 10^3$	массивный с аксиальными пазами	24
10^3	$14 \cdot 10^3$	массивный с аксиальными пазами, турбогенератор	12
270	$16,2 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, компрессор	25
100	$30 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, опытный	26
65	$30,6 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, компрессор	15
60	$60 \cdot 10^3$	массивный омедненный, опытный	15
60	$60 \cdot 10^3$	массивный с КЗО, опытный	15
60	$60 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, металлообрабатывающие станки	7
62	$100 \cdot 10^3$	массивный омедненный, опытный	27
20	$30 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, опытный	28
21	$47 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, компрессор	4
11	$56,5 \cdot 10^3$	шихтованный с КЗО, компрессор	5
6	$130 \cdot 10^3$	массивный, торцевой, турбонагнетатель	29

шевле СДПМ и на 40% ВИРД. Приняты меры для увеличения подшипниковой базы, для этого лобовые части обмотки статора сформированы соответствующим образом. Шлицы пазов статора минимальны по ширине для уменьшения добавочных потерь и потерь трения о воздух. Для стержней ротора использовался композит, получаемый путем прессования и дальнейшего запекания порошковой меди и оксида алюминия. Этот материал прочнее меди, а его проводимость больше, чем у алюминия.

Ограничителем для максимальной частоты вращения является линейная окружная скорость V , однако большинство производителей выпускают САМ с $V=50-200$ м/с, что в худшем случае на 20–30% ниже максимально допустимого значения по механической прочности, и только в отдельных случаях скорость достигает 350 м/с [15].

С конца 70-х годов прошлого века началось развитие миниатюрных и микроминиатюрных устройств, которые совместно с полупроводниковыми преобразователями образуют микросистемы, которые в США получили наименование «микроэлектромеханические системы» (MEMS), а в Европе и Японии – «микросистемная техника» (MST). Составной частью многих таких систем являются сверхскоростные и ультраскоростные электрические микромашины, в частности АМ мощностью от микроватт до 100 Вт с частотой вращения до 1–1,2 млн об/мин. Особо бурное развитие теории и разработок микромашин МЭМС происходит в последние два

десятилетия, о чем свидетельствуют сотни статей и докладов на международных конференциях.

Развитие миниатюрных и микроминиатюрных конструкций получило толчок после разработки в Массачусетском технологическом институте (MIT, США) технологий производства на основе кремния слоистых структур (технологии LIGA, DRIE). Применение кремния для микроминиатюрных машин объясняется его высокой прочностью, превышающей прочность многих сплавов, устойчивостью к высоким температурам и возможностью с помощью современных технологий выполнять детали с микронными допусками. Большинство конструкций сверхскоростных миниатюрных АМ (МАМ) встраивается или в микрокомпрессоры, или в миниатюрные газовые микротурбины объемом в несколько кубических сантиметров и работает в условиях высоких температур [30–33].

Особенно много разработок и исследований МАМ выполняется в MIT в содружестве с другими университетами в рамках многолетней программы по разработке МЭМС. Об интенсивности этих работ говорит тот факт, что за последние годы в MIT, а также в других университетах США защищено несколько докторских диссертаций, посвященных этой тематике (Epstein A.H., Frechette L.G., Arnold D.P., Das S., Livermore C., Nagle S., Koser H.).

Следует отметить многочисленные разработки в области электростатических АМ. Другое название

таких АМ – «электроквасистатическая» или даже «электрическая асинхронная» машина (ЭСАМ). В отличие от ЭСАМ классическая АМ называется «магнитной асинхронной машиной». Отечественным специалистам в области электромеханики и электропривода ЭСАМ мало известны, так как не рассматриваются ни в общих вузовских курсах электрических машин и электромеханики, ни в курсах специальных электрических машин.

Электростатические АМ известны давно, однако до 80-х годов прошлого века не находили практического применения, и только развитие технологии по созданию кремниевых структур дало толчок для их широкого применения в МЭМС [34–37]. В отличие от классической АМ преобразование энергии в воздушном зазоре ЭСАМ происходит не электромагнитным, а электрическим полем. Обычно ЭСАМ имеет плоское (дисковое) исполнение, что позволяет изготовить очень тонкую (несколько миллиметров) микромашину, встраиваемую, например, в газовую микротурбину или микрокомпрессор.

В одной из конструкций ЭСАМ, разработанной в МИТ, на плоском статоре, основой которого является пластина из монокристаллического кремния (silicon), располагается больше сотни электродов, изолированных от кремниевого основания тонким слоем изоляции, например двуокиси кремния. На дискообразном роторе, выполненном из кристалла кремния, наносится тонкий слой высокоомного проводникового материала, например полисиликона, отделенного от кремния изоляционным слоем двуокиси кремния. К электродам статора подключен многофазный источник питания. Появление потенциала на электродах создает бегущую волну электрического поля, так как потенциал распределен по синусоидальному закону и его значение меняется в функции времени. Электрические заряды электродов наводят заряды противоположной полярности в проводниковом слое ротора, которые также образуют бегущее электрическое поле, складывающееся с полем статора. Тангенциальная составляющая силовых линий электрического поля создает вращающий момент, при этом ротор вращается со скоростью, отличающейся от скорости вращения электрического поля. Чем меньше зазор, тем больше вращающий момент и тем эффективнее ЭСАМ. При зазоре в несколько микрометров, ультравысоких скоростях и небольших (порядка десятка миллиметров) размерах ротора такая ЭСАМ имеет удельную мощность, сопоставимую с удельной мощностью крупных турбомашин, достаточно высокий КПД и сопоставима по другим показателям с магнитной АМ.

Рассмотрим данные опытного образца ЭСАМ, разработанного в МИТ, который предназначен для микрокомпрессора. Ротор и статор дискообразные, имеют диаметр 4 мм, воздушный зазор $\delta=4$ мкм. На поверхности статора, обращенной к ротору, расположены 768 радиальных электродов на расстоянии 4 мкм друг от друга, к электродам подключены 6 фаз от полупроводникового преобразователя. Число пар полюсов обмотки статора $p=131$, напряжение 80 В (у базового варианта 300 В), частота $f=2,6$ МГц. Толщина изоляции статора 10 мкм, сопротивление проводящего слоя ротора (полиселен) 200 МОм, а его толщина 0,5 мкм.

Синхронная частота вращения $1,2 \cdot 10^6$ мин⁻¹, максимальный вращающий момент $2 \cdot 10^{-6}$ Нм [38].

Сверх- и ультраскоростные магнитные (классические) АМ, аналогичные разрабатываемым в МИТ, целесообразно использовать как источники тока в диапазоне мощности 10–100 Вт для портативной электроники, а также в качестве двигателей микрокомпрессоров, в тепловых насосах и топливных элементах, для датчиков, робототехники и т.д. [39, 40, 41]. Такие АМ частотой вращения до 10^6 мин⁻¹ могут работать при температуре около 300 °С и имеют высокую удельную мощность.

По сравнению с ЭСАМ магнитные АМ (МАМ) имеют большую удельную мощность, больший воздушный зазор, что уменьшает потери на трение о воздух. Кроме того, они могут быть выполнены на больший ток, но меньшее напряжение, что упрощает и удешевляет силовую электронику агрегата; КПД МАМ по сравнению с ЭСАМ выше. С другой стороны, у МАМ более тяжелый ротор, худшие условия для работы подшипников, они не пригодны для работы в условиях высоких температур около 400 °С при установке в газовой турбине. Магнитная АМ может быть выполнена на гораздо меньшее число полюсов, чем ЭСАМ (например в 30 раз), что уменьшает частоту тока и упрощает работу электроники.

Один из последних опытных образцов МАМ, разработанных в МИТ совместно с учеными университетов Джорджии и Алабамы, предназначен для встраивания в газовую микротурбину, при запуске турбины работает в двигательном режиме и при достижении турбиной рабочей частоты вращения переводится в генераторный режим [40]. Машина изготовлена как слоистая структура из кремния по технологии DRIE (глубокое ионное травление). Турбина и МАМ выполнены в одном корпусе, набранном в виде штабеля из отдельных слоев (фигурных пластин) из кремния, скрепленных между собой. В пазах шихтованного сердечника статора уложена двухслойная двухфазная обмотка. Число витков на полюс и фазу равно единице. В пазу 2

проводника сечением $0,3 \times 0,035$ мм. Число полюсов обмотки 8, на полюс 2 паза. Сердечник статора шихтуется в радиальном направлении из пластин толщиной 30 мкм из сплава NiFe или CoFeNi и устанавливается на кремниевой пластине. Размеры статора $D_1=10$ мм, $l_1=1$ мм. Ротор кольцеобразный ($D_2=10$ мм, $D_{\text{внут}}=6$ мм) толщиной 0,25 мм. На стороне ротора, обращенной к статору, крепится медный диск толщиной 0,02 мм. Лобовые части обмотки статора имеют развитую поверхность для улучшения охлаждения. Подшипники газовые радиальные и упорные.

Недостатки МАМ по сравнению с ЭСАМ: увеличенные габариты, большие потоки пазового рассеяния и потери на вихревые токи, замыкающиеся по пластинам сердечника. Магнитные АМ могут развивать удельную мощность до 200 МВт/м^3 (что на уровне крупных машин), иметь КПД $> 50\%$ и мощность $P > 10$ Вт [41], частоту вращения – до 10^6 мин^{-1} при окружной скорости порядка 500 м/с [40].

Конкуренцию АМ во всем скоростном диапазоне представляют синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ). В нижнем диапазоне высоких скоростей и при мощностях в несколько мегаватт преимущество имеют СМПМ. В диапазоне частоты вращения $(20-60) \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$, в особенности для привода турбокомпрессоров, преобладают АМ мощностью $20-50 \text{ кВт}$ как с шихтованным, так и массивным ротором, но согласно [42] СМПМ всё-таки составляют конкуренцию АМ по предельной мощности. С помощью моделирования рассматривались механические и тепловые параметры. Выявлено, что предельная мощность СМПМ при $n=20 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ составит $P=1,5 \cdot 10^3 \text{ кВт}$, при $n=40 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ – $P=425 \text{ кВт}$, при $n=60 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ – $P=181 \text{ кВт}$, при $n=80 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ – $P=93 \text{ кВт}$, при $n=100 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ – $P=55 \text{ кВт}$. Следует учесть, что АМ в некоторых случаях дешевле СМПМ до 2 раз [4].

В диапазоне ультравысоких частот вращения для микроминиатюризации и мощности от микроватт до нескольких ватт преимущества имеют ЭСАМ и МАМ, в особенности при работе в условиях высоких температур. При мощности более 100 Вт преимущество имеют СМПМ.

В качестве опор для микромашин с частотой вращения до $400 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ устанавливаются подшипники как шариковые, так и с газовой смазкой (газовые). В нижнем диапазоне сверхвысокой частоты вращения для мощных АМ устанавливаются подшипники скольжения или же активные магнитные [11, 43, 44].

Выводы. 1. С развитием силовой полупроводниковой техники и новых технологий расширяется

область применения АМ как по диапазону мощностей, так и частоты вращения, в особенности ультравысокой. Разработаны миниатюрные АМ с частотой вращения до 10^6 мин^{-1} .

2. У производителей нет единого подхода по выбору конструкции ротора АМ. В диапазоне средних мощностей шихтованную конструкцию сердечника ротора используют до $60 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$, причем для стержней КЗО применяют медь, алюминий, титан, композиции металлов.

Массивный ротор применяется для всего диапазона сверхвысоких частот вращения. С целью улучшения энергетических показателей АМ в массивном роторе устанавливают беличью клетку, делают на периферии аксиальные каналы и устанавливают короткозамыкающие кольца, покрывают поверхность ротора медью или композицией металлов. Наилучшие результаты для массивного ротора обеспечивает установка беличьей клетки.

3. В диапазоне ультравысоких частот вращения для миниатюризации перспективны не только классические, но и электростатические АМ.

4. Основные научные исследования в области сверхскоростных АМ ведутся в университетах США, Финляндии, Германии и Швейцарии, причем в США основное внимание направлено на разработку и исследование миниатюрных АМ в диапазоне ультравысоких частот вращения, а в Финляндии – сверхскоростных АМ средней мощности, предназначенных в основном для турбокомпрессоров.

5. Россия значительно отстает от передовых стран в области разработки, исследования и производства сверхскоростных и в особенности ультраскоростных АМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаров В.С. Сверхвысокоскоростные асинхронные электродвигатели. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.
2. Антипов В.Н., Данилевич Я. Б. Быстроходные электрические машины для энергетики: состояние и тенденции развития. – Электротехника, 2007, № 6.
3. Шумов Ю.Н. Состояние и тенденции развития сверхскоростных электрических машин средней и большой мощности. – Приводная техника, 2009, №1 (77).
4. Soong W. L., Kliman G. B., Johnson R. N. et al. Novel high – speed induction motor for commercial centrifugal compressor. – IEEE Trans. Ind. Appl., 2000, vol.36, № 3.
5. Kim H.-K., Choi M.- C., Suh K.-H. et al. High speed induction motor development for small centrifugal compressor. – Proc. of the Fifth Inter. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 18–20 Aug. 2001, vol. 2.
6. Hupponen J. High speed solid rotor induction machine – electromagnetic calculation and design/Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology), Lappeenranta, University of Technology, Finland, 2004. Доступно на: http://www.lut.fi/technology / lutenergy / electrical _engineering /research/ electricaldrive
7. Grenzleistungsantrieb. – Elek. Masch., 1998, 77, № 10.
8. Wood B.M., Olsen C.L. et al. Development an 11000 r/min 3500 HP induction motor and adjustable speed drive for refinery service. – IEEE Trans. Ind. Appl., 1997, vol. 33, № 3.

9. Заявка №19935453 (Германия). Titan-Läufer.— Karl-Heinz Kemmerlich, Gummersbuch, Elektromotors Kemmerlich, 2000.
10. Hochgeschwindigkeitsmotoren mit Titan-Läufer — Elek. Masch., 1999, 78, №9.
11. Ahrens M., Birkle U., Gottkehaskamp R., Prenner H. Electrical design of high-speed induction motors of up to 15 MW and 20000 rpm. — Inter. conf. on power electronics, machines and drives, Bath, ROY AUME, 16 — 18 April 2002, vol. 487.
12. Nerg J., Pyrhonen J. Thermal design of a hermetically sealed turbogenerator operating in a small-power CHP plant. — 7th WSEAS Inter. conf. on Electric. Power Systems, High Voltages, Electric Machines. — Venice (Italy), Nov. 2007.
13. Ikeda M., Sacabe S., Higashi K. Experimental study of high speed induction motor varying rotor core construction. — IEEE Trans. on Energy Conversion, 1990, vol. 5, № 1.
14. Prenner H. Schnellaufende Hochleistungs-Asynchronmotoren: auf den Vergleich kommt et an. — Schweizer Maschinenmarkt, 1988, 88, №29.
15. Ляhteemäki J. Design and voltage supply of high-speed induction machines. — Acta politechnica scandinavica. El. eng. ser., № 10. Diss. HUT, Espoo, 2002.
16. Aho T., Nerg J., Pyrhonen J. Analysing the effect of the rotor coating on the rotor losses of medium-speed solid induction motor. — Inter. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (2006 SPEEDAM), Taormina, 23–26 May 2006.
17. Ляhteemäki J.K., Soitu V. Comparison of solid steel rotor with copper coating or with copper cage for 60 kW, 60000 rpm. — Inter. Conf. on Electrical Machines, Espoo, ICEM 2000.
18. Sharma H.D., Anbarasu R., Nataraj J. et al. Experimental investigations on high speed solid and composite rotor induction motor. — Proc. of the 1996 Inter. Conf. «Power electronics, drives and energy systems for industrial growth», New Delhi, Jan. 1996, vol. 2.
19. Pyrhonen J., Nerg J., Kurronen P., Lauber U. Highspeed, 8 MW, solid-rotor induction motor for gas compression. — 18th Int. Conf. on Elec. Mach.(ICEM 2008), Vilamoura, Sept. 2008.
20. Pyrhonen J., Nerg Y., Kurronen P., Lauber U. High -speed high-output solid rotor induction motor technology for gas compressor. — IEEE Tr. on Industrial Electronics, 2010, vol. 57, №1.
21. McBridge W.E., Franks J. 9500 hp high speed motor driven compressor. — Petroleum and Chemical Industry Conf. 2000, IAS 47th annual meeting.
22. Botte R., Boutriau L., Edebouw J.M., Gibon D. Douze ans d'experience dans les moteurs asynchrones de grande puissance a tres haute vitesse variable. — RGE, 1992, №1.
23. Gilon D.C. Design and test of a 6 MW, 10000 rpm induction motor. — Fifth Inter. Conf. on Electrical Machines and Drives (Publ. №341), 1991.
24. Jacquens S.-M. Rotor ferromagnetique massif: un moyen pour obtenir de fortes puissances a de grandes vitesses. — RGE, 1987, № 3.
25. Jokimovic G., Binder A. Additional no-load losses in inverterfed highspeed cage induction motors. — Electrical engineering (Archiv für Elektrotechnik), 2004, vol. 86, № 2.
26. Viggiano F. Aktive magnetische Lagerung und Rotorkonstruktion elektrischer Hochschwindigkeits-Antriebe. — Diss. ETH № 9746, Dr. Tech.Wiss., ETH Zurich. Доступно на: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:38709/eth-38709-02.pdf>
27. Jokinen T., Saari J. Modelling of the coolant flow with heat flow controlled temperature sources in thermal networks. — IEE Proc. Electr., Appl., 1997, vol. 144, №5.
28. Centner M. Entwurf und Erprobung schnell drehender asynchronmaschinen unter besonderer Berücksichtigung der magnetischen aktiven Materialien. Diss.Dr- Ing. Techn. Univ. Berling, 2009, Berlin. D83.
29. Spooner E., Bumby J.R. Solid-rotor axial-flux motors for very high-speed turbo-assist drives. — Electromotion, 2005, vol.12, №2 — 3.
30. Bart F., Lang J.H. An analysis of electroquasistatic induction micromotors. — Sensors and actuators, 19 November 1989, vol. 20, №1 — 2.
31. Epstein A.H., Jacobson S., Plotz J. et al. Shirtbutton -sized, micromachined, gas turbine generator. — 39th Power Sources Conf., Cherry Hill, NJ, 2000.
32. Jacobson S.A., Epstein A.H. An informal survey of power MEMS. — The Inter. Symposium on Micro-Mechanical Engineering (ISMME 2003 — K18), December 2003.
33. Savoulides N., Jacobson S. A., Li H. et al. Fabrication and testing of high-speed microscale turbocharger. — J. of Microelectromech. Syst., 2008, vol. 17, №5.
34. Stein J.L., Kendig S.H., Khanna P. et al. Generation electric power a MEMS electroquasistatic induction turbine-generator. — 18th IEEE Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2005), Jan. — Feb. 2005.
35. Alan H., Epstein A.H. Millimetr -scale, MEMS gas turbine engine. — Proc. of ASME Turbo Expo 2003 «Power for Land, Sea, and Air», Atlanta, Georgia, June 2003.
36. Shirtbutton-sized gas turbines: the engineering challenges of micro high-speed rotation machinery. — Proc. of 8th Inter. Symposium on transport phenomena and dynamics of rotating machinery (ISROMAC'8), Honolulu, January 2000.
37. Chapman P.I., Krein P.T. Micromotor technology: electric drive designers perspective. — Conf. record of the 2001 IEEE, Appl. conf. 2001, Thrity-sixth IAS annual meeting, Oct. 2001.
38. Nagle S.F., Livermore C., Frechette G. et. al. An electric induction micromotor. — J. of Microelectromech. Syst., 2005, vol. 14, №5.
39. Gros F., Koser H., Allen M.G. et al. Magnetic induction micromachine. Part 2: fabrication and testing. — J. of Microelectromech. Syst., 2006, vol. 15, №2.
40. Arnold D.A., Das S., Gros F. et al. Magnetic induction machines integrated into bulk-micromachined silicon. — J. of Microelectromech. Syst., 2006, vol. 15, №2.
41. Koser H., Lang J.H. Magnetic induction micromachine. Part 1: Design and analysis. — J. of Microelectromech. Syst., 2006, vol. 15, №2.
42. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola J. et al. Power limits of high-speed permanent magnet electrical machines for compressor applications. — Report Series on Electromechanics. Report 76. Aalto University, School of science and technology, Espoo, 2010. Доступно на: http://lib.tkk.fi/Diss/2010/isbn_9789526032801/article_7.pdf
43. Ehrich F., Jacobson S.A. Development of high-speed gas bearings for high-power density microdevics. — J. of engineering for gas turbine and power, 2003, vol. 125, №1.
44. Walter H., Moehle A., Bade M. Asynchronous solid rotors as high-speed drives in the mega-watt range. — IEEE Petroleum and Chemical Ind. Techn. Conf. (PCIC'07), Calgary, Sept. 2007.

[16.12.10]

Автор: Шумов Юрий Николаевич окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. В 1980 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование асинхронных генераторов». Профессор кафедры электрических машин Московского государственного открытого университета.