

## ЭКСПЕРТИЗА И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

### ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАШИН

**А.М. Тишин**, проф. физ. факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Группа компаний АМТ&С, д-р физ.-мат. наук

*Настоящая работа посвящена оценке предельно достижимой величины плотности мощности электромашин МВт-го уровня с использованием простых компоновочных допущений. Показано, что для увеличения, как плотности мощности, так и плотности крутящего момента, необходимо, помимо максимизации тангенциального напряжения сдвига в зазоре между ротором и статором, также увеличивать отношение между внутренним и внешним диаметром статора до максимально близкого к единице. Проведено сравнение полученных результатов с выводами аналитического исследования НАСА, основанного на прогнозе развития новых материалов, которые в будущем потенциально могут быть использованы при производстве электромашин. Выполнен сравнительный анализ опубликованных характеристик судовых электромашин и электроприводов МВт-го уровня, подтверждающий перспективность синхронных электромашин на постоянных магнитах.*

**Ключевые слова:** плотность мощности электромашин, отношение между внутренним и внешним диаметром статора, анализ характеристик судовых электромашин и электроприводов, синхронных электромашин на постоянных магнитах.

### THE ESTIMATION OF MAXIMUM POWER DENSITY AND A COMPARATIVE ANALYSIS OF MASS-DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MACHINES

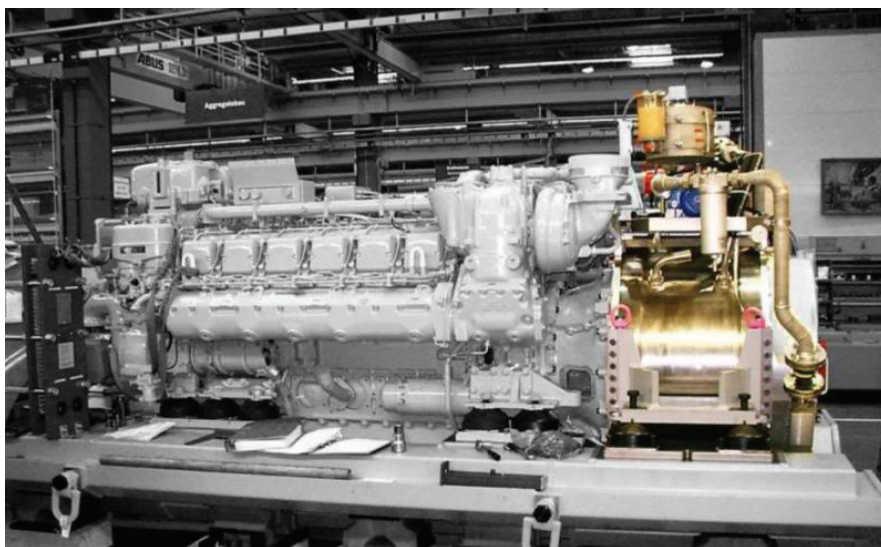
**A.M. Tishin**, Professor, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, AMT&C Group of Companies, Ph.D. of Physics and Mathematics

*The present work is devoted to the estimation of the maximum achievable value of power density of MW(Megawatt)-level electric machines using a simple layout assumptions. It is shown that to increase power density on the one hand and torque density on the other, it is necessary, in addition to the maximization of the tangential shear stress in the gap between the rotor and the stator, to increase the ratio between the inner and outer diameter of the stator to the maximum close to unity. A comparison is made of the obtained results with the conclusions of the analytical studies by NASA, based on the forecast for the development of new materials, which in the future can potentially be used in the production of electric cars. A comparative analysis is made of the published characteristics of marine electric machines and electric drives of MW-level, confirming the prospects of synchronous electric motors with permanent magnets.*

**Keywords:** power density electric machines, the torque density, ratio between the diameters of the stator, the forecast for the development of new materials.

Судовые электроприводы и генераторы производятся целым рядом крупных российских и зарубежных производителей. Так, например, компании Alstom, ABB, Rolls Royce-Convertteam, Siemens-Schottel и SAM Electronics-Wartsila Propulsion, Man и другие производят асинхрон-

ные (АЭ) и синхронные электроприводы [1]. Обычные судовые электрогенераторы выполнены на основе электромашин с частотой вращения  $n = 3600$  об/мин или 1800 об/мин и воздушным охлаждением [2]. Необходимо отметить, что в ряде случаев проектировщики выбирают готовые, смонтированные на одной платформе и уже оптимизированные генераторные модули. Так, например, компания Wärtsilä выпускает дизель-генераторные модули 2,85 МВт, 50 Гц (1000 об/мин) массой 45,7 т [3]. При этом использование синхронных электромашин на основе редкоземельных постоянных магнитов (СЭПМ) позволяет существенно снизить массогабаритные характеристики подобных генераторных установок (см. рис. 1).



**Рис. 1. Общий вид электрогенераторной установки компании Magnet-Motor GmbH на уровне 1.25–1.7 МВт. Полная длина дизельного электрогенератора около 3 м. Длина СЭПМ около 0.5–0.6 м (треть от традиционной АЭ)**

Мощность низкооборотных электромашин на основе постоянных магнитов достигла в 2006–2009 гг. уровня 36,5[4]–65 МВт [5] (см, например, рис. 2).

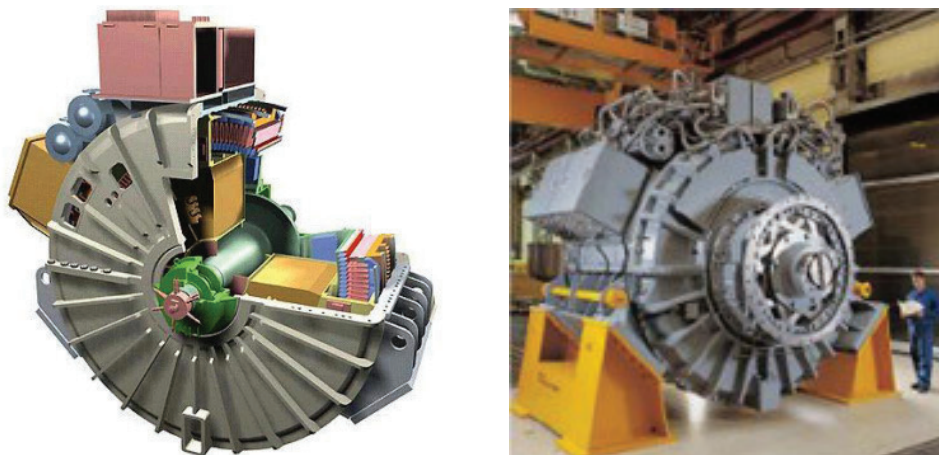
По сравнению с высокооборотными синхронными электромашинами с электромагнитным возбуждением и редуктором, низкооборотные СЭПМ позволяют уменьшить массу электропривода до 50 % и эффективность работы от 2–4 % до 15–30 % при полной и частичной нагрузке, соответственно [4]. Мощность синхронных генераторов на постоянных магнитах может достигать 40 МВт при частоте вращения  $n = 3600$  об/мин [6, 7] и уменьшается до 6 МВт для 17000 об/мин [8, 9].

Потенциал дальнейшего совершенствования (в первую очередь снижения массогабаритных показателей и увеличения КПД) мощных электрических машин мультимегаваттного уровня до сих пор недостаточно изучен. Как отмечалось ранее в нашей работе [10], удельная мощность перспективных моделей высокооборотных электрических машин, разрабатываемых для автомобильной промышленности на уровень мощности 40–100 кВт, в настоящее время достигает значений 4–5 кВт/кг и уровня 2,0 кВт/кг в расчёте на полную массу комплектных электроприводов при массовом производстве. Линейная аппроксимация первой величины на электромашину мощностью 1 МВт дает массу 200–250 кг (4–5 МВт/т). В тоже время удельная мощность большинства используемых в настоящее время промышленных электромашин МВт-го уровня составляет лишь 0,16 кВт/кг (0,16 МВт/т).



**Рис. 2. СЭПМ производства DRS Technologies, NJ, USA (36.5 МВт, 127 об/мин)**

Морской 8-ми фазный электропривод на постоянных магнитах с поперечным магнитным потоком мощностью 20МВт, разработанный компанией Rolls-Royce, Derby, UK имел массу 39 т, объем 12,6 м<sup>3</sup> и удельную мощность 0,513 кВт/кг (0.513 МВт/т) [11]. Малошумный СЭПМ с повышенной величиной плотности мощности был разработан компанией Siemens AG для гибридных подводных лодок (для подводной лодки длиной 100 м использовался дизель на 1,2 МВт и четыре электропривода по 1 МВт каждый) (см. рис 3.).



**Рис. 3. СЭПМ мощностью 1 МВт марки Permasyn для привода подводных лодок, разработанный компанией Siemens AG, Hamburg, Germany**

Вместе с тем, на основе анализа выполненного в отчете НАСА, авторы работы [12] делают вывод о том, что появление новых материалов (постоянных магнитов, проводников тока на основе углеродных нанотрубок, полупроводников изоляторов, теплообменных и других материалов и изделий на их основе) окажет крайне существенное влияние на массогабарит-

ные характеристики электромашин будущих электроприводов авиационного назначения и может привести к более чем пятикратному увеличению удельной мощности за 30-ти летний период и достижению в 2045 г. уровня удельной мощности 26 кВт/кг (26 МВт/т). Это равносильно тому, что электромашинная мощность 1 МВт будет иметь массу всего около 40 кг. Необходимо отметить, что частота вращения электромашин мульти МВт-уровня ограничена и не может превышать 20–25 тыс. об/мин на данном уровне развития техники, поэтому величины порядка 26 кВт/кг (26 МВт/т), которые уже сейчас достижимы для маломощных машин, являются весьма большими для электромашин МВт-го уровня. Мало того, достижения подобного уровня удельной мощности может устранить существующий зазор по удельной мощности и эффективности между некриогенными и проектируемыми криогенно охлаждаемыми электромашинными и накопителями на ВТСП материалах [12]. Однако, поскольку прогнозирование развития в области материаловедения является крайне сложной задачей, представляло интерес попытаться из самых общих соображений (без оценок уровня развития и свойств различных материалов на 30 летний период) оценить предельно достижимые значения удельной мощности электромашин, а также проанализировать, на базе имеющихся литературных данных, достигнутые в настоящий момент уровни плотности мощности судовых электрических машин мульти МВт-го уровня различных типов и сравнить их с известными значениями для электромашин, используемых в составе автомобильных и авиационных электроприводов.

Особый интерес к развитию электрических машин мульти МВт-го уровня определяется следующим обстоятельством. При линейном увеличении размеров электромашин, объем электромашин,  $V$ , будет возрастать по кубическому закону, в тоже время мощность,  $P$ , возрастает пропорционально произведению напряжения,  $U$ , на ток,  $I$ , или пропорционально четвертой степени габаритных размеров  $\sim U \times I \sim nDL \times D^2/n \sim LD^3$ , где  $D$  и  $L$  диаметр и осевая длина электромашин [13]. Таким образом, величина плотности мощности в первом приближении должна линейно возрастать для крупногабаритных электрических машин мульти МВт-го уровня при увеличении их диаметра. Следовательно, для таких электромашин при сравнимой частоте вращения, можно ожидать существенно больших значений как плотности мощности, так и удельной мощности в расчете на кг массы.

Мало того, все типы электрических машин и электромагнитных устройств показывают более низкое отношение мощности потерь к мощности на выходе с увеличением выходной мощности [4]. Это означает, что эффективность электродвигателей увеличивается с увеличением номинальной мощности, и, таким образом, большие бесщеточные двигатели на постоянных магнитах могут достигать более высокой эффективности, чем любой другой электродвигатель (кроме сверхпроводящих).

#### **Определение основных характеристик, влияющих на предельные величины плотности момента и плотности мощности**

При массовом производстве электроприводов гибридного электротранспорта максимальный крутящий момент должен быть обеспечен приводом требуется в течении не менее 18 сек и лежит в диапазоне 35–45 Нм/л (35–45 кНм/м<sup>3</sup>) [14] при плотности тока 20–26 А/мм<sup>2</sup> (45 Нм/л (45 кНм/м<sup>3</sup>) в течении 3 сек в стартерах при токе 50 А/мм<sup>2</sup> [14]), или до 35–70 Нм/л (35–70 кНм/м<sup>3</sup>) в приводах со встроенным магнитным редуктором. Если принять во внимание, что, как упоминалось выше, в разрабатываемых в настоящее время высокооборотных электромашинных со частотой вращения 5–10 тыс. об/мин, используемых в электроприводах электрических и гибридных автомашин достигнуты значения 5 кВт/кг (5 МВт/т) [15] или даже до 18 кВт/л (18 МВт/м<sup>3</sup>) в продолжительном режиме [14], то, в первом приближении, можно было бы ожидать, что при увеличении диаметра электромашин,  $D$ , в 5 раз (например, увеличение внешнего диаметра статора с 264 до 1320 мм), уже сейчас было бы возможно увеличить величину удельной мощности до уровня порядка 25 кВт/кг (25 МВт/т), те достигнуть уровня удельной мощности, который прогнозируется НАСА [12] только через 30 лет (а при

использовании будущих наноструктурированных постоянных магнитов — с плотностью мощности до 90 кВт/л (90 МВт/м<sup>3</sup>) полной массы электромашины.

При этом необходимо учитывать, что запасенная энергия возрастает как 5-я степень размера ( $\sim LD^4$ ) [13], что может привести к серьезным трудностям при поломках в случае отсутствия возможности быстрого перевода данной энергии в кинетическую (на пропульсивную нагрузку или электромеханические накопители) или тепловую формы. Повышение плотности мощности позволяет высвободить дополнительное место для этих целей.

При масштабировании электрических машин мы в первом приближении предполагали, что величины магнитной индукции в зазоре, плотности тока, скорости вращения и количество витков остаются постоянными. Однако, как будет показано ниже, данные параметры также требуют корректировки, так как, например, при увеличении размера в два раза необходимо снижение плотности тока на 20% и увеличение магнитной индукции в зазоре на 12% из-за уменьшения площади слотов [13]. Мало того, как мы покажем ниже, часто используемый конструкторами метод увеличения величины крутящего момента (пропорционального квадрату диаметра) и занятия всего доступного радиального компоновочного пространства (увеличение только диаметра статора) не может являться целью разработчиков электромашин с большой плотностью мощности и плотностью крутящего момента; необходимо также увеличивать отношение между внутренним и внешним диаметром статора до значения, максимально близкого к единице при сохранении или увеличении величины тангенциального напряжения сдвига в зазоре между ротором и статором. Массовое производство потребует также оптимизации соотношения диаметра и осевой длины статора, которое может существенно уменьшить массу меди используемой при производстве электромашин.

Попытаемся оценить предельно достижимые значения величины плотности мощности, исходя из более простых соображений, чем это делали авторы работы [12]. Как хорошо известно, крутящий момент,  $M$ , и мощность,  $P$ , электромашины определяется как:

$$M = Fr = \sigma S_r r = \sigma 2\pi l_r^2 = 2\sigma V_r \quad (1)$$

$$P = M\omega = 2\sigma V_r \omega = 2\sigma V_r 2\pi n / 60 = \pi^2 D_r^2 l_r n \sigma / 60 \quad (2)$$

где  $D_r$  и  $r$  наружный диаметр и радиус ротора в метрах,  $S_r$  — площадь ротора,  $V_r$  — объем ротора,  $l_r$  — максимальная длина магнитной системы ротора,  $\sigma$  — тангенциальное напряжение сдвига в зазоре между ротором и статором,  $\omega$  — угловая скорость в рад/с,  $n$  — частота вращения в об/мин.

Как видно из формул (1)–(2), при фиксированных геометрических размерах ротора, величины крутящего момента  $M$  и мощности  $P$  прямо пропорциональны значениям  $\sigma$  и  $\sigma l$ , соответственно, что и используется конструкторами на практике для увеличения величины плотности мощности. Так, например, расчеты для низкооборотных электромашин, выполненные в работе [16], показывают, что объем и масса 19 МВт-ной электромашины могут быть снижены в 1,73 и 1,53 раза соответственно при увеличении частоты вращения от 150 до 250 об/мин (в 1,66 раза) и при увеличении величины плотности мощности в 1,75 раза (с 0,28 до 0,49 МВт/м<sup>3</sup>). Отметим, что, вследствие низкой частоты вращения, данные значения на более чем на порядок величины ниже упоминавшихся выше величин, достигнутых для высокооборотных автомобильных электроприводов.

Более того, в линейке асинхронных электромашин компании Convertteam при увеличении частоты вращения от 127 об/мин (18,25 МВт, 115 т, 75 м<sup>3</sup>), до 150 об/мин (19 МВт, 119 т, 54,6 м<sup>3</sup>) и до 180 об./мин (20 МВт, 89 т, 35,6 м<sup>3</sup>) плотность мощности увеличивается от 0,24 до 0,35 и 0,56 МВт/м<sup>3</sup>; при этом удельная величина мощности в расчете на кг лежит в диапазоне 0,16–0,22 кВт/кг, что также как минимум на порядок величины ниже значений, достигнутых в настоящее время в автомобильной промышленности для высокооборотных электромашин (18 МВт/м<sup>3</sup> в продолжительном режиме [14]).

Вместе с тем, при проектировании судовых электромашин необходимо понимать, на улучшении каких конкретно характеристик надо концентрироваться для увеличения не абсолютных величин крутящего момента и мощности, а плотности крутящего момента и/или плотности мощности и чем определяются предельно достижимые значения данных величин, т. е. какие конкретно значения данных величин должны быть выбраны в качестве ориентиров при планировании дальнейших перспективных работ на долгосрочный период.

Оптимальное соотношение между внутренним и внешним диаметром статора зависит от количества полюсов и наличия ограничений на величину плотности тока и лежит в диапазоне от 0,25 до 0,55 для двухполюсной СЭПМ [17] и, например, увеличивается до 0,65 для четырехполюсной СЭПМ [18]. Принимая во внимание то обстоятельство, что величина максимального отношения внутреннего и внешнего диаметров статора не может достигать единицы (в данном случае, для случая внешнего статора, объем электромашин был бы равен объему ротора), а также то обстоятельство, что зазор между ротором и статором, как правило, не превышает нескольких миллиметров, мы можем сделать важный новый вывод, что предельные величины плотности крутящего момента и плотности мощности для электрических машин с одним внешним статором не могут превосходить значения  $2\sigma$  и  $2\sigma\omega$ , соответственно. Сделанное нами допущение является вполне обоснованным, поскольку коллективом конструкторов группы компаний «АМТ&С», под руководством А.Н. Дорошенко, в настоящий момент достигнуто значение величины отношения внутреннего и внешнего диаметров статора равное 0,78.

Таким образом, плотность мощности в первом приближении будет линейно возрастать при увеличении диаметра электромашин, о чем говорилось выше, но ее предельно достижимые значения определяются только величиной произведения угловой скорости вращения  $\gamma$  и напряжения сдвига  $\sigma$ . Поэтому, перспективные работы должны концентрироваться именно на увеличении произведения двух данных параметров и приближении соотношения между внутренним и внешним диаметром статора до максимально близкого к единице. Последнее легко понять, поскольку значение соотношения диаметров, близкое к единице снижает объем машины и, тем самым, увеличивает плотность мощности. При этом, увеличение соотношения между внутренним и внешним диаметром статора должно превышать возможное уменьшение величины  $\sigma$ . В данный вывод укладываются результаты работы [18], где показано, что для  $\sigma = 50 \text{ кН/м}^2$  и при учете эмпирического соотношения  $P \sim 1/n^3$ , мощность электромашин не может превышать 29 МВт. Отметим, что к 2002 г. величины напряжения сдвига для АЭ начали приближаться к значениям для СЭПМ (100 и 120 кН/м<sup>2</sup> соответственно) [19].

#### **Оценка предельно достижимых значений плотности крутящего момента и плотности мощности**

В сделанный в предыдущем разделе вывод укладывается увеличение удельной мощности с 1,11 до 1,6 кВт/кг [20] при увеличении частоты вращения электроприводов для гибридного автотранспорта (частота вращения в Toyota Prius 2010 г. повышена более чем в 2 раза с 6 до 13,5 тыс. об/мин по сравнению с моделью 2004 г. при сохранении количества пар полюсов  $p = 4$  и сохранении соотношения внутреннего и внешнего диаметра статора и сокращении его осевой длины в полтора раза). Эта же тенденция просматривается и при проектировании мощных МВт-ных высокоскоростных СЭПМ (см, например, рис. 4).

Однако, сильное повышение частоты вращения электропривода может потребовать использования, например, двухступенчатого механического редуктора, масса которого может в 5–6 раз превосходить массу самой электромашин и для больших мощностей достигать 140 тонн (см. рис. 5), что существенно снижает удельные мощностные характеристики комплектного электропривода и требует проектирования комплектных электроприводов, а не отдельной электромашин.

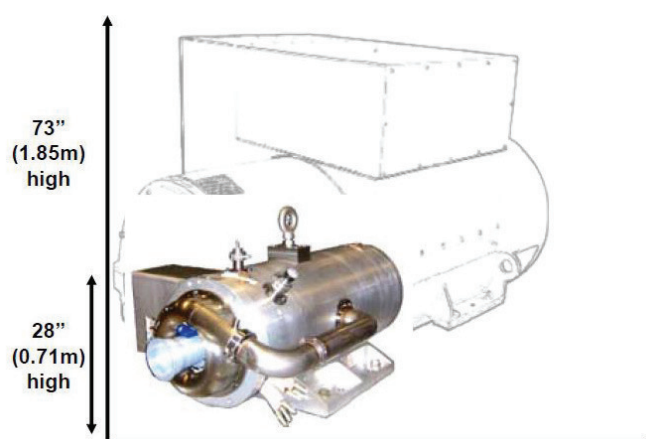


Рис. 4. Сравнение 2МВт-го высокоскоростного синхронного генератора на постоянных магнитах судового назначения компании Calnetix (фото на первом плане) с традиционным низкоскоростным генератором (на заднем плане) [21]

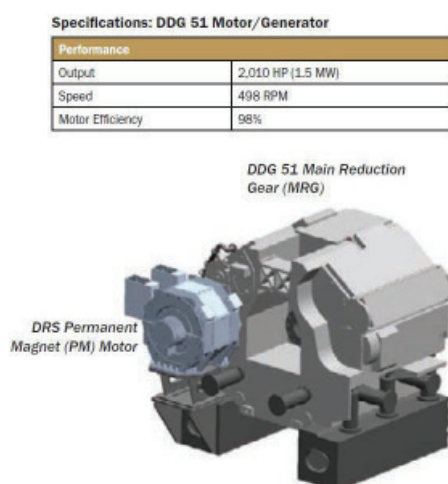


Рис. 5. Эскиз электропривода на основе СЭПМ производства компании DRS для DDG 51 (мотор-генератор мощностью 1.5 МВт 498 об./мин с КПД 98% с механическим редуктором)

При сравнении величин плотности крутящего момента и плотности мощности различных электромашин современные работы, как правило, используют только параметр  $\sigma$ , значение которого, в настоящее время, может достигать для водоохлаждаемых электромашин величины  $148 \text{ кН/м}^2$  [22] и  $340 \text{ кН/м}^2$  для сверхпроводящих электромашин [19], а также величину  $\omega$ . Однако рост величины  $\sigma$  должен, по крайней мере, опережать возможное снижение величины соотношения между внутренним и внешним диаметром статора или не приводить к уменьшению данной величины, а в идеальном случае две данные величины должны возрастать, поскольку, повторим еще раз, именно их произведение определяет предельно достижимые величины плотности крутящего момента ( $2\sigma$ ). Для увеличения плотности мощности ( $2\sigma\omega$ ) все вышесказанное относится еще и к величине  $\omega$ .

Например, для  $n \sim 10000$  об/мин ( $\omega \sim 1000$  рад/с) данные величины могут быть оценены для электромашин с жидкостным охлаждением как  $\sim 300$  кНм/м<sup>3</sup> и  $\sim 310$  МВт/м<sup>3</sup>, соответственно. Для  $n \sim 20000$  об/мин ( $\omega \sim 2000$  рад/с), что близко к предельно возможным частотам для МВт-ных электромашин с жидкостным охлаждением, данные величины могут быть оценены как  $\sim 300$  кНм/м<sup>3</sup> и  $\sim 620$  МВт/м<sup>3</sup>, соответственно. Однако необходимо учитывать, что даже использование углеродных материалов [23] вряд ли позволит в будущем увеличить соотношение внутреннего и внешнего диаметра статора до величин более чем 0,90–0,95, в противном случае это будет приводить к сильному снижению величины  $\sigma$ . Таким образом плотность момента может быть оценена как  $\sim 270$ – $285$  кНм/м<sup>3</sup>, а плотность мощности – как  $\sim 279$ – $295$  МВт/м<sup>3</sup> для  $n \sim 10000$  об/мин и  $\sim 560$ – $590$  МВт/м<sup>3</sup> для  $n \sim 20000$  об/мин.

Представляет также интерес оценить величину удельной мощности и сравнить полученные значения с данными работы [12]. Проведенный автором настоящей работы анализ более 70 представленных в списке литературы источников показал, что физическая плотность синхронных электромашин на постоянных магнитах приблизительно равна  $2.98$  т/м<sup>3</sup>. Таким образом, мы можем оценить предельный удельный момент и удельную мощность усреднено как  $\sim 90$  кНм/т и  $\sim 190$  МВт/т, соответственно. Последняя величина почти в 7 раз превышает данные, полученные в работе [12] (до 26 МВт/т за 30-ти летний период), и показывает потенциал возможного увеличения удельной мощности в более долгосрочной перспективе.

Очевидно, что в настоящий момент, в силу сделанных выше допущений, данные значения не только не могут быть достигнуты на практике, но и существенно превышают востребованный судовой компоновкой величины и могут являться только ориентиром для будущих разработок. Однако в случае дальнейшего развития технологий материаловедения и достижения на временном горизонте 25–30 лет существенно больших величин  $\sigma$  (например, на уровне  $200$  кН/м<sup>2</sup> для водоохлаждаемых электромашин) и/или уменьшения диаметра статоров за счет применения новых, практически бездефектных, углеродных материалов на основе углеродных нанотрубок и нанолент с допустимой плотностью тока в 1000 раз [12, 23] превышающих (порядка  $4 \cdot 10^9$  А/см<sup>2</sup>) значения для обычно используемых в высокоскоростных электромашин многожильных медных проводников, данные значения плотностей момента и мощности могут быть достигнуты не только теоретически. При этом необходимо отметить, что повышение плотности тока в совокупности с применением новых материалов для теплоотвода (например, углеродных пен) автоматически допускает дальнейшее увеличение величины  $\sigma$  и отношения внутреннего диаметра статора к внешнему. Достигнутая на практике (на опытно-промышленной установке) величина удельной электропроводности углеродных проводников уже превышает медные проводники [23]. Кроме того, они сочетают в себе прочность, жесткость и теплопроводность углеродных волокон с удельной электропроводностью металлов. Поскольку ожидается 84% уменьшение веса волокон по сравнению с медью [12], а в настоящее время масса меди может составлять от 20 до 50% от активной массы электромашин в зависимости от конструкции, то это автоматически приведет к дальнейшему увеличению удельной мощности. Поскольку параметры СЭПМ уже приближаются к сверхпроводящим электромашинам (см. рис. 6), то, как отмечалось выше, использование проводников тока на основе углеродных нанотрубок поставило бы также под вопрос целесообразность применения ВТСП материалов и сложного криогенного оборудования для их охлаждения в электромашинках.

Необходимо отметить, что компании General Nano LLC и NanoComp Technologis Inc уже начали поставку материалов различного назначения на основе углеродных нанотрубок для авиации и других отраслей техники. В целом изложение вопроса о проводниках является предметом отдельного рассмотрения, поскольку в последнее время с целью уменьшения веса, цены, повышения прочности и т.д. появились не только проводники с алюминиевой основой и медным покрытием, но и многожильные алюминиевые проводники и проводники из высокопрочных сплавов типа Cu-Be, CuCr, CuZr и т.д.



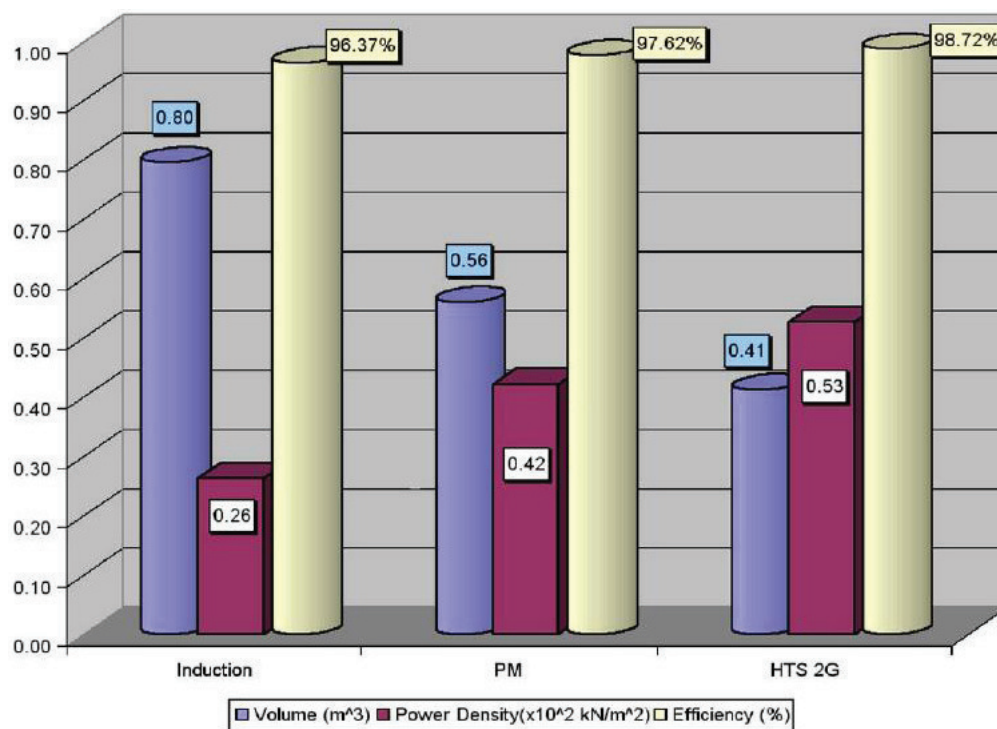


Рис. 6. Сравнение относительных значений объема, удельной мощности и КПД для АЭ, СЭПМ и сверхпроводящей электромашины для 3.68 МВт 1800 об/мин [24]

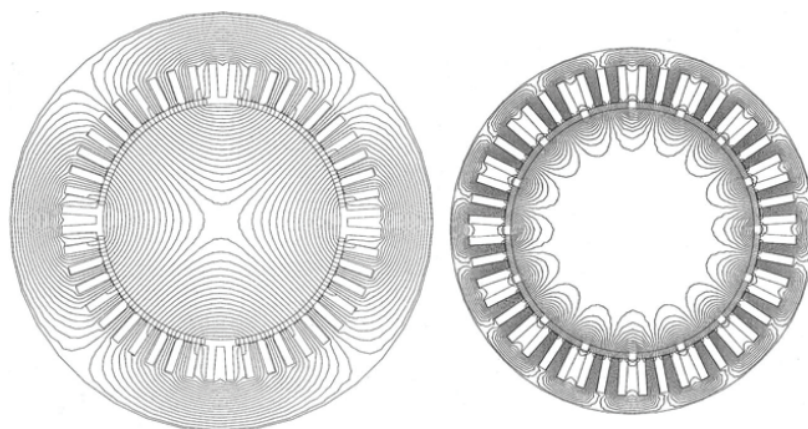
### Влияние количества пар полюсов на величины плотности крутящего момента и плотности мощности

Выше мы концентрировались на предельных значениях плотности крутящего момента и плотности мощности при предельном соотношении объемов ротора и статора, не обсуждая конкретные механизмы возможного увеличения данных величин. Одним из таких механизмов является оптимизация соотношения количества магнитных полюсов ротора и числа зубцов статора. Однако необходимо принимать во внимание существующие в настоящее время ограничения, например, ограничения на количество магнитных полюсов ротора. С одной стороны, общей тенденцией является использование максимально большого количества полюсов, поскольку такие электромашины имеют большую величину крутящего момента, большую плотность мощности, а также лучшие массогабаритные характеристики, являются менее шумными и характеризуются меньшим уровнем вибрации, чем двухполюсные. Так, например, расчеты, выполненные в работе [25], показали снижение массы 20 MVA, 3600 об/мин генератора с 54 до 29 тонн при увеличении количества пар магнитных полюсов ротора,  $p$ , с  $p = 1$  до 4. С другой стороны, как известно, частота вращения ротора  $n = 60f/p$ , обратно пропорциональна числу пар магнитных полюсов ротора. При этом величина частоты перемагничивания стали статора,  $f$ , в Гц, имеет ограничения для каждого типа стали и, таким образом, накладывает ограничение на количество полюсов высокооборотных электромашин сверху. Необходимо отметить, что в зависимости от режима работы за величину  $f$  принимают частоту выходного напряжения инвертора или частоту выходного напряжения генератора  $f = \omega p / 2\pi$  ( $\omega = 2\pi v$ ;  $v = 2\pi n / 60$ , где  $v$  – частота вращения в Гц).

Большое количество магнитных полюсов в электрической машине позволяет увеличить крутящий момент,  $M$ , (величина крутящего момента пропорциональна количеству пар полюсов), уменьшить радиальную толщину ярма статора и ротора, а если величина частоты  $f$

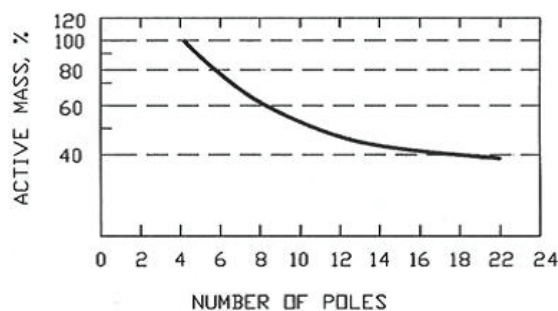
допускает увеличение количества пар полюсов, то высокая частота, вместе с большим количеством полюсов, позволяет уже сейчас повысить удельную мощность электрических машин до величины более  $> 13$  кВт/кг (1 МВт, 18000 об/мин) [26], что соответствует плотности мощности  $57 \text{ МВт/м}^3$  при активном объеме  $0.017 \text{ м}^3$ . Данная величина соответствует обсуждаемой в начале данной работы тенденции увеличения величины плотности мощности при увеличении размеров электромашин и сопоставима с полученной нами в начале данной работы оценкой  $90 \text{ МВт/м}^3$  с учетом необходимого снижения плотности тока на 20% и увеличения магнитной индукции в зазоре на 12% из-за уменьшения площади слотов [13].

При фиксированном внутреннем диаметре статора, увеличение количества полюсов приводит к существенному уменьшению активной массы и объема электромашин (см. рис. 7) и, таким образом, увеличивает плотность мощности.



**Рис. 7. Влияние количества полюсов ( $p=2$  слева,  $p=8$  справа) на внешний диаметр статора при фиксированном внутреннем диаметре статора [27]**

При этом, при фиксированной плотности магнитного потока в воздушном зазоре, величина магнитного потока в расчете на один полюс уменьшается обратно пропорционально числу полюсов, что и приводит к уменьшению внешнего диаметра статора двигателя с большим количеством полюсов. На рис. 8 представлен характер влияния числа полюсов на активную массу электромашин при фиксированном внутреннем диаметре статора. Из рис. 8 видно, что увеличение полюсов в 4 раза приводит к сокращению массы электромашин на 60%.



**Рис. 8. Зависимость активной массы от количества полюсов электромашин по данным работы [27]**

Однако при частоте  $f$  в диапазоне до 1 кГц, количество пар полюсов ротора не может быть более  $p = 6$  для  $n = 10\,000$  об/мин и  $p = 1$  для  $n = 60\,000$  об/мин. При этом СЭПМ спроектированные с  $p = 1$ , в принципе, могут работать и на низких оборотах при уменьшении частоты выходного напряжения инвертора и при условии, что вал ротора и опоры в состоянии выдерживать высокий крутящий момент. При этом при увеличении значения  $f$  до 3,5 кГц, что допускают современные IGBT транзисторы, количество пар полюсов ротора не может быть более  $p = 21$  для  $n = 10\,000$  об/мин, что в определенной степени компенсируют преимущества электромашин на основе Хальбах структур. Компанией Siemens уже построен СЭПМ мощностью 1,1 МВт, 230 об/мин с  $p = 16$  [28].

Важно также отметить, как отмечалось выше, что сравнение результатов работ [16, 17] указывает на то, что при увеличении количества полюсов соотношение между внутренним и внешним диаметром статора может быть увеличено от 0,25–0,55 для двухполюсной до величины 0,65 для четырехполюсной СЭПМ. Следовательно, существенное влияние на достижение предельных значений плотности крутящего момента окажет развитие силовой электроники, допускающее увеличение значения  $f$  до 10 и более кГц.

Отметим, что повышение частоты переметаллизации увеличивает потери и, таким образом, требует использования высокремнистых сталей (до 6,5%), например, типа 10JNEX900 производства JFE Steel Corporation с потерями 75 Вт/кг при 1,5 Тл и 1 кГц, что в 2,7 раза меньше, чем у традиционной стали 35A300 [14]. Цена 12,5 долл. за кг стали 10JNEX900 связана с тем, что содержание Si в железе увеличивается методом CVD (химического осаждения и газовой фазы) с первоначальных 3% до 6,5% содержания кремния на поверхности, что позволяет минимизировать магнитострикционные эффекты. При частоте  $f$  до 50 Гц и 150 об/мин количество пар полюсов не может превышать 20.

При этом мы не должны забывать, что потери на сопротивление воздуха возрастают пропорционально кубу частоты вращения и четвертой степени диаметра ротора, что особо ярко выражено в синхронных явнополюсных электромашин (СЭЯП) из-за их большой «парусности».

Оценим величины плотности крутящего момента и плотности мощности для реальной высокоскоростной двухполюсной электромашин ( $p = 1$ ). Полагая соотношение между внутренним и внешним диаметром статора лежащим в диапазоне 0,25–0,55 получим, что плотность крутящего момента для двухполюсных электромашин лежит в диапазоне от 0,12 до 0,60  $\sigma$ . Таким образом, полагая  $\sigma = 100$  кН/м<sup>2</sup>, что вполне реалистично, получим, что величина удельного крутящего момента лежит в диапазоне 12–60 кНм/м<sup>3</sup> (12–60 Нм/л). Нижняя граница значений близка к величинам удельного момента для серийно выпускаемых моделей автомобильных гибридов, а верхняя лежит в диапазоне значений 35–70 Нм/л, полученных для перспективных моделей автомобильных гибридов со встроенным магнитным редуктором. При скорости вращения  $n \sim 10\,000$  об/мин, для плотности мощности получим величины  $\sim 12$ –60 МВт/м<sup>3</sup> (12–60 кВт/л). Наши оценки показывают, что достигнутые на практике в настоящее время значения плотности существенно меньше (более чем пять раз) сделанных выше предельных оценок, не только для  $p = 1$ , но и  $p = 6$ , что открывает широкий простор для дальнейшей работы конструкторов и инженеров.

Отметим, что для низкооборотных прямых приводов достигнутые плотности момента еще ниже. А для конструкции с рассматриваемыми выше величинами  $p = 1$ ,  $f < 1$  кГц, и  $n \sim 170$  об/мин, плотность мощности лежит в диапазоне до  $\sim 3,5$  МВт/м<sup>3</sup>, что на два порядка ниже сделанных нами оценок и требует увеличения возможных значений  $p$ , например, до 35, для  $f < 100$  Гц, и  $n \sim 170$  об/мин. Однако, сильно увеличение величины  $p$  является также проблематичным с конструкторской точки зрения.

Вместе с тем, текущей целью зарубежных судовых конструкторов электромашин является увеличение значений КПД до 98,5% и удельных энергетических характеристик в 3–4 раза (для электроприводов: удельный крутящий момент до 50 Нм/кг, плотность мощности до

0,9 МВт/м<sup>3</sup> или 0,8 кВт/кг при скорости вращения до 170 об/мин; для электрогенераторов: плотность мощности до 3,5–4 МВт/м<sup>3</sup> или 1,5–2 кВт/кг). При этом синхронный электропривод, установленный на круизный океанский лайнер Queen Elizabeth 2 в 1987 г., имел следующие характеристики: удельную мощность 0,15 кВт/кг, удельный крутящий момент 10,2 Нм/кг, плотность мощности 0,1 МВт/м<sup>3</sup>, а прогресс в увеличении данных параметров был крайне незначительным (0,16 кВт/кг; 10 Нм/кг; 0,2 МВт/м<sup>3</sup>, соответственно, для АЭ компании Alstom в конце прошлого столетия) [29].

#### **Другие пути увеличения величины плотности крутящего момента и плотности мощности**

Для проектирования электромашин важно также, по крайней мере, качественно оценить другие пути увеличения плотности крутящего момента и плотности мощности. Существует несколько вариантов формул, описывающих взаимосвязь плотности мощности с плотностью тока в статоре,  $J$ , и средней величины магнитной индукции в зазоре,  $B$ . Как правило данные выражения включают коэффициенты, описывающие геометрические особенности конструкции. Для оценки плотности мощности, например, может быть использовано следующее наглядное соотношение [30]:

$$\frac{P}{V} = 2JB \omega t(1 - 2\beta t/R), \quad (3)$$

где  $\beta t$  – представляет собой глубину слота плюс толщину магнитопровода (статорного железа за слотом), величина коэффициента  $\beta$  имеет типичное значение 6,  $t$  – это эффективная толщина намотки или толщина эквивалентной равномерно распределённой по радиусу воздушного зазора статорной обмотки (эта толщина равна глубине паза, умноженной на плотность упаковки обмотки и умноженной на отношение ширины паза к шагу зубцов. Ориентировочно, это одна четвертая глубины паза [30]).

При этом важно отметить, что, на первый взгляд, из этого выражения следует, что увеличение радиуса воздушного зазора  $R$  (увеличение габаритов) является одним из очевидных решений для увеличения плотности мощности, что совпадает с качественными выводами, сделанными нами в конце 1-го раздела настоящей статьи. Таким образом, из выражения (3) следует, что в случаях, когда объем позволяет, в первом приближении проектирования необходимо выбрать внешний радиус СЭПМ максимально возможным в рамках имеющихся габаритных и механических (прочностных) ограничений. Однако, как нами было показано в разделе 2, при фиксированных  $\sigma$  и  $\omega$ , на самом деле, «бороться» надо за соотношение между внутренним и внешним диаметром статора максимально близкое к единице.

Проведенные нами оценки показывают, что при  $\beta=6$ , функция  $t\left(1 - \frac{2\beta t}{R}\right)$  имеет максимальное значение равное  $\sim 0,03$  для  $R=1,5$  м и для  $n=3000$  об/мин и уменьшается до 0.01 для более реалистичного случая для  $R=0,5$  м для  $n=10000$  об/мин. Таким образом, максимальная величина плотности мощности для высокооборотных машин прямо пропорциональна величинам  $J$  и  $B$  и определяется по порядку величины как  $\sim 20JB$ , что, например, для  $J=2445$  кА/м<sup>2</sup> и  $B=0,4$  Тл даёт величину плотности около  $\sim 20$  МВт/м<sup>3</sup>, что близко к величине  $\sim 29$  МВт/м<sup>3</sup> (40 МВт/м<sup>3</sup> на активный объем), полученной для данных параметров в работе [18] и, по всей видимости, связано с отклонением величины  $\beta$  от выбранного нами значения, равного 6, и другими конструкционными особенностями электромашин.

Мало того, уменьшение длины полезно сказывается на долговечности подшипников и динамике ротора (жесткости). В процессе проектирования, в рамках имеющихся ограничений на противо-э.д.с., требуется достичь оптимального соотношения осевой длинны и диаметра электромашин, а также максимально увеличить величину значений плотности тока  $J$  до 28–30 А/мм<sup>2</sup> при прямом омывании статора или полых проводниках [29]), индукцию в зазоре (величина ограничена насыщением стали статора и динамическим диапазоном работы электромашин), а также максимально увеличить номинальную величину  $\omega$ . Оптимальное

соотношение осевой длины и диаметра электромашин влияет как на плотность мощности, так и на себестоимость производства (стоимость меди и магнитных материалов) [20].

При фиксированном объеме воздушного зазора, величина магнитного поля в зазоре прямо пропорциональна квадратному корню из максимального энергетического произведения ( $BH$ )<sub>max</sub> и объему системы постоянных магнитов [4], таким образом, большие магнитные поля в зазоре синхронной электромашин могут быть созданы только с помощью современных высокомарочных редкоземельных высокотемпературных магнитов [10], что позволяет получить высокий крутящий момент и высокие плотности мощности, по сравнению с традиционными асинхронными и синхронными электромашинами. При этом низкие значения величины магнитного поля в зазоре, например, при использовании ферритовых магнитов, не могут быть компенсированы увеличением плотности тока, что приводит к увеличению массы ферритовых магнитов и меди (увеличению массогабаритных характеристик) или использованию внешнего ротора для увеличения момента сил (последнее перспективно, например, для воздуходувок). Упомянутый выше анализ НАСА [12] показывает, что только за счет увеличения остаточной магнитной индукции постоянных магнитов марки NdFeB, от достигнутого в настоящее время значения  $B_r = 1,51$  Тл [31] на 10% до величины 1,65 Тл в течении ближайших 30 лет (что кажется вполне реальным с учетом увеличения максимального энергетического произведения почти в 100 раз за последние 100 лет [10]), может привести к росту удельной мощности на 9,3%. Потенциальное использование разрабатываемых в настоящее время нанокompозитных постоянных магнитов с энергетическим произведением  $B_r = 2$  Тл приведет к дальнейшему увеличению удельной мощности на 32,4% [12].

Необходимо отметить, что в последнее время начали набирать популярность гибридные варианты исполнения электромашин, при разработке которых конструкторы пытаются устранить имеющиеся недостатки АЭ и СЭЯП. На рис. 9 представлены схема работы и фотография синхронного генератора на постоянных магнитах, встроенных в статор [32]. В англоязычной литературе такие машины называются doubly salient permanent magnet (DSPM) machine which introduces permanent magnets.

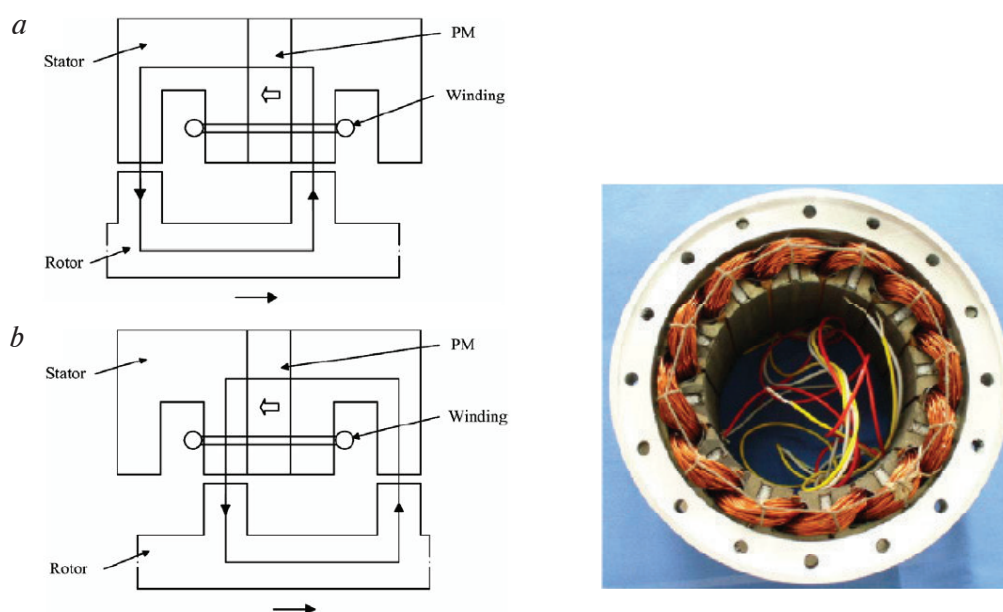


Рис. 9. Схематическое изображение устройства и фотография гибридной синхронной электромашин с явно выраженным полюсом с постоянными магнитами, встроенными в статор

Магнитная индукция в зазоре таких машин может превышать 2 Тл, что в соответствии с формулой (3) ведет к увеличению плотности мощности. Проведенное в работе [32] сравнение для уровня мощности 3 МВт показывает, что подобные машины обладают большей плотностью мощности и на 20 % меньшей стоимостью активных материалов.

Для обеспечения возможности использований индукций свыше 2,35 Тл, делаются попытки увеличить величину насыщения магнитомягких материалов до значений 2,9 Тл, которое было теоретически предсказано для пленок  $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$  и  $\text{Fe}_8\text{N}$  [33], но не получило дальнейшего подтверждения. Однако увеличение величины магнитной индукции ведет к квадратичному нарастанию потерь связанных с перемагничиванием.

Большое значение имеет и тот факт, что помимо чисто механических ограничений на диаметр и длину (массу) ротора, играет роль и целый ряд других факторов. Так, генерируемое током при увеличении размера статора тепло (пропорционально  $\sim 1D^2$ ), возрастает быстрее, чем площадь диссипации [13]. Следовательно, дополнительное внимание требуется уделить повышению КПД, в особенности при высоких температурах, усилению теплоотвода и/или уменьшению плотности тока  $J$  (на 20 % при увеличении размера в 2 раза). Теплоотвод может быть улучшен за счет использования графитовой пены или природного графит/эпоксидного композита [34, 35]. Повышению КПД мощных мульти МВт-ных электромашин способствует тот факт, что при масштабировании потери ( $\sim LD^2$ ) на единицу мощности ( $\sim LD^3$ ) будут линейно падать при увеличении диаметра, что также будет сопровождать линейным ростом коэффициента мощности. При этом серьезное внимание должно быть уделено теплопроводности, тепловому расширению и температурной стабильности высоковольтной изоляции. Например, из литературы известно [36], что в соответствии с простой аппроксимацией уравнения Аррениуса, ресурс обмоток статора будет уменьшаться на 50 % при повышении температуры на 10 °С. Именно поэтому, вопрос о разработке изоляции одновременно с улучшенной теплопроводностью и сохраняющей свои свойства при высоких температурах, также является серьезной задачей. Поскольку КПД электромашин зависит от электрического сопротивления статора, которое увеличивается на 0,39%/С или на 40 % при нагреве до температуры 120 °С, то применение изоляции с хорошей теплопроводностью позволит улучшить теплоотвод и понизить рабочую температуру статора электромашин, что также приведет к повышению эффективности ее работы. Хорошим потенциальным изолятором являются нанотрубки на основе нитрида бора BN, сохраняющие свои свойства вплоть до 1000 °С [37]. Использование высокотемпературной изоляции позволит также устранить главный потенциальный недостаток СЭПМ, а именно невозможность при возгорании обмоток отключения магнитного потока, создаваемого вращающимся ротором.

Представленные выше рассуждения о масштабировании незначительно изменяются при более детальном рассмотрении, с учетом необходимости корректировки плотности тока и индукции в зазоре. Так, например, мощность будет возрастать с увеличением диаметра пропорционально степени 3,83, а не 4, как обсуждалось выше [13].

Увеличение скорости вращения позволяет, с одной стороны, снизить объем ротора и, таким образом, максимально допустимое увеличение скорости вращения является крайне желательным, а с другой, налагает дополнительные ограничения на подбор провода для намотки и плотность намотки статора, выбор стали статора, динамику ротора, типов подшипников, качество обработки поверхности ротора, а также заставляет учитывать возрастающие с частотой потери в электронном оборудовании. При этом правильный подбор многожильного провода позволяет удерживать отношение потерь за счет скин-эффекта к потерям на постоянном токе практически постоянным в диапазоне частот 100–500 Гц. Поскольку потери от вихревых токов квадратично зависят от частоты, то важным также является оптимизация намотки статора для устранения высокочастотных гармоник.

Определенные надежды возлагаются на использование новых высокочастотных полупроводниковых приборов на основе SiC и GaN, позволяющих снизить потери. GaN полупро-

водники имеют гораздо большую подвижность электронов, рабочую температуру до 300 °С, более низкую цену и высокий потенциал для использования в автомобильных электроприводах.

Конечно, необходимо не забывать о предельных скоростях вращения ротора. Экспериментально показано, что мощность машин обратно пропорциональна  $n^3$  [18] или даже  $n^{3.3}$  и, таким образом, на современном уровне развития материаловедения находится на уровне 8 МВт для 15000 об./мин или 22 МВт для 10000 об./мин [18], что вызвано возрастающими с частотой механическими напряжениями, вызванными центробежными силами. Поскольку тангенциальные напряжения прямо пропорциональны плотности материала и квадрату тангенциальной компоненты скорости, то учитывая, что, например, стали с содержанием кремния до 6,5% и с низкими потерями на уровне 5,7 Вт/кг при 1Т и 400Гц (типа марки 10JNEX900) имеют предел текучести на уровне 604 МПа, легко получить величину предельной линейной скорости поверхности ротора 298 м/с. Таким образом, положив предельную линейную скорость ротора 300 м/с для  $n=10000$  об./мин получим из:

$$V = \omega r = (2\pi n/60) D_r/2, \quad D_r = 60V/\pi n, \quad (4)$$

и положив предельную линейную скорость ротора 300 м/с для  $n=10000$  об./мин получим, что максимальный диаметр ротора  $D_r=0,573$  м. Используя выражение (2), можно легко оценить значение погонной мощности при  $D_r=0,573$  м и  $\sigma=148$  кН/м<sup>2</sup>, которую можно на современном уровне развития технологий получить с 1 м осевой длины электромашины  $P_{\Pi} \sim 80$  МВт/м. Однако необходимо учитывать, что в отдельных случаях скорости могут достигать и 367 м/с.

Вместе с тем прочностной анализ для роторов СЭПМ с поверхностным и *V*-образным расположением магнитов приводит к рекомендованным номинальным скоростям вращения на уровне или чуть выше 200 м/с, что дает максимальный диаметр ротора равным 0,599 и 0,382 м при 7000 и 10000 об./мин соответственно. При этом в работе [18] диаметр ротора, например, был выбран равным 0,445 м ( $V=232$  м/с) для 10000 об./мин, что, по мнению автора этой работы, позволило добиться оптимального соотношения диаметра и длины и улучшить жесткость и динамику ротора.

Мало того, машина с более высоким диаметром ротора будет иметь избыточные лобовые части обмоток, которые не участвуют в производстве крутящего момента и увеличивают вес меди статора. Так, например, оптимизация соотношения диаметра СЭПМ к ее осевой длине для ряда мощностей от 100 кВт до 20 МВт, выполненная в работе [18], дала диапазон соотношений от 1 до 0,36, соответственно. Вместе с этим продолговатый дизайн ( $D/L=1,48$ ) привода для LS 600h (2008 год) дал практически 50% увеличение удельной мощности на кг и плотности мощности, а также привел к снижению стоимости меди и магнитных материалов в данном электроприводе по сравнению с гибридными силовыми установками автомобилей моделей 2010 Prius и 2007 Camry [20]. Отметим, что увеличение диаметра ротора ведет к уменьшению величины отношения крутящего момента электромашины к моменту инерции ротора и, следовательно, ухудшению ее динамики.

#### **Сравнительный анализ плотности мощности электромашин МВт-го уровня**

Выше нами проведены сравнительно простые аналитические оценки предельных плотностей мощности электромашин. Представляет интерес провести сравнение полученных нами значений с известными из литературы данными плотности мощности судовых электромашин. В табл. 1 представлены доступные данные о плотности мощности и удельном крутящем моменте 72х судовых электромашин. Таблица включает как расчетные значения, так и полученные на практике и не включает сведения об электромашинах для ветрогенераторов и данные для сверхпроводящих синхронных и гомополярных электромашин.

**Массогабаритные характеристики судовых электромашин**

Асинхронная электромашинa – АЭ, синхронная электромашинa с явнополюсным ротором – СЭЯР, синхронная электромашинa на постоянных магнитах – СЭПМ, с аксиальным потоком (АП), с радиальным потоком (РП) и поперечным потоком (ПП), коммерческий судовой генератор (тип электромашины не известен) – КСГ

	Тип машины	Мощность, МВт	Частота вращения, об/мин	Производитель	Плотность мощности, МВт/м <sup>3</sup>	Удельный крутящий момент, Нм/кг (на полную массу электромашин)	Ссылка
1	АЭ	15	146	ABB's Azipod	0,23	6,8	[44]
2	АЭ	19,5	133	ABB's Azipod	0,3	8,5	[44]
3	АЭ	19	150		0,22	103	[16]
4	АЭ	40	150		0,33	6,5	[45]
5	АЭ	19	150	Alstom	0,2	10	[29]
6	АЭ	20	150	Alstom, AIM	1,08	18,2	[46]
7	АЭ	18,2	127	Converteam	0,24	11,7	[47]
8	АЭ	20	180	Converteam (formerly Alstom)	0,56	13,3	[47]
9	АЭ	34,6	120	Converteam (formerly Alstom)			[48,49]
10	АЭ	20	180	Alstom	0,56	11,9	[19]
11	АЭ	19	150		0,28	14,9	[16]
12	АЭ	19	190		0,49	18,0	[16]
13	АЭ	8	12000	4,4 hp/lb			[50]
14	АЭ	20		UK Royal Navy's Type 45 Daring Class destroyers are powered by two of Converteam's 20MW AIMs [11]. Further, the Royal Navy's Queen Elizabeth Class and Prince of Wales Class aircraft carriers, which are due to enter service in 2014 and 2016, respectively, will each be powered by four 20 MW AIM			[1,51]
15	СЭЯР	44	144	Queen Elizabeth 2	0,1	10,2	[29]
16	СЭЯР	19		0,083 кВт/к			[52]
17	СЭЯР	40	150		0,22	6,9	[45]
18	СЭЯР	18	7200		1,37		[25]
19	СЭЯР	20	180		0,226	8,8	[46]
20	СЭЯР	2	200	Птах и др	0,098	3,2	[53]
21	СЭЯР	14	195		0,35	6,8	[54]
22	СЭЯР	2	1000	1,2 МВт/м <sup>3</sup> на активную массу	0,56	1,7	[6]
23	СЭПМ	36,5	127	DRS	0,67		[1,55]
24	СЭПМ	1,5	498	DRS			[55]
25	СЭПМ с ПП	20	180	Rolls Royce	0,93	16,3	[46]
26	СЭПМ с ПП	20	180	Rolls Royce	1,18	18,3	[39]
27	СЭПМ с ПП	20	180	Rolls Royce	1,45	27,2	[39]



Продолжение таблицы

	Тип машины	Мощность, МВт	Частота вращения, об/мин	Производитель	Плотность мощности, МВт/м <sup>3</sup>	Удельный крутящий момент, Нм/кг (на полную массу электромашины)	Ссылка
28	СЭПМ с ПП	20	180	Rolls Royce	1,45	27,2	[56]
29	СЭПМ с ПП	2	308	Rolls Royce	0,59	4,8	[57]
30	СЭПМ с АП	20	180	Jeumont Industrie, France	1,16	16,3	[46,58]
31	СЭПМ с АП	19	100	Kaman Aerospace Corp.	1,14	36,3	[58]
32	СЭПМ с АП	18,4	100	На момент выхода статьи был изготовлен только прототипы на 74, 515 кВт и 2,2 МВт. 64 Нм/кг получено для 18,4 авторами теоретически	0,72	65,1	[42]
33	СЭПМ с АП	14	195		0,88	15,2	[54]
34	СЭПМ с АП (генератор)	15	5300		20,3		[42]
35	СЭПМ с РП	11,1	6225		11		[59]
36	СЭПМ с РП (генератор)	2	1000		1,9		[6]
37	СЭПМ с РП	14	195		0,47	8,8	[54]
38	СЭПМ с РП	1	195	Siemens	0,69	11,5	[39]
39	СЭПМ с РП	4,3	195	ABB	0,74	13,9	[39]
40	СЭПМ с РП	0,37	325	Azipod, ABB		3,6	[60]
41	СЭПМ с РП	5,0	325	Azipod, ABB		4,8	[60]
42	СЭПМ с РП	2,2	195	Azipod, ABB		5,4	[60]
43	СЭПМ с РП	1,47	80	ABB		5,8	[60]
44	СЭПМ с РП	2	24,5	Azipod		17,3	[60]
45	СЭПМ с РП (генератор)	5	15000		2,13		[61,62]
46	СЭПМ с РП (генератор)	40	15000		1,04		[61,62]
47	СЭПМ с РП (генератор)	20	3600		9,52		[63]
48	СЭПМ с РП (генератор)	20	3600		2,66		[45]
49	СЭПМ с РП (генератор)	5	3600		2,13		[45]
50	СЭПМ с РП (генератор)	40	3600		1,41		[45]
51	СЭПМ с РП (генератор)	2	20000		10		[64]
52	СЭПМ с РП (генератор)	16	13000		11,4		[65]
53	СЭПМ с РП (генератор)	2,5	13700		4,63		[24]

Окончание таблицы

	Тип машины	Мощность, МВт	Частота вращения, об/мин	Производитель	Плотность мощности, МВт/м <sup>3</sup>	Удельный крутящий момент, Нм/кг (на полную массу электромашины)	Ссылка
54	СЭПМ с РП (генератор)	14	7000	1,12 кВт/кг; 2,3 кВт/л	2,33		[2]
55	СЭПМ (генератор)	4,2	900		7,12	13,9	[66]
56	СЭПМ с РП (генератор)	2	1000	2,85 МВт/м <sup>3</sup> , 0,97 МВт/тонну	1,43		[21]
57	СЭПМ с РП	21	100	Комп моделирование	2,73	63,3	[41]
58	СЭПМ с РП	40	150		0,4	12,8	[45]
59	СЭПМ с РП	1	15000				[67]
60	СЭПМ с РП	5	15000				[7]
61	СЭПМ с РП	6	10000				[68]
62	СЭПМ с РП	20	10000	4 кВт/кг 40 МВт/м <sup>3</sup> активного объема	28,57	3,8	[18]
63	СЭПМ с РП	6	17000				[8,9]
64	СЭПМ с РП	1.12	18000				[69]
65	СЭПМ с РП	1.5	20000	43,9 МВт/на активный объем	30		[38]
66	СЭПМ с псевдопрямым приводом	15	100	110 кН·м/м <sup>3</sup> (на активный объем) или 36 кН·м/м <sup>3</sup> (полный объем)	0,74	28,6	[40]
67	КСГ	21	3600		0,33		[65,70]
68	КСГ	25	3600		0,38		[65,70]
69	КСГ	26	3600		0,26		[65,70]
70	КСГ	36,5	3600		0,36		[65,70]
71	КСГ	1,44	1800	MAN			[71]
72	КСГ	2,22	1900	MAN			[61]

Можно заключить, что значения величин плотности мощности лежат в диапазоне 0,26–0,37 МВт/м<sup>3</sup> для коммерческих судовых генераторов; 0,1–0,56 МВт/м<sup>3</sup> для СЭАП; 0,22–1,08 МВт/м<sup>3</sup> для АЭ и 0,4–30 МВт/м<sup>3</sup> для СЭПМ. Как упоминалось выше, удельная мощность для СЭПМ настоящий момент достигает значения 13 кВт/кг (13 МВт/т) (для электромашины 1 МВт и 18000 об/мин) [26].

При этом, как видно из рис. 10, увеличение частоты вращения действительно приводит к резкому расширению диапазона величин плотности мощности. Представленные данные имеют большой разброс значений и не могут быть хорошо аппроксимированы, что связано с отсутствием в ряде случаев полных данных, а также с большим разнообразием конструкций и с тем, что в представленные данные для высокооборотных электромашин не включен объем, занимаемый редуктором. Вместе с этим масса двухступенчатого механического планетарного редуктора с передаточным числом 1:66 и M=1,9 МНм может достигать 20–25 тонн для электромашины 20 МВт и 10000 об/мин [18], что снижает удельную мощность с 4 до 0,73 кВт/кг, без учета массы системы управления.

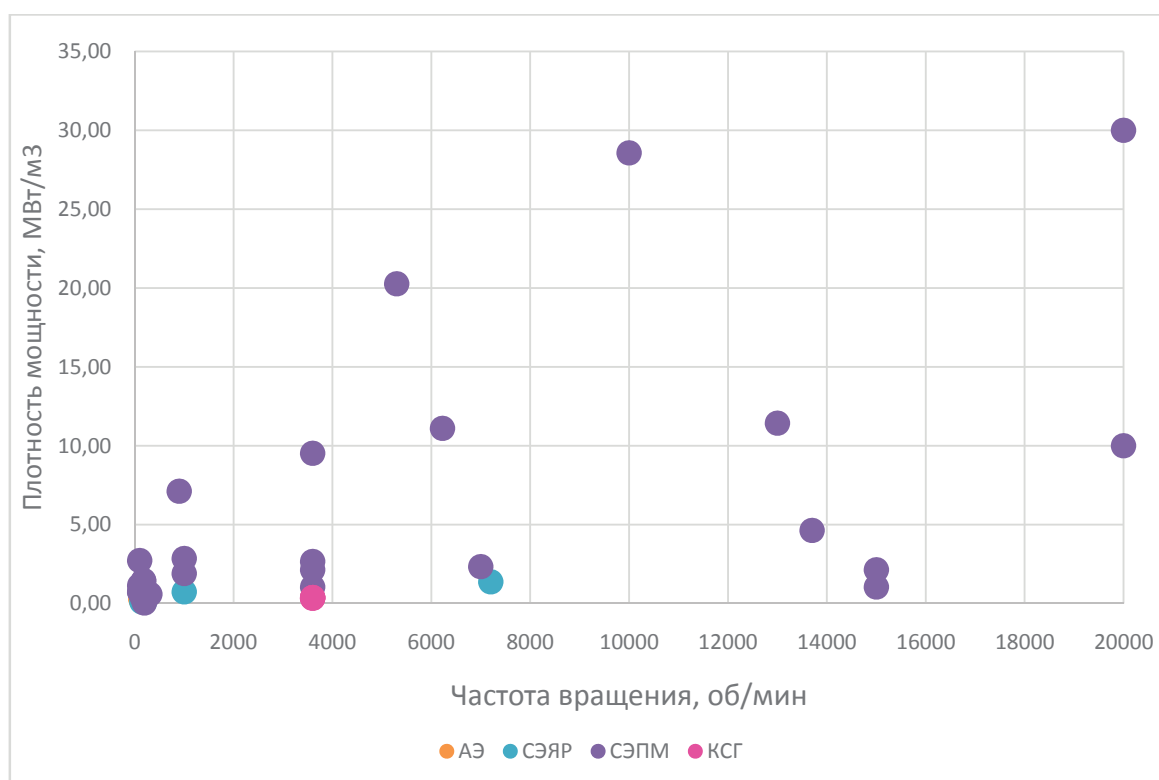
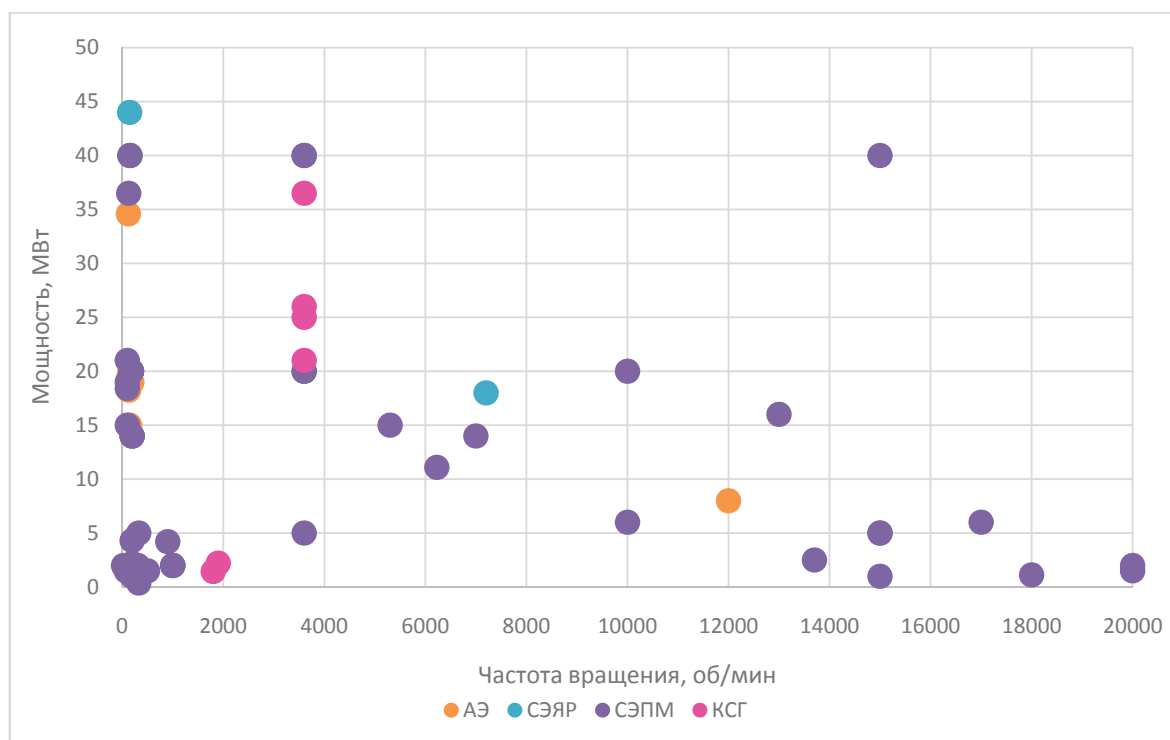


Рис. 10. Зависимость мощности и плотности мощности от частоты вращения судовых электромашин

### Заключение

В настоящее время для СЭПМ МВт-го уровня, в процессе численного моделирования, получены значения удельной мощности 5,73 МВт/т на полную массу электромашины (10000 об/мин) [18] или 8,37 МВт/т на активную массу электромашины (20000 об/мин) [38], а также плотность мощности до 40 МВт/м<sup>3</sup> (10000 об/мин) [18] на активный объем. Данные величины существенно ниже сделанных нами оценок предельных значений удельной мощности  $\sim 190$  МВт/т и плотности мощности  $\sim 279$ – $295$  МВт/м<sup>3</sup> для  $n \sim 10000$  об/мин, что открывает широкий простор для дальнейшей работы в области как фундаментальной, так и прикладной науки на долгие годы. Полученная нами предельно допустимая величина удельной мощности почти в 7 раз превышает данные, полученные в работе [12] (до 26 МВт/т а 30-ти летний период).

Таким образом, можно сделать вывод, что СЭПМ имеют существенно более высокую плотность мощности. Однако при проектировании необходимо оптимизировать расположение постоянных магнитов и их массу. При массовом производстве необходимо получить максимальную мощность в расчете на 1 кг постоянных магнитов (в настоящее время до 100 кВт/кг в случае редкоземельных магнитов). Так, в работе [39] проведено сравнение массогабаритных параметров двух поперечных (Rolls-Royce) и двух радиальных топологий электромашин (Siemens и АВВ). Показано, что поперечная топология имеет до 2 раз меньший объем и большую плотность мощности (0,69–0,74 МВт/м<sup>3</sup> для радиального и 1,18–1,45 МВт/м<sup>3</sup> для поперечного вариантов). Однако при этом коэффициент мощности уменьшался с 0,94 до 0,4 [39], соответственно, что требовало 50 МВА инвертора для 20 МВт поперечной электромашины.

### Список литературы (References)

1. Thongam J.S. et al. (2013) Trends in naval ship propulsion drive motor technology. IEEE Electrical Power Energy Conference (EPEC). Pp. 1–5.
2. Calfo R.M., Smith M.B., Tessaro J.E. (2007) High-Speed Generators for Power-Dense, Medium-Power, Gas Turbine Generator Sets. Naval Engineers Journal. Vol. 119, No. 2. Pp. 63–81.
3. Generating sets. Wärtsilä, 2011.
4. Gieras J.F. (2010) Permanent magnet motor technology. Design and Application. 3 rd edition. CRC Press. 603 p.
5. Kullinger K. (2009) High-megawatt electric drive motors. ABB BU Machines.
6. Balashov S. (2011) Design of marine generators for alternative diesel-electric power systems: Degree of Master of Science in Technology. Lappeenranta University of Technology Faculty of Technology Department of Electrical Engineering.
7. 5 MW [Electronic resource]. Available at: <http://mail.noroffshore.com/web/web.nsf/0/100B2F216BBB F5A6482572A3003E0AB1?OpenDocument>.
8. El-Refaie A. et al. (2012) Testing of advanced permanent magnet machines for a wide range of applications. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM). Pp. 1860–1867.
9. Weeber K. (2009) Advanced electrical machines technology. 16 p.
10. Tishin A.M. (2017) Перспективы применения редкоземельных постоянных магнитов электроприводах специального назначения. К 100-летию использования постоянных магнитов в технике. [Prospects for the use of rare-earth permanent magnets in electric drives of a special purpose. To the 100 anniversary use of permanent magnets in engineering] Инноватика и экспертиза [Innovatics and expert examination] No. 1(19). Pp. 175–192.
11. Mitcham A., Bolton MTW. (1997) The transverse flux motor: a new approach to naval propulsion. Newport, RI, USA. Pp. 1–8.
12. Dever T.P. et al. (2015) Assessment of Technologies for Noncryogenic Hybrid Electric Propulsion: NASA/TP-2015-216588, 46 p.

13. Li S., Sarlioglu B. (2015) Assessment of high-speed multi-megawatt electric machines. IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC). 2015. Pp. 1573–1579.
14. Chiba A., Kiyota K. (2015) Review of research and development of switched reluctance motor for hybrid electrical vehicle. 2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). Pp 127–131.
15. Paulides J.J.H. et al. (2015) Ultra-light-weight high torque density brushless PM machine design: Considering driving-cycle of a four-wheel drive race car. Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Pp. 1–7.
16. Englebretson S.C., Kirtley J.L. Jr, Chryssostomidis C. (2009) Optimization of Direct Drive Induction Motors for Electric Ship Propulsion with High Speed Propellers. Proceedings of the 2009 Grand Challenges in Modeling & Simulation Conference. Vista, CA: Society for Modeling & Simulation International, pp. 96–103.
17. Lipo T.A. (2011) Introduction to AC Machine Design, Third Edition,. Madison, USA. Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin.
18. Bogomolov M.D. (2013) Concept study of 20 MW highspeed permanent magnet synchronous motor for marine Propulsion: PhD Thesis. The department of Electrical Engineering of the Eindhoven University of Technology.
19. Lewis C. (2002) The Advanced Induction Motor. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vol. 1. Pp. 250–253.
20. Burrell T.A., Campbell S.L., et al. (2011) Evaluation of the 2010 Toyota prius hybrid synergy drive system: ORNL/TM-2010/253. USA: Oak Ridge National Laboratory. P. 88.
21. Huynh C. et al. (2006) Flywheel Energy Storage System for Naval Applications. Barcelona, Spain. Pp. 25–33.
22. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V. (2014) Design of Rotating Electrical Machines. Second Edition. Wiley.
23. Behabtu N., et al. (2013) Strong, Light, Multifunctional Fibers of Carbon Nanotubes With Ultrahigh Conductivity. Science. Vol. 339, No. 182, pp. 182–186.
24. Karmaker H. et al. (2015) High-Power Dense Electric Propulsion Motor. IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 51, No. 2. Pp. 1341–1347.
25. Calfo R.M., Fulmer J.A., Tessaro J.E. (2002) Generators for use in electric marine ship propulsion systems. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vol. 1. Pp. 254–259.
26. Yoon A. et al. (2016) A high-speed, high-frequency, air-core PM machine for aircraft application. IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI). Pp. 1–4.
27. Eriksson S. (1995) Drive systems with permanent magnet synchronous motors. Automot. Eng. Vol. 2. Pp. 75–81.
28. Bausch H. (1990) Large power variable speed a.c. machines with permanent magnet excitation. J of Electr and Electron Eng (Australia). Vol. 10, No. 2. Pp. 102–109.
29. Gieras J.F. (2008) Advancements in Electric Machines. Dordrecht: Springer Netherlands.
30. Hebner R.E. et al. (2006) Some benefits of pulsed alternators as electromagnetic gun power supplies on power systems for future electric ships. London, UK. Pp. 1–16.
31. Вебсайт группы компаний АМТ&С [Electronic resource]. 2017. Available at: <http://www.amtc.ru/upload/ndfeb.pdf>.
32. Zhang J., Cheng M., Chen Z. (2008) Optimal design of stator interior permanent magnet machine with minimized cogging torque for wind power application. Energy Conversion and Management. Vol. 49, No. 8. Pp. 2100–2105.
33. Liu X. et al. (2009) Discovery of localized states of Fe 3d electrons in Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> and Fe<sub>8</sub>N films: an evidence of the existence of giant saturation magnetization. ArXiv Prepr. ArXiv09094478.
34. Shin E.E., Johnston J.C., Haas D. (2011) Advances in the Lightweight Air-Liquid Composite Heat Exchanger Development for Space Exploration: AIAA 2011-5206.
35. Jacobi A.M., et al. (2008) Novel Materials for Heat Exchangers: ARTI Report No. 06030–01.

36. Stone G.C. et al. (2004) *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, 2nd Edition. Wiley-Interscience. 390 p.
37. Zhi Chunyi, et al. (2009) Towards Thermoconductive, Electrically Insulating Polymeric Composites With Boron Nitride Nanotubes as Fillers. *Adv. Func. Mater.* Vol. 19. Pp. 1857–1862.
38. Paulides J.J.H., Jewell G.W., Howe D. (2004) An evaluation of alternative stator lamination materials for a high-speed, 1.5 MW, permanent magnet generator. *IEEE Trans. Magn.* 2004. Vol. 40, No. 4. Pp. 2041–2043.
39. Hodge C.G., Mattick OBE D.J. (1999) The electric warship V. *Trans.-Inst. Mar. Eng.* Pp. 1–22.
40. Powell D.J. et al. (2010) Design and analysis of a Pseudo Direct-Drive propulsion motor. 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010). Pp. 1–2.
41. Harbour J.P. (2001) *Evaluation and Comparison of Electric Propulsion Motors for Submarines*: Master of science. Massachusetts Institute of Technology.
42. Dade T.B. (1994) *Advanced Electric Propulsion, Power Generation, and Power Distribution*. Naval Engineers Journal. Vol. 106, No. 2. Pp. 83–92.
43. Galea M. (2013) *High Performance, Direct Drive Machines for Aerospace Applications*: Ph.D. 2013: The University of Nottingham, Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering.
44. Azipod XO2100 Product Introduction. ABB Oy, Marine, Helsinki, Finland, 2009.
45. Ouroua A. et al. (2007) Modeling and Simulation of Electric Ships' Power System Components and Their Interaction. *Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference*. San Diego, CA, USA: Society for Computer Simulation International. Pp. 250–257.
46. Hodge C.G., Mattick (2000) The electric warship VI. *Trans.-Inst. Mar. Eng.* Vol. 112, No. 1. Pp. 27–39. OBE D.J.
47. Gully B.H. (2012) *Hybrid Powertrain Performance Analysis for Naval and Commercial Ocean-Going Vessels*: Doctor of philosophy. The University of Texas at Austin.
48. Converteam. (2007) *Solutions for Naval Vessels*. [Electronic resource]. Available at: [http://www.converteam.com/converteam/1/doc/Markets/Navy/Final\\_NAVAL.pdf](http://www.converteam.com/converteam/1/doc/Markets/Navy/Final_NAVAL.pdf).
49. Hawbaker B.F. (2008) *Analyzing the Effects of Component Reliability on Naval Integrated Power System Quality of Service*: Submitted to the Department of Mechanical Engineering and the System Design and Management Fellows Program in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degrees of Naval Engineer And Master of Science in Engineering and Management. Massachusetts Institute of Technology. 90 p.
50. Pyrhonen J. et al. (2010) High-Speed High-Output Solid-Rotor Induction-Motor Technology for Gas Compression. *IEEE Trans. Ind. Electron.* Vol. 57, No. 1. Pp. 272–280.
51. Propulsion, Transmission and Engine Room Equipment – Naval Technology [Electronic resource]. 2012. Available at: <http://www.naval-technology.com/contractors/propulsion/converteam> (accessed: 04.06.2016).
52. Ciezki J.G., Ashton R.W. (2000) *A Survey of AC Drive Propulsion Options*.
53. Ptakh G.K. et al. (2014) Experience of developing and prospects of application of switched reluctance drives in Russian Navy Fleet. *Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014 IEEE Conference and Expo. Pp. 1–4.
54. Caricchi F., Crescimbeni F., Honrati O. (1999) Modular axial-flux permanent-magnet motor for ship propulsion drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 14, No. 3. Pp. 673–679.
55. DRS Technologies. 2012. Available at: <http://www.drs.com/Products/PESG/PDF/PMMS.pdf>.
56. Mitcham A.J. Transverse flux motors for electric propulsion of ships. *IEE Colloquium on New Topologies for Permanent Magnet Machines (Digest No: 1997/090)*. 1997. Pp. 3/1–3/6.
57. Husband S.M., Hodge C.G. The Rolls-Royce transverse flux motor development // *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*. 2003. Vol. 3. Pp. 1435–1440.
58. Bassham B.A. (2003) *An evaluation of electric motors for ship propulsion: master of science in electrical engineering*. Monterey, California: Naval postgraduate school, Department of Electrical and Computer Engineering.

59. Smith J.S., Watson A.P. (2006) Design, Manufacture, and Testing of a high speed 10MW permanent magnet motors and discussion of potential application. Proceeding of the 35 turbomachinery symposium. Pp. 19–23.
60. Haring T. et al. (2003) Direct drive-opening a new era in many applications. Pulp and Paper Industry Technical Conference. Conference Record of the 2003 Annual. Pp. 171–179.
61. Vijlee S.Z. et al. (2007) Directly-Coupled Gas Turbine Permanent Magnet Generator Sets for Prime Power Generation On Board Electric Ships. IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Pp. 340–347.
62. Vijlee S.Z. (2006) Optimizing a system of gas turbine engines and generators for marine power generation: Master Thesis. The University of Texas at Austin.
63. Davey K.R. (2004) Ship component optimization. Marine Technology Society Journal. Pp. 1–16.
64. Huynh C. et al. (2005) Design and Development of a Two-Megawatt, High Speed Permanent Magnet Alternator for Shipboard Application. Naval Engineers Journal. Vol. 117, No. 4, pp. 23–29.
65. Rucker J.E., Kirtley J.L., McCoy T.J. (2005) Design and analysis of a permanent magnet generator for naval applications. IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Pp. 451–458.
66. 4.2 MW Generator [Electronic resource]. Available at: [http://www.evtglobal.com/EVT\\_Global\\_Inc/Home.html](http://www.evtglobal.com/EVT_Global_Inc/Home.html).
67. Rahman M.A., Chiba A., Fukao T. (2004) Super high speed electrical machines – summary. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Vol. 2. Pp. 1272–1275.
68. Song-Manguelle J., Nyobe-Yome J.M., Ekemb G. (2010) Pulsating Torques in PWM Multi-Megawatt Drives for Torsional Analysis of Large Shafts. IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 46, No. 1, pp. 130–138.
69. Wang T. et al. (2013) Design and develop of a MW direct drive high-speed permanent-magnet machine for compression. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Pp. 892–895.
70. Pepi J., Mongeau P. (2004) High Power Density Permanent Magnet Generators. DRS Electric Power Technologies, Inc.
71. MAN. 1.44-2.22MW [Electronic resource]. 2016. Available at: [www.175D.man.eu](http://www.175D.man.eu).