

Тихоходные электрические машины большой мощности

(Обзор зарубежных публикаций)

ШУМОВ Ю.Н., САФОНОВ А.С.

Дан обзор зарубежных публикаций по мощным тихоходным электрическим машинам (до 30 МВт, 300 мин⁻¹). Показаны конструктивные особенности гребных электродвигателей подводных лодок и надводных кораблей, а также ветрогенераторов наземных и морских ветроустановок. В системах электропривода гребных винтов асинхронные и синхронные двигатели мощностью более 1 МВт вытеснили двигатели постоянного тока. Безредукторный электропривод широко распространен в системах электродвижения кораблей и подводных лодок, а также в ветроэнергетике. В конце статьи кратко сформулированы основные конструктивные и технологические особенности проектирования и создания мощных тихоходных электрических машин.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тихоходные электрические машины, области применения, особенности проектирования, технология изготовления, перспективные направления развития

Условимся считать тихоходными электрические машины (ЭМ) с частотой вращения до 300 мин⁻¹. Такие ЭМ мощностью до 30 МВт находят применение в качестве генераторов (Г) в ветровых электроустановках, гребных электродвигателей (ГЭД) на кораблях, реже – для привода крупных мельниц для помола руды, прокатных станков, генераторов небольших гидроэлектростанций.

В конце 2015 г. годовое производство электроэнергии ветроустановками составило 435 ГВт, что составляет 7% общего объема ее производства. В 2015 г. этот объем увеличился на 64 ГВт, годовой рост составил 17,2%. По прогнозам, к 2030 г. объем ветроэнергетики достигнет 977 ГВт, причём 905 ГВт будет произведено на суше и 72 ГВт морскими установками.

Мощность ветрогенераторов непрерывно возрастает от среднего значения 0,05 МВт в 1985 г. до 3 МВт в 2017 г. Наибольшая мощность установленных ветрогенераторов составляет 8 МВт. Ожидается, что выход на рынок ветрогенераторов 10 МВт произойдет в начале 2020-х годов, а 15 МВт – в 2030-х годах.

Быстро развивается ветроэнергетика стран Северной Европы. Так, к лету 2019 г. компания AZ SEA установит 102 ветроустановки фирмы Siemens единичной мощностью 7 МВт в Северном море. Суммарная мощность ветропарка составит 714 МВт. Компания Mercur Offshore приобретает у GE Renewables 66 ветроустановок суммарной мощностью 396 МВт для ветропарка в германской экономической зоне Северного моря до 2019 г. [1].

В 2015 г. ветроустановки поставили фирмы: GE Wind – 3468 МВт, Vestas – 2870 МВт, Siemens – 1219 МВт, Acciona – 465 МВт, Gamesa – 420 МВт, Nordex – 138 МВт, Sany – 20 МВт, Gold Wind – 8 МВт [1–3].

Одна из тенденций в ветроэнергетике – увеличение мощности ветроустановок, а следовательно, ветрогенераторов. Наиболее популярные на рынке ветроустановки мощностью 3–5 МВт. Другая тенденция – рост как числа, так и мощности ветроустановок, устанавливаемых в море (offshore) на глубине до 50 м; так как годовая выработка электроэнергии в море выше, выбор места их установки по экологическим соображениям проще и т.д.; размер площадей для ветропарков с размещением в одном месте до 50 ветроустановок на суше ограничен. Для морских установок оказывается выгодной единичная мощность 8–10 МВт и более; прогнозируется увеличение такой мощности до 15–20 МВт. Для крупных ветроустановок критичной становится масса в верхней части башни ветроустановки с гондолой и ветрогенератором. Если масса этой части будет уменьшена за счёт генератора и редуктора (при его наличии), то это обеспечит значительное уменьшение затрат на башню ветроустановки, фундамент и монтаж.

Еще одна тенденция – увеличение числа установок с безредукторным, прямым приводом генератора. Это особенно касается морских ветроустановок, так как они работают в более жестких условиях, чем наземные (onshore). Отказ от редуктора увеличивает надежность ветроустановки, облегчает регламентные работы. Ремонт редуктора означает его демонтаж и транспортировку на берег. Отрицательная сторона безредукторного привода – большая масса генератора. При частоте вращения 8–20 мин⁻¹ необходим большой диаметр (до 12–15 м), что затрудняет монтаж и увеличивает размеры гондолы.

В [4] проведено сравнение путем моделирования безредукторного варианта привода синхронного генератора с постоянными магнитами (СПМ) при $P=3$ МВт, $n=15$ мин⁻¹ и варианта с одноступенчатой редукцией.

пенчатым редуктором при передаточном числе $i=6$. Данные СГПМ для безредукторного привода: $D_i=5$ м; $l_\delta=1,5$ м; $20=160$; масса магнитов $G_M=1,7$ т; общая масса $G=24,1$ т. Вариант с редуктором: $n=90$ мин⁻¹; $D_i=3,6$ м; $l_\delta=0,4$ м $2p=112$; общая масса $G=6,11$ т; масса магнитов $G_M=0,41$ т [4, 5].

В последнее время наблюдается тенденция к замене высокоскоростных электрических машин ($n=1500\div 1000$ мин⁻¹) с повышающим редуктором на безредукторный привод с тихоходной ЭМ. В частности, это имеет место в ветроэнергетике. Преимущества безредукторного привода: уменьшение числа подшипников, повышение надежности, упрощение обслуживания. Недостатки: увеличение массы и габаритов тихоходной ЭМ, ухудшение использования магнитных материалов. Поэтому возможно компромиссное решение: не двух-, трехступенчатый редуктор, а одноступенчатый. При таком подходе ЭМ будет иметь повышенные частоту вращения и надежность, меньшее число деталей. Такой подход применила компания Multibrid (Германия) для ветроустановки 5 МВт Areva – Multibrid. Одноступенчатый редуктор, передаточное число которого равно примерно 6, турбина имеет один главный подшипник при отсутствии главного вала, а масса гондолы с ЭМ меньше, чем при редукторном варианте [6].

В ветроэнергетике СГПМ постепенно вытесняют в диапазоне мощностей более 2 МВт асинхронные генераторы двойного питания (АГДП) с обмоткой на роторе и контактными кольцами и синхронные генераторы с обмоткой возбуждения на роторе (СГОВ). К ветровому колесу (турбине) АГДП присоединяется через трехступенчатый редуктор и выполняется на частоту вращения 1000–1500 мин⁻¹ при частоте сети 50 Гц и частоте вращения ветрового колеса 12–20 мин⁻¹. Самые мощные АГДП производит RePower (6 МВт). Ветроустановки с АГДП мощностью 2–6 МВт производят также DeWind, Gamesa, Suzlon, Nordex, Ecotecnica, GE Vestas.

Преимуществом АГДП является относительно небольшая мощность полупроводникового преобразователя (ПП), который включается в цепь ротора при 25–30% полной мощности АГДП. Недостатки: наличие многоступенчатого редуктора, что снижает надежность, усложняет обслуживание; наличие контактных колец требует регулярного обслуживания и является фактором, уменьшающим надежность; сложность схемы управления для предотвращения нарушений в сети [5]. Для безредукторного привода АГДП не пригоден, так как тихоходный АГДП на 12–20 мин⁻¹ имел бы очень низкие энергетические показатели.

Синхронные генераторы с обмоткой возбуждения (СГОВ) выпускаются Enercon ($P=4,5$ МВт и

7,5 МВт), DeWind (2 МВт), Mitsubishi (2,4 МВт), MTOI (1,6 МВт) при $n=10\div 20$ мин⁻¹ в составе системы безредукторного привода. Генератор производства Enercon E-136 мощностью $P=7,5$ МВт имеет диаметр 10 м и массу 220 т. Преимущество перед СГПМ – отсутствие притяжения между статором и ротором, что, в частности, усложняет монтаж ЭМ; отпадает потребность в дорогих редкоземельных постоянных магнитах (ПМ). Недостатки: считается, что СГОВ имеет большую массу и габариты по сравнению с СГПМ и более низкий КПД; наличие контактных колец снижает надежность и усложняет обслуживание; потери в ОВ уменьшают КПД по сравнению с СГПМ и затрудняют вентиляцию [5].

Электрические машины с постоянными магнитами (ЭМПМ) можно классифицировать по направлению магнитного потока: с радиальным потоком (РЭМПМ), с аксиальным потоком (АЭМПМ), с поперечным потоком (ЭМПП). Наибольшее распространение получили РЭМПМ. В большинстве конструкции этих электрических машин магниты размещаются на периферии ротора. Такие электрические машины развивают больший удельный момент, чем СМОВ. Например, National Renewable Energy Laboratory (NREL) разработала с использованием моделирования проект СГПМ для ветроустановки со следующими данными: $P=10$ МВт, $n=10$ мин⁻¹, $D_i=9$ м, $l_\delta=1,81$ м, $B_\delta=0,88$ Тл, $A=60$ кА/м, $f=23,66$ Гц, $j=3,7$ А/мм², $2p=284$, $z=852$, $\delta=9$ мм, $G=241,97$ т, общая стоимость материалов (в ценах 2016–2017 гг.) 0,668 млн долл. [7].

Машины с аксиальным потоком имеют следующие преимущества: простота обмотки, малые значения пульсирующего момента и магнитного шума, небольшая аксиальная длина, большой удельный момент (Нм/м³). Недостатки аксиальных СЭМ: большой наружный диаметр, повышенный расход ПМ, трудность стабилизации воздушного зазора при большом диаметре, технологические трудности изготовления сердечников статора при наличии пазов [5]. Только некоторые компании производят мощные аксиальные тихоходные ЭМ. Часто это демонстрационные образцы. Так, Kaman Aerospace Corp. (США) разработала СД такого типа для электродвижения судов ($P=19$ МВт). Этот двигатель имеет 32 фазы, каждая из которых питается от ПП мощностью 600 кВт. Масса двигателя составляет около 50 т, а аналог (СДОВ) имеет массу 229 т [8]. В Univ. of Nebraska (США) разработан проект аксиального СГПМ для ветроустановки, который имеет следующие показатели: $P=5$ МВт, $n=12$ мин⁻¹, $D_a=5$ м, $2p=500$, $z=750$ [8].

Машины с поперечным потоком ЭМПМ редко выполняются на большую мощность. Так, Rolls-Royce (Великобритания) разработала ДПП для привода гребного винта крупного судна:

$P=20$ МВт, $n=180$ мин⁻¹, $2p=130$, $f=195$ Гц, $m=8$, $U=5000$ В, число роторных дисков 4, ПМ – NeFeB, $D_a=2,6$ м, $l=2,6$ м, $G=39$ т [9].

В [10] на примере генератора для ветроустановки мощностью $P=5$ МВт и $n=12$ мин⁻¹ показано, что масса СГПМ с радиальным потоком будет равна 90,8 т, ГПП – 89,4 т, т.е. в данном случае по массе ГПП практически не имеет преимуществ. Но предложенная в [10] кольцеобразная конструкция обеспечивает массу ГПП в 60,5 т.

Электрические машины с постоянными магнитами (ЭМПМ) являются наиболее сложными по сравнению с классическими, имеют большие значения удельного момента и удельной мощности. К недостаткам относится низкий $\cos\varphi$, что увеличивает установленную мощность полупроводникового преобразователя (ПП) [11]. В простейшем случае ЭМПМ представляет собой электрическую машину с когтеобразными полюсами.

Разработкой и производством мощных тихоходных СДПМ занимается, например, Siemens (Германия). Первый СДПМ этой фирмы, предназначенный для надводных судов, имел параметры: $P=1,1$ МВт, $n=230$ мин⁻¹, $D_i=1,5$ м, $l_\delta=0,54$ м, $m=6$, $2p=32$, $q=1$, $y=6$. Для уменьшения реакции якоря каждый полюс ротора, кроме ферромагнитных участков, содержит и немагнитные. Магниты расположены на поверхности ротора. Для уменьшения пульсационного момента полюса скошены. Статор состоит из восьми взаимозаменяемых модулей, причем каждый из них соответствует 4 полюсам, что позволяет делать ремонт на борту без демонтажа двигателя. Каждый модуль имеет 12 катушек обмотки, уложенных в 24 паза, причем обмотка однослойная неукороченная [9]. Следует отметить, что при $q=1$ МДС якоря содержит достаточно большие нечетные гармоники, которые могут вызывать потери в магнитах и нагревать их. Для уменьшения потерь и пульсационной составляющей момента используется скос полюсов ротора.

Концепцию модульной конструкции использует, например, The Switch в ветрогенераторах мощностью $P=3\div4$ МВт для прямого привода. В таких ГПМ статор выполняется из 12 независимых модулей, подключенных к разным ПП.

В 1980-х годах фирма Siemens, учтя опыт использования СДПМ в разных областях, разработала СДПМ с торговой маркой Permasyn, предназначенный для безредукторного привода гребного винта подводной лодки (ПЛ). Он устанавливался на ПЛ серий 212, 212А, 214, 216. Мощность электродвигателя зависит от типа ПЛ. Первоначально он выпускался на мощность 2 МВт, затем на 4 МВт, в последнее время – до 7 МВт. В процессе выпуска подвергался модернизации и доработке, были разработаны также палубные модификации

для надводных кораблей. Как утверждает производитель, Permasyn отличается малыми габаритами, высоким КПД, малыми уровнем шума, электромагнитного излучения и вибрации, имеет систему активной компенсации шумов. Permasyn по сравнению с СДПМ типа Magtronic (Франция) мощностью 3,3 МВт, устанавливаемом на ПЛ Scorpena, имеет КПД на 2,2% выше на высокой частоте вращения и 7% в диапазоне низкой частоты. Ротор имеет колоколообразную форму, что позволяет разместить силовую электронику внутри двигателя. Permasyn имеет 18 инверторных модулей, половина которых питается от разных источников. Инверторы регулируют значение и форму кривой напряжения. Полюса монтируются на поверхности колоколообразной части ротора, ПМ устанавливаются на поверхности полюсов [12–14].

Тихоходные мощные электродвигатели применяются для электродвижения крупных кораблей. Для привода ПЛ используются электродвигатели мощностью до 30 МВт, для надводных кораблей – до 40 МВт при частоте вращения 100÷200 мин⁻¹. По мнению многих производителей ПЛ, СДПМ являются лучшими гребными электродвигателями (ГЭД) и вытесняют другие типы машин. Так, Siemens использовала систему постоянного тока SYNAVY DC электродвижения судов [14]. В этой системе якоря двух электродвигателей постоянного тока суммарной мощностью 2 МВт смонтированы на общем валу. Такой системой оборудованы 140 ПЛ, в частности ПЛ серии 209. Однако серии 212, 212А, 214, 216 оборудованы уже системой переменного тока SYNAVY– Permasyn с СДПМ [8]. Системы электродвижения с ДПМ мегаваттного диапазона используют также фирмы ABB, Rolls-Royce, Jemont Electric, Fuji Electric, Kaman Aerospace Corp., General Dynamics Marine Division, China Shipbuilding Industry Corp., General Dynamics, Converteam, GE Power.

Тихоходные мощные электродвигатели находят применение для винторулевых колонок (ВК), которые представляют собой систему привода гребного винта с ГЭД, расположенным вне корпуса судна в гондоле (POD). В простейшей конструкции гондола установлена на стойке, которая крепится к корпусу судна. Гребной винт установлен на валу электродвигателя. В большинстве конструкций стойка вместе с гондолой может поворачиваться на угол 360° вокруг вертикальной оси, что обеспечивает судну маневренность. Мощность ГЭД для ВК до 30 МВт, частота вращения 100÷200 мин⁻¹. Электрическая схема ВК содержит электродвигатель, трансформатор, полупроводниковый преобразователь.

Крупнейшими производителями ВК являются ABB и Rolls-Royce. Первая выпускает ВК с торго-

вой маркой Compact Azipod до 5 МВт и Azipod от 5 до 27 МВт. Rolls-Royce выпускает Mermaid на мощность от 6 до 27 МВт и $n=90\div 210$ мин⁻¹. В качестве ГЭД фирма АВВ устанавливает на Azipod СДОВ, на Compact Azipod – СДПМ. Rolls-Royce устанавливает на Mermaid СДОВ. Siemens совместно с Schrottell (торговая марка SSP) выпускают ВК с ГЭД мощностью от 1 до 30 МВт, тип – СДПМ.

В ВК применяются АД, СДОВ, СДПМ, а сами винтовые колонки устанавливают на ледоколах, круизных лайнерах, на судах, от которых требуется маневренность. Например, круизный лайнер Queen Mary 2 оборудован четырьмя ВК. Асинхронный двигатель серии АИМ, производимый Alstom, в каждой ВК развивает мощность 21,5 МВт. Суммарная мощность этих ВК – 86 МВт, масса каждой ВК – 250 т.

Alstom Corporation (теперь Converteam) разработала серию тихоходных АДКЗ Advanced Induction Motors (АИМ). В 1995 г. АИМ были приняты ВВС США в рамках программы объединённых энергетических систем кораблей (IPS Programm) и также предназначены как главные ГЭД для эсминцев проекта 45 (Великобритания). По удельному вращающему моменту эти двигатели близки к СДПМ. Первоначально для эсминцев класса Zumwalt (США) планировалось использовать в качестве ГЭД синхронные двигатели, но затем для эсминцев проекта DD1000 было решено устанавливать АИМ ($P=19$ МВт, $n=150$ мин⁻¹) [8]. Для эсминцев проекта 45 эти электродвигатели имеют показатели $P=20$ МВт, $n=180$ мин⁻¹.

Конструкция АИМ спроектирована так, чтобы уменьшить шум и вибрацию. Частота и амплитуда шума минимальны благодаря выбору благоприятного соотношения пазов статора и ротора, полюсов, фаз. Для уменьшения вентиляционного шума вентиляция регулируется; АИМ по сравнению с СДПМ на 15% дешевле и имеет меньшую массу. Так, АИМ на $P=20$ МВт, $n=180$ мин⁻¹ имеет массу около 80 т, а аналогичный СДПМ – около 100 т.

Непрерывно совершенствовались АИМ для удовлетворения следующих требований, предъявляемых ГЭД: высокая надежность, минимальный шум, противостояние ударам. Одно из преимуществ АИМ – механическая простота. Это обуславливает надежность, противостояние ударам, ограничение структурного шума до приемлемого уровня. Для увеличения надежности АИМ выполняется по модульному принципу с пятнадцатью фазами, которые через независимые преобразователи питаются от разных источников. При выходе из строя одного модуля остальные поддерживают работоспособность двигателя [15].

Converteam продолжила работу Alstom над АИМ и производит их, как Advanced Propulsion Motors

(АРМ). Так, выпускается АРМ на $P=15$ МВт для военных кораблей; АРМ занимают на 40% меньший объем, чем современные АД, развивают удельную мощность, в 3 раза большую, чем ДПТ, благодаря запатентованной технологии. Блок ПП установлен внутри корпуса АД и имеет жидкостное охлаждение. Converteam произвела для круизного лайнера Norwegian Epic асинхронный двигатель на 24 МВт, $n=130$ мин⁻¹, причём он питается от ПП с ШИМ [15, 16].

Мощность генератора с прямым приводом $8\div 10$ МВт для ветроустановок оказывается предельной из-за значительной массы (до 250 т), поэтому появились проекты и проводятся исследования, рассматривающие альтернативные конструкции, позволяющие уменьшить массу. К ним относится применение сверхпроводящей ОВ или методы интенсивного охлаждения, например непосредственное жидкостное. Использование сверхпроводящих обмоток из высокотемпературных сверхпроводников позволяет уменьшить общую массу системы приблизительно на 50%, но при современной технологии сверхпроводимости не позволяет выпускать изделия на рынок и организовывать промышленное производство. Применение жидкостного непосредственного охлаждения дает возможность увеличить по сравнению с традиционными конструкциями линейную нагрузку A и плотность тока в обмотке j . Однако при таком увеличении нагрузок возрастают потери, а КПД уменьшается по сравнению с аналогами на 2÷3%. Поэтому все упомянутые проекты остаются на опытном или демонстрационном уровне.

Улучшение массогабаритных показателей электрических машин за счет интенсивного охлаждения рассмотрено в [17]. Предложена новая система непосредственного жидкостного охлаждения. На дне паза статора делают каналы, по которым пропускается охлаждающая жидкость. В середине паза между двумя слоями обмотки располагается теплоотводящий массивный стержень. Предложенная система охлаждения рассматривается на примере проекта СДПМ, предназначенного для системы ГЭД корабля. Моделировался нагрев отдельных частей в магнитной цепи. Некоторые показатели этого электродвигателя: $P=10$ МВт, $n=130$ мин⁻¹, $D_i=1,83$ м, $l=0,51$ м, $j=9,5$ А/мм², КПД = 97%, $G=22$ т.

Утверждается, что удельная мощность СДПМ с предлагаемой системой охлаждения в 2 раза больше, чем у СД со сверхпроводящей обмоткой возбуждения ($P=36,5$ МВт), установленного на эсминце класса DD1000 Zumwalt (США) и в 3÷4 раза больше, чем у аналогов с обычной системой охлаждения. Однако при принятых больших электромагнитных нагрузках должны быть велики потери в меди, поэтому КПД окажется гораздо меньше.

Следует учесть, что столь значительного улучшения массогабаритных показателей за счёт использования непосредственного жидкостного охлаждения достичь невозможно (см., например, [18]).

В Lapperanta Univ. of Technology (Финляндия) разработан проект для ветроустановки СГПМ с жидкостным непосредственным охлаждением [19]. Охлаждающая жидкость пропускается по полым проводникам. Принята конструкция с внешним ротором, так как на роторе СГПМ можно устанавливать ветровое колесо, а ПМ центробежным усилием прижимаются к сердечнику ротора. Некоторые данные этого генератора: $P=8$ МВт, $n=11$ мин⁻¹, $U_{л}=3,3$ кВ, $f=11$ Гц, $D_i=6,93$ м, $l_{\delta}=1,15$ м, $z=144$, $2p=120$, $\delta=8,5$ мм. Обмотка концентрическая зубцовая, $q=2/5$, $A=138$ кА/м, $j=4,8$ А/мм². Сердечники статора и ротора шихтованные и состоят из 12 сегментов (модулей). Каждый сегмент содержит 12 статорных зубцов и 10 полюсов; $G_{ПМ}=4,5$ т, $G_{Fe}=40$ т, $G=92$ т, $\Sigma П=651$ кВт, КПД=92,6%. Следует отметить, что КПД спроектированного СГ ниже, чем у аналогов, в том числе редукторного варианта с АГ и безредукторного СГОВ. Это можно объяснить завышенным значением линейной нагрузки A . Хотя это и обеспечивает снижение массы и габаритов, но требует усиленной вентиляции и обуславливает значительные потери в меди.

Выводы. 1. Электрические двигатели мощностью более 1 МВт, как асинхронные, так и синхронные, практически вытеснили коллекторные машины постоянного тока в системах электропривода гребных винтов кораблей и подводных лодок.

2. В качестве генераторов для крупных ветроустановок используются как асинхронные машины двойного питания (с фазной обмоткой ротора) при мощности до 5 МВт, так и синхронные машины с обмоткой возбуждения; однако в основном, особенно при мощности более 3 МВт, – синхронные машины с постоянными магнитами.

3. В системах электродвижения надводных кораблей и подводных лодок, а также генерирования ветроэлектроэнергии увеличивается применение безредукторного привода.

4. В ветроэнергетике на данный момент предельной является мощность 10 МВт, прогнозируется, что к 2020–2030 гг. мощность увеличится до 15÷20 МВт.

5. В качестве постоянных магнитов в большинстве конструкций синхронных машин используются NdFeB и только некоторые производители применяют SmCo.

6. Для тихоходных синхронных ветрогенераторов выбирается частота тока более 10 Гц, применяется дробное значение числа пазов на полюс и фазу и менее 1 с целью использования концентри-

ческой обмотки с минимальной длиной лобовых частей. Путем моделирования для таких генераторов выбирается оптимальным число фаз и полюсов.

7. Для гребных электродвигателей винтов используются модульные конструкции с числом фаз до 15 с целью увеличения надежности.

8. Применяются конструктивные меры для снижения уровня вибрации, структурного, электромагнитного и вентиляционного шума, а также противостояния ударам и уменьшения пульсационной составляющей момента.

9. Некоторые производители и исследователи ищут пути увеличения электромагнитных нагрузок за счет использования интенсивного охлаждения или применения высокотемпературных сверхпроводников. Однако пока эти разработки не имеют коммерческого успеха и носят демонстрационный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **The Offshore Wind Farm** [Электрон. ресурс] <https://www.merkur-offshore.com/company/> (дата обращения 06.04.2018).
2. **2015 Wind technologies market report word energy resources** [Электрон. ресурс] https://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2017/03/WEResources_Wind_2016.pdf (дата обращения 12.05.2018).
3. **A2SEA Hired to Install 102 East Anglia ONE Turbines** [Электрон. ресурс] <https://www.offshorewind.biz/2016/11/01/a2sea-hired-to-install-102-east-anglia-one-turbines/> (дата обращения 27.04.2018).
4. **Polinder H. et. al.** Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines/IEEE Transactions on Energy Conversion (Vol. 21, Iss. 3, Sept. 2006), 725–733 [Электрон. ресурс] <https://ieeexplore.ieee.org/document/1677663/> (дата обращения 28.04.2018).
5. **Keysan O.** Future electrical generators // technologies offshore wind turbine Engineering & technology reference 2015, t 1 [Электрон. ресурс] <https://energyhub.theiet.org/users/60216-ozan-keysan/posts/19442-future-electrical-generator-technologies-for-offshore-wind-turbines> (дата обращения 13.05.2018).
6. **Li H., Chen Z., Polinder H.** Optimization of Multibrid Permanent-Magnet Wind Generator Systems. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 24(1):82 – 92 · April 2009 [Электрон. ресурс] https://www.researchgate.net/publication/224385004_Optimization_of_Multibrid_Permanent-Magnet_Wind_Generator_Systems (дата обращения 21.06.2018).
7. **Sethuraman L., Dykes K.** (September 2017) GeneratorSE: A Sizing Tool for Variable-Speed Wind Turbine Generators. NREL/TP-5000-66462, doi:10.2514/6.2017-1619 [Электрон. ресурс] <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67444.pdf> (дата обращения 14.06.2028).
8. **Bassham B.A.** An evaluation electric motors for ship propulsion. June 2003 [Электрон. ресурс] <http://www.fourwinds10.com/resources/uploads/files/motors.pdf> (дата обращения 29.04.2018)
9. **Gieras J.F.** Permanent magnet motor technology: design and applications 2010. – CRC Press.
10. **Babg D. et al.** Ring-shaped transverse flux PM generator for large direct-drive wind turbines. – 2009 Intern. conf. on power electronics and drive systems, PEDS 2009.
11. **Design of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines: Low Speed, High Torque Machines – Generator for Direct Driven Wind Turbine- Motor for Rim Driven**

Thruster / Thesis for the degree of PhD, Trondheim, NUST [Электрон. ресурс] <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/256994> (дата обращения 01.07.2018).

12. **Sinavy** permasyn [Электрон. ресурс] <http://manualzz.com/doc/8578626/sinavy-permasyn> (дата обращения 23.05.2018).

13. **The driving** factor in the SEA 1000 Choice. The submarine propulsion chain / Asea Pacific Defence Reporter, Oct. 2015 [Электрон. ресурс] <https://corporate.siemens.com.au/content/dam/internet/siemens-com-au/root/aunz-defence-solutions/apdr-october-2015-issue-future-submarine.pdf> (дата обращения 01.06.2018).

14. **Sinavi DC-Prop** and Sinavy Permasin. Integrated Propulsion Solutions for Submarines [Электрон. ресурс] <https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/cc/InfocenterLanguagePacks/SINAVY%20DC-Prop%20and%20SINAVY%20PERMASYN%20AE/sinavy-dc-prop-permasyn.pdf> (дата обращения 03.06.2018).

15. **Hodge C.G., Mattick D.J.** The electric warship then, now and later. INEC, 2008, Hamburg [Электрон. ресурс] <http://www.bmtdsl.co.uk/media/6097927/BMTDSL-Electric-warship-then-now-and-later-Compaper-INEC-Apr08.pdf> (дата обращения 11.05.2018).

16. **Converteam's** Advanced Propulsion Motor to Undergo Tests in 2010 [Электрон. ресурс] <https://www.naval-technology.com/news/news64321-html/> (дата обращения 30.05.2018).

17. **Optimum** Design of a Lightweight 10MW Propulsion Motor [Электрон. ресурс] http://www.lcdries.com/wp-content/uploads/2017/08/179529_IEEE_report.pdf (дата обращения 31.03.2018).

18. **Polikarpova M. et al.** Direct liquid cooling for an outer-rotor direct-drive permanent-magnet synchronous generator for wind farm applications // Electric Power Application IET. 2015, vol. 9, No. 8, 523–532 [Электрон. ресурс] <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa.2014.0342> (дата обращения 24.05.2018).

19. **Wind Turbine** Direct-Drive Permanent-Magnet Generator with Direct Liquid Cooling for Mass Reduction. Tesis diss. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland on the 25th of June, 2014 [Электрон. ресурс] <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/97223/yulia%20vk%20A4%202010%206%20.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (дата обращения 07.05.2018).

[04.07.2018]

А в т о р ы: Шумов Юрий Николаевич окончил электромеханический факультет Московского энергетического института в 1960 г. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию «Теоретические и экспериментальные исследования асинхронных генераторов».

Сафонов Александр Сергеевич окончил энергетический факультет Московского государственного открытого университета в 1999 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры «Электротехника» Московского политехнического университета.

Elektrichestvo, 2019, No. 2, pp. 60–66

DOI:10.24160/0013-5380-2019-2-60-66

Low-Speed Large-Capacity Electrical Machines

SHUMOV Yury N. – *Cand. Sci. (Eng.), Pensioner*

SAFONOV Aleksander S. (*Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*) – *Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)*

Foreign publications on large-capacity low-speed electrical machines (up to 30 MW, 300 min-1) are reviewed. The design features of the propulsion electric motors for submarines and surface ships, as well as of the wind generators of terrestrial and marine windmills are shown. Induction and synchronous motors with a capacity of higher than 1 MW have expelled DC motors in the propeller electric drive systems. Gearless electric drives have found wide use in the electric propulsion systems of ships and submarines, and also in wind power engineering applications. In its final part, the article briefly outlines the main structural and technological features of designing large-capacity low-speed electrical machines.

Key words: *low-speed electrical machines, application fields, designing features, manufacturing technology, prospective development lines*

REFERENCES

1. **The Offshore** Wind Farm [Electron. resurs] <https://www.merkur-offshore.com/company/> (Data of appeal 06.04.2018).

2. **2015 Wind** technologies market report word energy resources [Electron. resurs] https://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2017/03/WEResources_Wind_2016.pdf (Data of appeal 12.05.2018).

3. **A2SEA Hired** to Install 102 East Anglia ONE Turbines [Electron. resurs] <https://www.offshorewind.biz/2016/11/01/a2sea-hired-to-install-102-east-anglia-one-turbines/> (Data of appeal 27.04.2018).

4. **Polinder H. et. al.** Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines/IEEE Transactions on Energy Conversion (Vol. 21, Iss. 3, Sept. 2006), 725 – 733 [Electron. resurs] <https://ieeexplore.ieee.org/document/1677663/> (Data of appeal 28.04.2018).

5. **Keysan O.** Future electrical generators // technologies offshore wind turbine Engineering & technology reference 2015, t 1 [Electron. resurs] <https://energyhub.theiet.org/users/60216-ozan-keysan/posts/19442-future-electrical-generator-technologies-for-offshore-wind-turbines> (Data of appeal 13.05.2018).

6. **Li H., Chen Z., Polinder H.** Optimization of Multibrid Permanent-Magnet Wind Generator Systems. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 24(1): 82–92. April 2009 [Electron. resurs] https://www.researchgate.net/publication/224385004_Optimization_of_Multibrid_Permanent-Magnet_Wind_Generator_Systems (Data of appeal 21.06.2018).

7. **Sethuraman L., Dykes K.** (September 2017) GeneratorSE: A Sizing Tool for Variable-Speed Wind Turbine Generators. NREL/TP-5000-66462, doi:10.2514/6.2017-1619 [Electron. resurs] <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67444.pdf> (Data of appeal 14.06.2018).

8. **Bassham B.A.** An evaluation electric motors for ship propulsion. June 2003 [Electron. resurs] <http://www.fourwinds10.com/resources/uploads/files/motors.pdf> (Data of appeal 29.04.2018)
9. **Gieras J.F.** Permanent magnet motor technology: design and applications 2010. – CRC Press.
10. **Babg D. et al.** Ring-shaped transverse flux PM generator for large direct-drive wind turbines. – 2009 Intern. conf. on power electronics and drive systems, PEDS 2009.
11. **Design** of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines: Low Speed, High Torque Machines – Gererator for Diriect Driven Wind Turbine- Motor for Rim Driven Thruster / Thesis for the degree of PhD, Trondheim, NUST [Electron. resurs] <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/256994> (Data of appeal 01.07.2018).
12. **Sinavy permasyn** [Electron resurs] <http://manualzz.com/doc/8578626/sinavy-permasyn> (Data of appeal 23.05.2018).
13. **The driving** factor in the SEA 1000 Choice. The submarine propulsion chain / Asea Pacific Defence Reporter, Oct. 2015 [Electron. resurs] <https://corporate.siemens.com.au/content/dam/internet/siemens-com-au/root/aunz-defence-solutions/apdr-october-2015-issue-future-submarine.pdf> (Data of appeal 01.06.2018).
14. **Sinavi DC-Prop** and Sinavy Permasin. Integrated Propulsion Solutions for Submarines [Electron. resurs] <https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/cc/InfocenterLanguagePacks/SINAVY%20DC-Prop%20and%20SINAVY%20PERMASYN%C2%AE/sinavy-dc-prop-permasyn.pdf> (Data of appeal 03.06.2018).
15. **Hodge C.G., Mattick D.J.** The electric warship then, now and later. INEC,2008, Hamburg [Electron. resurs] <http://www.bmtdsl.co.uk/media/6097927/BMTDSL-Electric-warship-then-now-and-later-Conpaper-INEC-Apr08.pdf> (Data of appeal 11.05.2018).
16. **Converteam's** Advanced Propulsion Motor to Undergo Tests in 2010 [Electron. resurs] <https://www.naval-technology.com/news/news64321-html/> (Data of appeal 30.05.2018).
17. **Optimum** Design of a Lightweight 10MW Propulsion Motor [Electron. resurs] http://www.lcdries.com/wp-content/uploads/2017/08/179529_IEEE_report.pdf (Data of appeal 31.03.2018).
18. **Polikarpova M. et al.** Direct liquid cooling for an outer-rotor direct-drive permanent-magnet synchronous generator for wind farm applications // Electric Power Application IET. 2015, vol. 9, No. 8, 523–532 [Electron. resurs] <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa.2014.0342> (Data of appeal 24.05.2018).
19. **Wind Turbine** Direct-Drive Permanent-Magnet Generator with Direct Liquid Cooling for Mass Reduction. Tesis diss. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland on the 25th of June, 2014 [Electron. resurs] <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/97223/yulia%20vk%20A4%202010%206%20.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (Data of appeal 07.05.2018).

[04.07.2018]