

## Сверхпроводниковые тихоходные электрические машины большой мощности (обзор публикаций)<sup>1</sup>

ШУМОВ Ю.Н., САФОНОВ А.С.

*Согласно опубликованным материалам<sup>2</sup> с 1980 по 2012 гг. разными компаниями получено 869 патентов в области сверхпроводниковых электрических машин (СПЭМ). Основным направлением в области новых разработок СПЭМ являются тихоходные (до 300÷400 мин<sup>-1</sup>) двигатели для привода гребных винтов судов с электродвижением мощностью от 1 до 40 МВт, а также ветрогенераторы (ВГ) на частоту вращения 8÷12 мин<sup>-1</sup> и мощностью до 20 МВт. Быстроходные авиационные СПЭМ не рассматриваются в данной статье. Сверхпроводниковые гидрогенераторы, очевидно, не получат широкого применения, так как для гидроэнергетики не дают заметных преимуществ.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** электрические машины, сверхпроводниковая обмотка, большая мощность, вопросы проектирования и создания, обзор

Поступательное развитие морской ветроэнергетики в последние годы объясняется тем, что годовая выработка электроэнергии в море на 40% больше, чем на суше, проще решаются вопросы с размещением ветровых парков (ферм) при мощности примерно 500 МВт, вопросы экологии, уменьшается стоимость вырабатываемой электроэнергии. При этом с увеличением единичной мощности ветроустановки (ВУ) до 20 МВт упрощается обслуживание ветропарка, уменьшается средневзвешенная стоимость электроэнергии (LCOE). В настоящее время для ВУ мощностью до 5 МВт применяются асинхронные генераторы двойного питания с контактными кольцами. Привод такого генератора осуществляется через повышающий трехступенчатый редуктор, обслуживание и ремонт которого в морской ВУ создаёт проблемы. При мощности ВУ более 5 МВт применяется синхронный генератор с постоянными магнитами (ПМ) (СГПМ) и прямым (безредукторным) приводом. Магниты выполняются на основе редкоземельных элементов, в основном неодима, а рынок этих магнитов нестабилен по причине скачков цен. Кроме того, при мегаваттной мощности СГПМ его масса столь велика, что создаёт проблемы для фундамента ВУ, её вышки и монтажа.

Так как сверхпроводниковая электрическая машина (СПЭМ) может быть выполнена на 40% более лёгкой, чем СГПМ, а в перспективе по мере снижения стоимости сверхпроводящего провода и холодильного оборудования более дешевой, особенно с учетом дефицита в будущем редкоземель-

ных элементов. Следует учесть, что для СПЭМ мощностью 10 МВт требуется примерно 6000 кг постоянных магнитов.

Страны Европы уделяют повышенное внимание развитию ветроэнергетики. Образованы три консорциума, перед которыми была поставлена цель – разработать сверхпроводниковую ветроустановку (СПВУ) мощностью до 20 МВт при финансовой поддержке Евросоюза.

В рамках проекта INNWIND.EU и в соответствии с программой Seventh Framework Program специалисты University of Sheffield и Siemens Wind Power смоделировали и сравнили три принципиальных конструкции (топологии) для СПВГ на 10 МВт: магнитопроводы статора и ротора – магнитные (МРС); сердечник статора магнитный, сердечник ротора немагнитный (МСНМР); сердечники статора и ротора немагнитные (НМСР). Исходные данные для моделирования:  $P=10$  МВт;  $n=9,6$  мин<sup>-1</sup>;  $M=10,5$  МН·м;  $D=7$  м;  $2p=32$ ;  $z=384$ ;  $j_a=30$  А/мм<sup>2</sup>. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) второго поколения YBCO разработаны Siemens Corporate Technology, рабочая температура  $T=30$  К. На основании оптимизации сделаны выводы: для МРС требуется на 10% меньше ВТСП. При определении стоимости активных материалов принято для ВТСП 100 евро/м (но прогнозируется снижение стоимости до 20 евро/м). Если принять 20 евро/м, то стоимость активных материалов МРС на 20% меньше, чем для других топологий. Масса стали для полюсов у МРС приблизительно на 50% больше, чем у МСНМР. Для НМСР стоимость провода ВТСП, меди и стали составит соответственно приблизительно 1; 0,1 и 0,23 млн евро. При сравнении не учитывались стоимости конструктивных материалов, системы охлаждения и т.д. Наи-

<sup>1</sup> Данную публикацию предлагается рассматривать как продолжение статьи авторов в «Электричестве», 2019, № 2.

<sup>2</sup> См., например, [2].

меньшие длина и стоимость ВТСП соответственно 5,348 км и  $0,327 \cdot 10^6$  евро (при 20 евро/м). Вывод: если стоимость ВТСП снизится, то по соображениям меньшей массы активных материалов могут оказаться предпочтительнее МСНМР или НМСР. При выборе конструкции следует учесть пульсации момента, содержание гармоник в магнитном поле, силы, действующие на обмотки, стоимость системы охлаждения [3].

В [4] представлен результат разработки СПВГ для морской ВУ на 10 МВт, выполненной в соответствии с INNWIND.EU Project и охватывающей диапазон мощностей 10–20 МВт. В разработке проекта в рамках INNWIND.EU участвовали DTU Wind Energy, SINTEF Energy Research, Delft Univ. of Technology, DNV-GL. При проектировании принято, что обмотка якоря медная и размещена в воздушном зазоре, зубцы отсутствуют, обмотка ротора выполнена из провода СП  $MgB_2$ , катушки имеют форму бегового трека (race track). Основные данные генератора:  $P=10$  МВт;  $n=9,7$  мин<sup>-1</sup>;  $M_H=10,6$  МН·м;  $2p=32$ ;  $D_a=5,8$  м;  $l_\delta=3,1$  м;  $B_\delta=1,5$  Тл;  $A=1000$  А/см;  $B_{f\max}=2,8$  Тл;  $T=10 \div 15$  К;  $L_{сп}=474$  км, плотность тока в СП катушке  $j_{сп}=70$  А/мм<sup>2</sup>, сдвигающее усилие  $F_d=75$  кН·м/м<sup>2</sup>, диаметр ветрового колеса 250 м,  $\eta=97,7\%$  (без учета потерь в системе охлаждения).

Ленту СП  $MgB_2$  поставляет Columbus Superconductor. Длина СП провода 474 км, масса 7918 кг. При стоимости ленты  $MgB_2$  4 евро/м цена активных материалов составит  $2263 \cdot 10^3$  евро, при ожидаемом в ближайшие годы снижении стоимости  $MgB_2$  до 1 евро/м она составит  $840 \cdot 10^3$  евро. Общая стоимость СП провода 1,897 млн евро (в будущем 0,474 млн евро).

Масса активных материалов 52,3 т, их общая стоимость 2,263 млн евро, в будущем 0,84 млн евро, стоимость активных материалов 226 евро/кВт, что составляет 20% стоимости морской ветротурбины 1500 евро/кВт, а для традиционного генератора и редуктора 300 евро/кВт. При сравнении не учтены стоимость системы охлаждения и прогнозируемое снижение стоимости  $MgB_2$ . Вывод: генератор сопоставим по стоимости с традиционным.

В соответствии с проектом SUPRAPOWER.EU [5–10], перед которым была поставлена цель разработать облегченный, простой и надежный ВГ мощностью 10 МВт на базе концепции патента компании TECNALIA (Испания), был организован консорциум из 9 партнеров. Проект начат в 2012 г. на основе программы EUFP7. Решались следующие задачи: уменьшение усредненной стоимости электроэнергии, снижение на 30% по сравнению с традиционным СГПМ, исключение редуктора, что делает привод более надежным, упрощение системы

криоохлаждения, независимость ВГ от рынка редкоземельных элементов. Основные данные генератора:  $P=10$  МВт,  $n=8,1$  мин<sup>-1</sup>,  $M=11,8$  МН·м, беспазовый статор,  $2p=60$ , полюсы с магнитными сердечниками, «теплый» ротор явнополюсный,  $F_f=230$  кА·м,  $D_\delta=11,9$  м,  $l_\delta=0,52$  м, общая масса  $G=200$  т, включая конструктивные элементы,  $\eta=95\%$ , промежуток между регламентными работами 1 год. Криокулеры двухступенчатые М-Г установлены внутри ротора. Первая ступень охлаждения  $T=80$  К, вторая 20 К. Криостаты модульные, на каждом полюсе свой криостат, который закрывает только СП катушки. Это уменьшает охлаждаемую массу. Модульная конструкция криостатов упрощает конструкцию и обслуживание в условиях моря. Обмотка статора медная, провод ротора  $MgB_2$ . Стоимость ВГ – 2,8 млн евро.

Разработка ВТСП ВГ на  $P=20$  МВт была частью Eol Supra Project (Франция). Генератор полностью сверхпроводниковый, обмотки индуктора и якоря выполняются из провода ВТСП второго поколения  $MgB_2$ . При этом для уменьшения потерь в якоре от переменного тока используется кабель Rutherford, производимый фирмой Hyper Tech. Inc. Для уменьшения потерь кабель содержит 91 нить (жилу), что удорожает его производство. Рабочая температура для обмотки якоря  $T=20$  К, для индуктора 10 К, криостаты для статора и ротора раздельные. Магнитные зубцы статора и сердечники полюсов отсутствуют. Ярма статора и ротора магнитные.

Для анализа параметров генератора и минимизации LCOE использовалась модель 2D на базе метода конечных элементов. Для системы охлаждения используются двухступенчатые кулеры RDK-408S2 фирмы Simitomo Heavy Industries (SHI). Первая ступень 55 К, вторая 10 или 20 К. Для индуктора СП лента фирмы Columbus Superconductors. Основные данные ВГ:  $P=20$  МВт,  $n=6,3$  мин<sup>-1</sup>,  $D_a=6,02$  м,  $l_\delta=1,3$  м,  $2p=20$ ,  $\delta=20$  мм,  $U=3,3$  кВ,  $j_f=2276$  А/мм<sup>2</sup>,  $q=4$ . Потери в обмотке якоря 615 Вт,  $\eta=96,8\%$  (общий). Мощность, потребляемая криокулерами, 577 кВт. Число криокулеров: якорь 77, индуктор 8. Стоимость ВГ – 5,81 млн долл., LCOE – 140 млн долл./МВтч (у сопоставимого СГПМ – 178 млн долл./МВтч), масса активных частей 44,8, конструктивных 122,7 т, суммарная масса 178 т. Основной вывод: из-за большого числа кулеров (85 шт.) проект невыполним [11].

EcoSwings в рамках проекта, спонсируемого ЕС, работает над первым СПВГ класса 3 МВт, который будет установлен на существующей на рынке ВУ мощностью 3,6 МВт с СГПМ. Этот генератор на 40% легче аналога с ПМ, а вся ВУ с гондолой ветроколесом легче на 25%. В настоящее время прак-

тически все разработчики считают, что экономически оправданным будет внедрение СПВП мощностью более 10 МВт. Но по мере снижения стоимости СП (а оно в ближайшее время возможно в 4–5 раз) может оказаться выгодным выполнять СПВУ на мощность порядка 3–5 МВт [12].

В [13] выполнены разработки четырех вариантов конструкции СГПМ и СПВГ на 10 МВт,  $n=10$  мин<sup>-1</sup>, с прямым приводом. В результате моделирования получены следующие результаты:

1. СГПМ,  $D_a=13,1$  м,  $l_\delta=1,12$  м,  $2p=60$ ,  $\delta=15$  мм, максимальная индукция в роторе  $B_f=1,8$  Тл, в якоре  $B_a=1,5$  Тл, потери в медной обмотке якоря  $P_{Cuа}=300$  Вт,  $G_{акт}=35$  т.

2. СПВГ с явно выраженными полюсами на роторе и зубцами на статоре,  $D_a=8,2$  м,  $l_\delta=1,21$  м,  $2p=12$ ,  $\delta=15$  мм,  $B_f=2,4$  Тл,  $B_a=2$  Тл,  $P_{Cuа}=240$  Вт,  $G_{акт}=135$  т,  $L_{сп}=40$  км.

3. СПВГ, отсутствуют зубцы на статоре и сердечники полюсов на роторе,  $D_a=4,7$  м,  $l_\delta=1,6$  м,  $2p=12$ ,  $\delta=100$  мм,  $B_f=8,4$  Тл,  $B_a=3$  Тл,  $P_{Cuа}=230$  Вт,  $G_{акт}=1110$  кг,  $L_{сп}=1240$  км.

4. СПВГ полностью сверхпроводниковый, обмотка якоря СП  $MgB_2$ , при  $T=20$  К обмотка возбуждения – ВТСП второго поколения YBCO,  $D_a=4$  м,  $l_\delta=1,54$  м,  $2p=12$ ,  $\delta=80$  мм,  $B_f=5$  Тл,  $B_a=1,5$  Тл, потери в обмотке якоря  $P_{сп}=200$  Вт,  $G_{акт}=65$  кг,  $L_{сп}=200$  км.

По массе и габаритам все три варианта СПВГ выигрывают по сравнению с СГПМ. Вариант 2 СПВГ имеет минимальную длину СП провода (40 км). Минимальную массу активных частей и минимальные габариты имеет полностью сверхпроводниковый СПВГ. Неясно, каким образом были определены потери в СП обмотке якоря 200 Вт. Не обоснован выбор числа полюсов  $2p=12$  для СП генераторов.

В Hebei University of Sciens and Technology и University of Southampton рассмотрены варианты конструкции, в частности полностью сверхпроводниковые.

Основные данные анализируемого генератора:  $P=10$  МВт,  $n=10$  мин<sup>-1</sup>,  $D=4$  м,  $l_\delta=1500$  мм,  $D_i=2662$  мм,  $D_a=3252$  мм,  $z=72$ ,  $q=3$ ,  $2p=8$ . Катушки для обмотки возбуждения – ВТСП YBCO рейстрекковые, обмотка якоря – СП  $MgB_2$ , распределенная двухслойная, расположена в воздушном зазоре. Статор – беспазовый, имеет ферромагнитный экран (ядро). С помощью МКЭ анализируются две конструкции с одинаковыми габаритами, причём в одной обмотка якоря из СП  $MgB_2$ , а в другой медная. Принято, что для  $MgB_2$  расчетная плотность тока 1,88 на 108 А/м<sup>2</sup> при  $B=2$  Тл и  $T=20$  К. Принято также, что провод  $MgB_2$  имеет механические характеристики, позволяющие выполнить обмотку якоря распределенной. Сердеч-

ник ротора немагнитный. Поперечное сечение обмотки возбуждения 126×126 мм. Индукция в обмотке якоря увеличена с 2,32 до 3,24 Тл при медной обмотке якоря. Масса активных материалов для генератора с обмоткой якоря из  $MgB_2$  может быть уменьшена на 16%.

Недостаток проекта в том, что не проанализированы потери в обмотке якоря, так как они могут быть столь значительными, что система охлаждения и число криокулеров окажутся неприемлемыми [14].

Оценочный проект СПВГ на 5 МВт для ВУ проведен в [15–17]. Авторы проекта считают, что к 2030 г. будет выпущено 1000 таких ВГ. Предварительные расчеты показали, что СПВГ будет иметь массу активных материалов 34 т,  $D=4,2$  м,  $2p=24$ ,  $L=1,2$  м, немагнитные зубцы статора и немагнитный сердечник ротора. При этом обмотка возбуждения должна обеспечивать  $B_\delta=2,5$  Тл при плотности тока 100 А/мм<sup>2</sup>. Такие условия может обеспечить ВТСП второго поколения YBCO, поставляемый Superpower, при рабочей температуре  $T_H=30\div 40$  К и индукции СП обмотки возбуждения приблизительно  $B_\delta=4$  Тл. Длина ленты СП  $L_{сп}=130$  км, стоимость 3,9 млн евро (в ценах 2012 г.). Стоимость ВУ морского исполнения составит 7,5 млн евро, включая стоимости фундамента и кабеля до берега.

Следует отметить, что прогноз развития СПВУ, изложенный в [17], не оправдался. Так, утверждалось, что первая СПВУ на 5 МВт будет установлена в 2015 г., ещё три в 2018 г., а к 2020 г. – 10 шт, что не выполнено.

GE-Global Research совместно с Oak Ridge National laboratory и GE-Energy (США) разработали проект ветрогенератора на 10 МВт с обмоткой возбуждения из низкотемпературного СП провода (НТСП) Cu-(NbTi), с вращающимся якорем и неподвижным индуктором. Цель проекта – снижение стоимости энергии, направление на коммерциализацию, выявление ненадежных узлов в конструкции. Основные данные ВГ:  $P=10$  МВт,  $n=10$  мин<sup>-1</sup>,  $U=3300$  В,  $I=1750$  А,  $M_H=10$  МН·м,  $D_a=4876$  мм,  $l_\delta=1879$  мм,  $\delta=19$  мм,  $2p=36$ ,  $z=648$ ,  $q=6$ ,  $f=3$  Гц, обмотка якоря медная двухслойная формованная,  $F_f=928000$  А,  $i_f=276$  А, максимальная индукция катушки возбуждения  $B_f=7,35$  Тл, критический ток 467 А, критическая температура  $T_c=6,08$  К,  $\eta=95\%$ , потери в компрессорах двух криокулеров 22,5 кВт; общие потери 501 кВт. Вентиляция якоря аксиальная, воздух шестью вентиляторами прогоняется через воздушный зазор и каналы в сердечнике якоря. Сердечники якоря и ротора, зубцы – магнитные, число контактных колец 4, их диаметр 3 м, число щеток на кольцо 30.

Провод НТСП Cu-(NbTi), соотношение Cu/Ti=1,5, провод с  $d=1$  мм, число волокон 7400, диаметр волокна 7,5 мкм. Полная длина НТСП провода 720 км, масса НТСП провода 3840 кг. Срезающее усилие 179 кПа, у аналога с ПМ – 85 кПа, удельный момент 197 Н·м/кг, у аналога – 94 Н·м/кг. Ветровое колесо ВУ – 160 м. Масса генератора 93 т. Стоимость энергии (СОЕ) ВУ с разработанным ВГ по сравнению с ВГПМ мощностью 5 МВт и ветровым колесом ВУ 126 м на 13% меньше. Стоимость сравнивалась в ценах на ПМ в 2010 г., в последующие годы она значительно выросла. Достоинство проекта: так как индуктор с СПОВ неподвижен, а якорь вращается, то отпадает необходимость в недостаточно надежном вращающемся узле – муфте, через которую передавался бы хладагент. Недостаток: так как ток якоря (1750 А) передаётся во внешнюю цепь через контактные кольца и угольные щётки, то требуется регулярное обслуживание скользящего контакта, что затруднительно в условиях моря.

К недостаткам проекта можно отнести также большую мощность криоохладителя (22,5 кВт), высокое содержание гармоник в поле якоря, низкую частоту напряжения ( $f=3$  Гц), с точки зрения безаварийной работы инвертора рекомендуется  $f \geq 10$  Гц [18, 19].

В [20] спроектированы и сравниваются два ВТСП генератора на 12 МВт для морских ВУ с разным выполнением медной обмотки статора. Работа выполнена в государственной проблемной лаборатории Huazhong University of Science and Technology (КНР). Обмотка статора генератора 9-фазная распределённая и состоит из трех групп, в которых три фазы или совпадают, или сдвинуты на  $20^\circ$ . Влияние разных способов выполнения обмотки на характеристики генератора изучено с помощью метода конечных элементов. Оба генератора имеют одинаковую конструкцию с «теплым» ротором; ВТСП для обмотки ротора (YBCO) охлаждается газообразным гелием, рабочая температура  $T=20$  К. Основные данные каждого генератора:  $P=12$  МВт,  $n=9$  мин<sup>-1</sup>,  $f=0,9$  Гц,  $2p=12$ ,  $z_1=108$ ,  $y=9$ ,  $D_a=6000$  мм,  $D_i=5124$  мм,  $\delta=20$  мм,  $\delta_{\Delta\phi}=65$  мм,  $D_2=5104$ ,  $D_{2i}=4714$  мм,  $l_\delta=1500$  мм,  $A=1126$  А/см,  $B=2,75$  Тл,  $j_a=3,1$  А/мм<sup>2</sup>,  $L_{сп}=1357$  км,  $i_f=110$  А,  $T=20$  К, ВТСП – YBCO, обмотка статора в воздушном зазоре, статор беззубцовый, сердечник ротора немагнитный.

**Выводы.** Многофазная обмотка статора с фазовым сдвигом между фазами отдельных групп обеспечивает увеличение вращающего момента, уменьшение пульсаций момента, снижение потерь в электромагнитном экране, уменьшение временных гармоник тока.

Сотрудниками Delft University of Technology (Нидерланды) был разработан полностью сверхпроводниковый ВГ 10 МВт для морской ВУ. Цель проекта – оценить возможность выполнения сверхпроводникового ВГ при использовании СП провода MgB<sub>2</sub> как для ротора, так и для статора. При разработке электромагнитной модели на основе метода конечных элементов был сделан целый ряд допущений. Основные данные ВГ:  $P=10$  МВт,  $n=11$  мин<sup>-1</sup>,  $2p=20$ , СП MgB<sub>2</sub>,  $T=20$  К, сердечник статора и зубцы, сердечник ротора – немагнитные (air cored), для крепления и суппорта используется композит G10,  $U_\phi=10$  кВ, ярмо статора из шихтованной стали выполняет роль ферромагнитного экрана, максимальная индукция в зоне обмотки якоря 2 Тл,  $I_a=340$  А,  $i_f=1500$  А, линейная нагрузка статора  $A_a=174$  кА/м, линейная нагрузка ротора 4,6 МА/м,  $L_{сп}=56$  км,  $D_H=5,6$  м,  $G=60 \div 70$  т, суммарные потери в СП 2,2 кВт,  $\eta=97\%$ . Разработчиками сделан вывод: из-за больших потерь, требующих подавления системой охлаждения (2,2 кВт при  $T=20$  К), генератор технически невыполним. Технически частично выполним сверхпроводниковый генератор с СП только в индукторе и с коммерчески доступными криокулерами [21].

Двигатели СП для привода гребных винтов (СПГЭД) могут обеспечить ряд преимуществ: меньшие габариты по сравнению, например, с СДПМ или АД, пониженные уровни шума и вибрации.

AMSC (США) в 2006 г. выпустила крупнейший СПГЭД для ВМФ. Его основные данные:  $P=36,5$  МВт,  $n=120$  мин<sup>-1</sup>,  $m=9$ ,  $2p=16$ ,  $U=6$  кВ,  $f=16$  Гц, масса приблизительно 75 т, обмотка возбуждения – ВТСП первого поколения BSCCO, КПД при частичной нагрузке выше, чем у традиционных электрических машин. Охлаждение медной обмотки статора жидкостное. Габариты 3,4×4,6×4,1 м; значения  $X_d$  и  $X'_d$  малы, так как физический зазор большого размера (магнитные зубцы на статоре отсутствуют); по этой же причине уровень звука мал. Машина установлена на эсминце класса DD1000 Zumwalt (США).

В соответствии с Naval Research Program фирма AMSC разработала, изготовила и успешно испытала также СПГЭД на 5 МВт. Опыт разработки использовался в дальнейшем при разработке ГЭД на 36,5 МВт. Основные данные ГЭД:  $P=5$  МВт,  $n=230$  мин<sup>-1</sup>,  $m=3$ ,  $2p=6$ ,  $f=11,5$  Гц,  $U=4,6$  кВ,  $G=23$  т,  $X_d=0,32$  отн.ед.,  $X'_d=0,24$  отн.ед., обмотка возбуждения – ВТСП первого поколения BSCCO, габариты 2,5×1,9×1,9 м [22].

В соответствии с грантом Министерства торговли, промышленности и энергии Южной Кореи группа сотрудников нескольких университетов страны разработала проект СПГЭД класса 17 МВт.

Моделированием методом конечных элементов 3D определены механические усилия, действующие на катушки СП обмотки возбуждения и элементы конструкции, передающие момент, в частности на вал. Основные данные двигателя:  $P=17$  МВт,  $n=180$  мин<sup>-1</sup>,  $f=9$  Гц,  $U=6600$  В,  $M=9020$  Н·м,  $2p=6$ ,  $\eta=96\%$ ,  $X_d=0,34$  отн.ед.,  $V=8,97$  м<sup>3</sup>,  $G=31,1$  т,  $i_f=91$  А,  $L_{СП}=182,7$  км,  $i_f=54,35$  А/мм<sup>2</sup>,  $T=40$  К,  $Z_1=72$ ,  $j_1=10$  А/мм<sup>2</sup>. Критический ток ВТСП равен 180 А при  $T=77$  К. Обмотка статора медная многожильная (Litz). Зубцы немагнитные, выполнены из пластмассы, усиленной стекловолокном, служат для крепежа обмотки ВТСП первого поколения Vi-2223. Максимальная индукция магнитного поля, параллельного проводникам катушки СП 2,34 Тл. Длина СП на полюс 30,45 км, число витков 6033 [23].

В [24] предложена конструкция полностью сверхпроводникового ВТСП двигателя для системы электродвижения судов на  $P=40$  МВт,  $n=120$  мин<sup>-1</sup>. Обмотка статора выполняется из СП MgB<sub>2</sub>, обмотка ротора из ВТСП первого поколения Vi-2223. Катушки обеих обмоток имеют форму бегового трека (race track). Сердечники как статора, так и ротора магнитные и находятся в атмосфере окружающей среды. Температура для обмотки статора 20 К, ротора 35 К,  $D=3$  м,  $l=2,3$  м,  $G=80$  т. Утверждается, что предложенная конструкция может быть использована для ВУ. Недостаток проекта: не разработана система охлаждения обмоток.

В University of Cambridge разработан проект СПГЭД для судового электродвигателя на  $P=2,5$  МВт. Данные:  $n=480$  мин<sup>-1</sup>,  $w_a=690$ ,  $z_1=54$ ,  $w_f=1200$  (на полюс),  $L_{СП}=8,6$  км,  $D_a=1000$  мм,  $L=600$  мм,  $D_i=500$  мм,  $\delta=3,5$  мм,  $2p=6$ , среднее значение  $B_c=1$  Тл,  $B_{max}=1,6$  Тл при 40 К. Обмотка якоря медная, обмотка индуктора – ВТСП второго поколения YBCO, рабочая температура  $T=77$  К. Анализ проведён на модели 3D методом конечных разностей. Проведена оптимизация геометрии ротора для обеспечения синусоидальности напряжения. Сердечники полюсов ротора и статора немагнитные. Обмотка ротора опирается на суппорт и удерживается крепежом. Ротор имеет магнитное ярмо с целью уменьшения количества СП. Ярмо статора выполняет такую же роль, как ярмо ротора, но дополнительно служит электромагнитным экраном. Обмотка статора многожильная (Litz) двухслойная с укороченным шагом. Расчёты показали, что в конструкции с немагнитным статором потребуется много СП провода (13 км вместо 8,6) [25].

Doosan Heavy Industries and Construction, Changwon National University (Корея) разработали и изготовили СПГЭД 5 МВт для электродвижения морских судов в содружестве с Korea

Electrotechnology Research. Основные данные двигателя:  $P=5$  МВт,  $n=213$  мин<sup>-1</sup>,  $2p=6$ ,  $f=10,65$  Гц,  $M=230$  кН·м,  $X_d=0,24$  отн.ед.,  $D=1700$  мм,  $U=6600$  В,  $i_f=100$  А ( $I_c=150$  А),  $\eta=98\%$ ,  $L_{СП}=50$  км,  $G=22$  т. Зубцы статора и сердечника ротора немагнитные, обмотка статора медная. Катушки обмотки возбуждения в форме бегового трека из ВТСП второго поколения GdBCO (полоса  $4\times 0,24$  мм<sup>2</sup>),  $T=27$  К, хладагент – жидкий неон. Криокулер GM AL325, AL330. Испытания двигателя, проведенные при частичной нагрузке, показали, что первоначальное охлаждение СП составляет неприемлемое время – 10 сут. [26].

Kawasaki Heavy Industries (Япония) и группа партнёров разработали СПГЭД для винторулевых колонок судов с системами электродвижения мощностью класса 1 МВт. Основные данные двигателя:  $P=1$  МВт,  $n=190$  мин<sup>-1</sup>,  $2p=4$ ,  $f=60$  Гц,  $U=1200$  В,  $I=675$  А,  $i_f=200$  А,  $T=30$  К,  $\eta=98\%$ . Статор имеет немагнитные зубцы, которые выполнены из специальной пластмассы и предохраняют медную обмотку от электромагнитных усилий. Катушки обмотки статора разделены на отдельные проводники прямоугольного сечения. Обмотка ротора изготовлена из ВТСП первого поколения BSCCO-2223. Сердечник ротора первоначально охлаждается жидким азотом, затем газообразный гелий поддерживает  $T=30$  К. Температура устанавливается через трое суток после начала процесса охлаждения. Требуемая мощность системы охлаждения 100 Вт. Индукция в зоне обмотки возбуждения  $B=5$  Тл. Предполагается, что за счёт установки такого двигателя в винторулевой колонке требуемая мощность привода снизится по сравнению с существующей системой охлаждения примерно на 20% [27].

Компания Siemens разработала, изготовила и успешно испытала ВТСП двигатель для электродвижения судна. Основные данные двигателя:  $P=4$  МВт,  $n=120$  мин<sup>-1</sup>,  $f=8$  Гц,  $M=320$  кН·м,  $2p=8$ , статор без магнитных зубцов,  $L_{СП}=45$  км, ВТСП BSCCO от фирмы Bruker ENTS,  $G=36$  т + 1 т (система охлаждения),  $\eta=94,6\%$ , что на 1,5% больше, чем у традиционного аналога, потери в системе охлаждения учитывались и составляли 0,27% значения  $P_H$ . Потери СП обмотки возбуждения плюс потери от переменных токов приблизительно 120 Вт, что требует примерно 10 кВт мощности компрессора криокулера. Двигатель на 25% легче традиционного. На основе испытаний сделан вывод, что на данном этапе развития этот двигатель не является коммерческим продуктом [28, 29].

В США ведутся работы промышленными предприятиями и академическими исследовательскими институтами над улучшением характеристик СП. Агентство передовых исследовательских проектов в области энергетики (ARPA-E) организовало две ко-

манды для разработки ВТСП с увеличенным в несколько раз значением критического тока по сравнению с производимым в настоящее время ВТСП Re(BCO) (где Re – редкоземельный элемент) для ВТСП генераторов, работающих при  $T=30\div 50$  К и  $B=1\div 3$  Тл. В первую команду входят AMSC и Brookhaven National Lab., во вторую – University of Houston и SuperPower. Первая команда добилась увеличения критического тока более чем в 4 раза – от 400 А для ленты ВТСП Re(BCO) 10 мм до более чем 1600 А. Вторая команда также добилась 4-кратного увеличения критического тока для ленты большего размера – 3900 А. Прогнозируется увеличение критического тока в 5,6 раза, что будет способствовать значительному снижению стоимости ВТСП электрических машин [30].

В соответствии с программой REAT Департамента энергии США разработан улучшенный вариант ВТСП – 4ХУВСО второго поколения. Сотрудниками компании TECO-Westinghouse разработан эскизный проект ВГ на 10 МВт с целью оценки эффективности применения такого ВТСП. Некоторые данные ВГ:  $P=10$  МВт,  $n=8$  мин<sup>-1</sup>,  $U=3000$  В, КПД более 96%,  $M=13$  МН·м. Магнитопроводы статора и ротора магнитные, обмотка статора медная, обмотка ротора ВТСП 4Х,  $T=30$  К. Электромагнитный медный экран служит для демпфирования высших гармоник. Расчёт с помощью моделирования методом конечных разностей показал, что  $I_{кз} = 15I_{н}$ , поэтому требуется усиленный бандаж обмотки статора. Необходимая длина провода ВТСП – 10,7 км, что значительно меньше, чем у аналога выпускаемых в настоящее время ВТСП YBCO. Хотя масса магнитной стали в конструкции значительна, усредненная стоимость электроэнергии (LCOE), в которую входит и стоимость ВГ, будет сопоставима с другими аналогами. Конструкция криостатов модульная, что упрощает систему криоохлаждения и обслуживание. Проектирование поддерживалось программой ARPA-E [31, 32].

В University of Houston при участии E2P Solution, Super Power inc., TECO-Westinghouse и финансировании Департаментом энергии США разрабатывается технология производства легкого недорогого СП провода для высокопроизводительных устройств, работающих в широком диапазоне магнитного поля и температуры. Традиционный процесс (roll-to-roll) изготовления СП провода очень затратный, что затрудняет выход на рынок. Цель проекта – улучшение характеристик СП, уменьшение стоимости изготовления (Re)BCO провода. Предполагается увеличить критический ток  $I_c=1440$  А при рабочей  $T=65$  К и индукции  $B=1,5$  Тл и снизить стоимость на 50%. Для изготовления такого провода разработан станок MOCVD, на котором предполагается изготавливать СП

пленки толщиной до 5 мкм. Такой провод позволит разрабатывать компактные электрические машины большой мощности и особенно будет востребован при ограничении на массу и габариты. Разрабатываемая технология может быть внедрена при изготовлении СПГЭД и ВГ. Проект рассчитан на три года и начат в 2017 г. [32].

Ответственным по выполнению программы «Новое поколение электрических машин», на которую министерством энергии США выделено 4,5 млн долл. названа компания Superconductor Technologies (SCON), с которой будут сотрудничать TECO-Westinghouse, Motor Company, Массачусетский технологический институт (MIT), Университет Северного Техаса (UNT). Основное внимание будет уделено разработке ВТСП провода с улучшенными характеристиками и значительно уменьшенной стоимостью.

Еще один проект осуществляется другим консорциумом: координатор проекта AMSC, партнеры Brookhaven Technology Group, Brookhaven National Laboratory, University of Buffalo, финансирование проекта – через U.S. Department of Energy, Advanced Manufacturing Office. Усовершенствование провода СП второго поколения преследует цель увеличить плотность тока, уменьшить стоимость проводов в два раза [33].

Консорциум из нескольких организаций (Florida State University, Super Power inc., Advanced Conductor Tech.) разрабатывает гибкий СП кабель CORC, предназначенный для использования в промышленных установках, а также в ВГ и ГЭД мощностью более 1 МВт. Кабель CORC выполняется из СП второго поколения (Re)BCO. Проект рассчитан на три года, начиная с 2017 г. Предполагается увеличить длину выпускаемого кабеля с 500 до 6000 м, а критический ток до  $I_c = 5000$  А. Спонсирование проекта, как и двух других, осуществляется правительством США [34].

Converteam (Великобритания) на базе работающего гидрогенератора Hydrogenic (ФРГ) разработала проект СП гидрогенератора, который рассчитан на  $P=1,79$  МВт,  $n=214$  мин<sup>-1</sup>,  $M=80,3$  кН·м, имеет  $2p=28$ . Охлаждается СП провод газообразным гелием, рабочая  $T=30$  К, криокулеры типа G-M, охлаждается только СП обмотка возбуждения, массив ротора «тёплый». Обмотка статора медная, располагается в традиционных пазах. Следует отметить, что применение сверхпроводниковых электрических машин на гидростанциях на данном этапе развития технологии сверхпроводимости не дает заметной выгоды [35].

University of Edinburgh разработан проект СП ВГ с клювообразными полюсами на  $P=10$  МВт,  $n=10$  мин<sup>-1</sup>. Так как обмотка возбуждения неподвижна, то это повышает надежность, чему способ-

стует модульная конструкция. При выходе из строя одной секции, генератор продолжает работать до следующих запланированных регламентных работ. Дополнительные преимущества – низкие требования к СП проводу. Некоторые данные генератора: СП провод из  $MgB_2$ , рабочая  $T=30$  К, длина СП провода 15 км, масса активных частей 186 т, наружный диаметр генератора 6,63 м,  $\eta=94,5\%$ . Синхронные машины с клювообразными полюсами известны и не находят применения при традиционной конструкции на большую мощность. Это объясняется тем, что магнитопровод загружен потоками рассеяния, что требует повышенного расхода активных материалов. Единственное преимущество – обмотка возбуждения неподвижна, что упрощает систему криоохлаждения и уменьшает расход СП провода по сравнению с другими конструкциями СПСМ. К недостаткам следует отнести значительные потери в обмотке якоря (10 кВт) и относительно низкий КПД (94,5%) [36].

Разработан проект одноименно-полюсного индукторного сверхпроводникового двигателя (СПИД) по правительственному гранту в 2007 г. Проведено сравнение с аналогичным сверхпроводниковым синхронным двигателем (СПСД). Основные данные СПИД:  $P=5$  МВт,  $n=230$  мин<sup>-1</sup>,  $f=11,5$  Гц,  $L_{СП}=500$  км,  $T=30$  К,  $B_\delta=1,2$  Тл,  $D=2,5$  м,  $l_\delta=1,415$  м,  $V=6,95$  м<sup>3</sup>,  $G=44$  т [37]. При прочих равных условиях СПСД имеет:  $D=1,747$  м,  $l_\delta=1,315$  м,  $L_{СП}=50$  км,  $G=18$  т. Сравнение показывает, что по затратам активных материалов СПСД выгоднее СПИД. Это объясняется тем, что магнитная система СПИД значительно насыщается из-за наличия постоянной составляющей потока. Кроме того, принцип работы индукторной машины основан на модуляции воздушного зазора при вращении ротора, поэтому зазор должен быть минимальным. Выполнение статора СПИД беззубцовым, а значит с увеличенным физическим воздушным зазором, аналогично синхронному двигателю, значительно снижает эффективность индукторного двигателя.

Несколько промышленных и академических организаций Японии работают над новым типом электрических машин с применением объемных (bulk) СП. В проекте участвует National University Corporation, Tokyo University of Marine Science and Technology (TUMSAT), ABB Corporate Research, Nippon Steel and Sumimoto Metal Corporation (NSSMC) [38, 39].

Объемные СП используются на роторе электрической машины в качестве квазимагнитов. После импульсного намагничивания в сильном поле в условиях температуры 20÷30 К остаточное значение индукции может превышать 10 Тл. Пока TUMSAT и ABB разработали демонстрационный прототип

электродвигателя небольшой мощности (30 кВт), ВТСП квазимагнит выполнен фирмой NSSMC. В масштабе эта электрическая машина соответствует машинам мегаваттного диапазона, которые в будущем могут быть построены для привода гребных винтов крупных кораблей и использованы как генераторы для ВУ морского исполнения, а также в авиации.

Невозможность выполнения СП квазимагнитов ПМ малых размеров препятствовала их применению в крупных электрических машинах. В прототипе использовались СППМ размером 50×50 мм. На новую технологию ВТСП квазимагнитов получены патенты. Над проблемой ВТСП псевдомагнитов работают также другие организации. Так, в University Cambridg в июле 2016 г. состоялся семинар (Workshop), в котором участвовали, в частности, Siemens AG, University Oxford, Boeing, ATZ и др. По итогам работы семинара была разработана маршрутная карта развития и применения псевдомагнитов с остаточным полем (TFM).

Цены на редкоземельные ПМ упали в последние годы более чем в 4 раза (до 39 долл./кг) [40]. Так как расход таких ПМ на ВГ достигает 6000 кг для ВГ мощностью 10 МВт, то это способствует снижению стоимости ВГ традиционной конструкции. Другой потенциальный конкурент для СПЭМ – псевдопрямой привод (PDD), успешно развиваемый компанией Magnematic. Этот привод является комбинацией синхронной машины и магнитного редуктора, отличается бесконтактностью, малым уровнем звука, высоким КПД, требования к обслуживанию и охлаждению минимальны. Крупный недостаток – затраты ПМ, гораздо большие, чем у традиционных СППМ. В рамках проекта INNWIND специалисты DTU выполнили эскизный проект PDD на 10 и 20 МВт [41], однако на такую мощность PDD пока нереализуем.

**Заключение.** Изобретение высокотемпературных сверхпроводников в конце 20 столетия имело большое практическое значение. Однако разработка сверхпроводниковых электрических машин, в частности для электродвижения морских судов и ветроэнергетики, происходит медленно. По прогнозам коммерческое производство начнется примерно через 20 лет. Коммерческое промышленное производство сдерживается высокой стоимостью сверхпроводникового провода, недостаточной мощностью и высокой стоимостью холодильного оборудования, лабораторным характером производства сверхпроводниковых электрических машин. В настоящее время построен и проходит практические испытания электродвигатель на 36,5 МВт для военно-морского флота, прошел стендовые испытания такой же электродвигатель на 4 МВт, испытывается генератор на ветроустановке мощностью 3,6 МВт.

Различными организациями разработано около 20 проектов сверхпроводниковых электрических машин как для систем электродвижения судов, так и ветроэнергетики. Однако не все проекты по сверхпроводниковым машинам реализуемы, по крайней мере, в настоящее время.

Некоторые разработчики ветрогенераторов утверждают, что усредненная стоимость электроэнергии (с учетом капитальных затрат), вырабатываемой ветроустановкой с сверхпроводниковым генератором, может быть меньше, чем с традиционными генераторами.

Такие машины, как сверхпроводниковый униполярный электродвигатель для систем электродвижения судов, электрические машины с когтеобразными полюсами, индукторные (униполярные) асинхронные машины вряд ли найдут широкое практическое применение.

Для мощных тихоходных синхронных машин перспективны сверхпроводниковые квазимагниты (объемные, bulk).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Тихоходные электрические машины большой мощности. – *Электричество*, 2019, № 2, с. 60–66.
2. Citation (APA): Jensen B.B., Mijatovic, N., Abrahamsen, A.B. Development of Superconducting Wind Turbine Generators. In Scientific Proceedings of EWEA 2012. – European Wind Energy Conference & Exhibition European Wind Energy Association (EWEA) [Электрон. ресурс] [http://orbit.dtu.dk/files/7894274/Development\\_of\\_Superconducting\\_Wind\\_Turbine\\_Generators.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/7894274/Development_of_Superconducting_Wind_Turbine_Generators.pdf) (дата обращения 29.04.2019).
3. Guan Y. et al. Comparison of electromagnetic performance of 10MW superconducting generators with different topologies for offshore direct-drive wind turbines. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* PP(99), July 2017.
4. Abrahamsen A.B., Magnusson N., Liu D., Stehouwer E., Hendriks B., Polinder H. Design study of a 10 MW MgB<sub>2</sub> superconductor direct drive wind turbine generator. Poster session presented at European Wind Energy Conference & Exhibition 2014, Barcelona, Spain [Электрон. ресурс] <https://docslide.us/documents/design-study-of-a-10-mw-mgB2-superconductor-direct-drive-orbitdtudkfiles89914061designstudyofa10mw.html> (дата обращения 29.04.2019).
5. SUPRAPOWER (SUPERconducting, Reliable, lightweight, And more POWERful offshore wind turbine) [Электрон. ресурс] <http://www.suprapower-fp7.eu/> (дата обращения 29.04.2019).
6. Karmaker H. et al. Comparison between different design topologies for multi-megawatt direct drive wind generators using improved second generation high temperature superconductors. – *IEEE Tr. on Applied Superconductivity*, 2015 [Электрон ресурс] [https://www.wizard.ai/publication/10.1109/TASC.2014.2375872/title/comparison\\_between\\_different\\_design\\_topologies\\_for\\_multi\\_megawatt\\_direct\\_drive\\_wind\\_generators\\_using\\_improved\\_second\\_generation\\_high\\_temperature\\_superconductors](https://www.wizard.ai/publication/10.1109/TASC.2014.2375872/title/comparison_between_different_design_topologies_for_multi_megawatt_direct_drive_wind_generators_using_improved_second_generation_high_temperature_superconductors) (дата обращения 30.04.2019).
7. Sanz S. Superconducting light generator for large offshore wind turbines. – *Journal of Physics Conference Series* 507(3):032040, May 2014.
8. Liu Bin et al. A Superconducting Induction Motor with a High Temperature Superconducting Armature: Electromagnetic Theory, Design and Analysis. *Energies* 11(4):792, March 2018.
9. Kim J.H. et al. Analysis of the Mechanical Characteristics of a 17-MW-Class High-Temperature Superconducting Synchronous Motor. – *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, February 2015, vol. 28, No. 2, pp 671–679 [Электрон. ресурс] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-014-2810-y> (дата обращения 30.04.2019).
10. Fukud S. Numerical study of optimization design of high temperature superconducting field winding in 20 MW synchronous motor for ship propulsion. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 22(3):5200504–5200504, June 2012.
11. Hoang T.-K. et al. Design of a 20 MW fully superconducting wind turbine generator to minimize the levelized cost of energy. – *IEEE Trans. on Applied Superconductivity* 28(4):1–5, February 2018.
12. Supraleitende Generatoren: industrielle Fertigung ab 2020 [Электрон. ресурс] <http://www.starterword.de/smart-generation/wind/artikel/119559> (дата обращения 30.04.2019).
13. Ohsaki H., Queval L., Terao Y. Design and characteristic analysis of 10 MW class superconducting wind turbine generators with different types of stator and rotor configurations. – 4th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2013), Alghero, Italy, June 2013.
14. Liang Y. et al. Electromagnetic simulations of a fully superconducting 10-MW-class wind turbine generator. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 23(6):46–50, December 2013.
15. Abrahamsen A. et al. Large Superconducting Wind Turbine Generators. – *Energy Procedia* 24:60–67, December 2012.
16. Yuning Pan, Danhzhen Gu. Superconducting wind turbine generators. – *Transactions on Environment and Electrical Engineering* 1(3):9–15, July 2016.
17. Umamoto K. et al. Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system. – *Journal of Physics Conference Series* 234(3):032060, July 2010.
18. Fair R. et al. Next generation drive train superconductivity for large-scale wind turbines. – *Applied Superconductivity Conference*, Portland, Oregon, 11th, October 2012.
19. Nick W. et al. Development and construction of an HTS rotor for ship propulsion application. – *Journal of Physics Conference Series* 234(3):032040, July 2010.
20. Wang J. et al. Comparison study of superconducting generators with multiphase armature windings for large-scale direct-drive wind turbines. – *IEEE Trans. on Applied Superconductivity* 23(3):5201005–5201005, June 2013.
21. Kostopoulos D. et al. Feasibility study of a 10 MW MgB<sub>2</sub> fully superconducting generator for offshore wind turbines. – *EWEA Offshore Conference*, November 2013.
22. Gieras J.F. Superconducting electrical machines state of the art. – *Przegląd Elektrotechniczny* 85(12):1–19, December 2009.
23. Kim J.H. et al. Analysis of the mechanical characteristics of a 17-MW-class high-temperature superconducting synchronous motor. – *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 28(2):671–679, February 2014.
24. Kalsi S. Ship propulsion motor employing Bi-2223 and MgB<sub>2</sub> superconductors. Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires, pp. 427–449, April 2016.
25. Zou J. et al. Design and performance analysis of a 2.5 MW-class HTS synchronous motor for ship propulsion. – Article (PDF Available), May 2013 [Электрон. ресурс]

([https://www.researchgate.net/publication/236834806\\_Design\\_and\\_Performance\\_Analysis\\_of\\_a\\_25\\_MW-Class\\_HTS\\_Synchronous\\_Motor\\_for\\_Ship\\_Propulsion](https://www.researchgate.net/publication/236834806_Design_and_Performance_Analysis_of_a_25_MW-Class_HTS_Synchronous_Motor_for_Ship_Propulsion)) (дата обращения 13.05.2019).

26. **Moon H. et al.** An introduction to the design and fabrication progress of a megawatt class 2G HTS motor for the ship propulsion application. – *Superconductor Science and Technology* 29(3):034009, March 2016.

27. **Umemoto K. et al.** Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system. – *Journal of Physics Conference Series* 234(3):032060, July 2010.

28. **Nick W. et al.** Test results from Siemens low-speed, high-torque HTS machine and description of further steps towards commercialisation of HTS machines. – *IEEE/CSC & ESAS European superconductivity news forum*, No. 19, January 2012.

29. **Nick W.** HTS Rotating Machines. – European Summer School, Pori, Finland, 2008 [Электрон. ресурс] <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki1ID361.pdf> (дата обращения 13.05.2019).

30. **Majkic G.** Superconductor manufacturing technology for next-gen electric machines. – NIST/DOE Workshop on Enabling Technologies for Next Generation Electric Machines Gaithersburg, MD. Sep. 8, 2015.

31. **Karmaker H.** Design concepts for a direct drive wind generator using new superconductors. 2015. – *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, October 2015.

32. **Advanced** manufacturing of high performance superconductor wires for next generation electric machines. U.S. Department of energy, office of energy efficiency & renewable energy. DOE/EE-1589, October 2017 [Электрон. ресурс] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/12/f46/Advanced%20Manufacturing%20G%20HTS%20Wires%20for%20Next%20Gen%20Electric%20Machines.pdf> (дата обращения 14.05.2019).

33. **Enhanced** 2G high temperature superconducting (HTS) wire for electric motor applications. U.S. Department of energy, office of energy efficiency & renewable energy. DOE/EE-1588, December 2017 [Электрон. ресурс] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/01/f46/Enhanced%20G%20HTS%20Superconducting%20Wire.pdf> (дата обращения 14.05.2019).

34. **Cost-effective** conductor, cable, and coils for nextGeneration electric machines. U.S. Department of energy, office of energy efficiency & renewable energy. DOE/EE-1586, January 2018 [Электрон. ресурс] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/01/f46/Cost-effective%20conductor%20cable%20and%20coils%20for%20next%20generation%20electric%20machines.pdf> (дата обращения 14.05.2019).

f46/Conductor\_Cable\_Coils%20for%20Next%20Generation%20Electric%20Machines.pdf (дата обращения 25.05.2019).

35. **Fair R. et al.** Development of an HTS hydroelectric power generator for the hirschaid power station. – *Journal of Physics: Conference Series* 234 (2010) 032008.

36. **Keysan O. et al.** A modular and cost-effective superconducting generator design for offshore wind turbines. – *Superconductor Science and Technology* 28(3):034004, March 2015.

37. **Lee S.-H. et al.** Study on homopolar superconducting synchronous motors for ship propulsion application. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 9(2):717 – 720, July 2008.

38. **Durrell J.H. et al.** Bulk superconductors: A roadmap to applications. – *Superconductor Science and Technology* 31(10):103501, October 2018.

39. **A New Breakthrough** of Superconducting propulsion Motor. – Tokyo University of Marine Science and Technology (JP), 2018-08-03 [Электрон. ресурс] <https://www.kaiyodai.ac.jp/english/topics/news/201808031559.html> (дата обращения 15.05.2019).

40. **Samuel By, Moore K.** The troubled quest for the superconducting wind turbine. – *IEEE Spectrum*, 1 August, 2018 [Электрон. ресурс] <https://spectrum.ieee.org/green-tech/wind/the-troubled-quest-for-the-superconducting-wind-turbine> (дата обращения 15.05.2019).

41. **Abrahamsen A., Bech A.** New direct drive technologies of INNWIND.EU: Superconducting vs. Pseudo Direct Drive. Conf. Wind Energy Denmark – DOK 5000, Odense, Denmark, 26/10/2016-27/10/2016 [Электрон. ресурс] [http://orbit.dtu.dk/files/127709705/New\\_direct\\_drive\\_technologies.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/127709705/New_direct_drive_technologies.pdf) (дата обращения 15.05.2019).

[22.05.2019]

*А в т о р ы: Шумов Юрий Николаевич – кандидат техн. наук, до августа 2015 г. – профессор Университета машиностроения (МАМИ), диссертацию защитил в 1980 г.*

*Сафонов Александр Сергеевич – кандидат техн. наук, доцент Московского политехнического университета, диссертацию защитил в 2003 г.*

*Electrichestvo, 2019, No. 11, pp. 58–68*

*DOI:10.24160/0013-5380-2019-11-58-68*

## Superconducting Low-Speed Large-Capacity Electrical Machines

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

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

*According to the materials published in the period from 1980 to 2012 [2], different companies obtained 869 patents in the field of superconducting electrical machines (SCEMs). The main line of new developments of SCEMs is focused on low-speed (up to 300–400 rpm) motors for driving the propulsive screws of electrically propelled vessels with capacities from 1 to 40 MW, as well as wind generators (WGs) for rotation frequencies 8–12 rpm and capacity up to 20 MW. High-speed aircraft SCEMs are beyond the scope of this article. As regards superconducting hydro generators, they do not seem to receive wide use since they do not yield noticeable advantages for hydraulic power generation.*

**Key words:** *electrical machines, superconducting winding, large capacity, design and development matters, review*

## REFERENCES

1. **Shumov Yu.N., Safonov A.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 2, pp. 60–66.
2. **Citation (APA): Jensen B.B., Mijatovic, N., Abrahamsen, A.B.** Development of Superconducting Wind Turbine Generators. In Scientific Proceedings of EWEA 2012. – European Wind Energy Conference & Exhibition European Wind Energy Association (EWEA) [Electron. resource] [http://orbit.dtu.dk/files/7894274/Development\\_of\\_Superconducting\\_Wind\\_Turbine\\_Generators.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/7894274/Development_of_Superconducting_Wind_Turbine_Generators.pdf) (Data of appeal 29.04.2019).
3. **Guan Y. et al.** Comparison of electromagnetic performance of 10MW superconducting generators with different topologies for offshore direct-drive wind turbines. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity PP(99), July 2017.
4. **Abrahamsen A.B., Magnusson N., Liu D., Stehouwer E., Hendriks B., Polinder H.** Design study of a 10 MW MgB<sub>2</sub> superconductor direct drive wind turbine generator. Poster session presented at European Wind Energy Conference & Exhibition 2014, Barcelona, Spain [Electron. resource] <https://docslide.us/documents/design-study-of-a-10-mw-mgb2-superconductor-direct-drive-orbitdudkfiles89914061designstudyofa10mw.html> (Data of appeal 29.04.2019)
5. **SUPRAPOWER** (SUPerconducting, Reliable, lightweight, And more POWERful offshore wind turbine) [Electron. resource] <http://www.suprapower-fp7.eu/> (Data of appeal 29.04.2019).
6. **Karmaker H. et al.** Comparison between different design topologies for multi-megawatt direct drive wind generators using improved second generation high temperature superconductors. – IEEE Tr. on Applied Superconductivity, 2015 [Electron. resource] [https://www.wizdom.ai/publication/10.1109/TASC.2014.2375872/title/comparison\\_between\\_different\\_design\\_topologies\\_for\\_multi\\_megawatt\\_direct\\_drive\\_wind\\_generators\\_using\\_improved\\_second\\_generation\\_high\\_temperature\\_superconductors](https://www.wizdom.ai/publication/10.1109/TASC.2014.2375872/title/comparison_between_different_design_topologies_for_multi_megawatt_direct_drive_wind_generators_using_improved_second_generation_high_temperature_superconductors) (Data of appeal 30.04.2019).
7. **Sanz S.** Superconducting light generator for large offshore wind turbines. – Journal of Physics Conference Series 507 (3):032040, May 2014.
8. **Liu Bin et al.** A Superconducting Induction Motor with a High Temperature Superconducting Armature: Electromagnetic Theory, Design and Analysis. *Energies* 11(4):792, March 2018.
9. **Kim J.H. et al.** Analysis of the Mechanical Characteristics of a 17-MW-Class High-Temperature Superconducting Synchronous Motor. – Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, February 2015, vol. 28, No. 2, pp 671–679 [Electron. resource] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-014-2810-y> (Data of appeal 30.04.2019).
10. **Fukud S.** Numerical study of optimization design of high temperature superconducting field winding in 20 MW synchronous motor for ship propulsion. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity 22(3):5200504– 5200504, June 2012.
11. **Hoang T.-K. et al.** Design of a 20 MW fully superconducting wind turbine generator to minimize the levelized cost of energy. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity 28(4):1–5, February 2018.
12. **Supraleitende** Generatoren: industrielle Fertigung ab 2020 [Electron. resource] <http://www.starterword.de/smart-generation/wind/artikel/119559> (Data of appeal 30.04.2019).
13. **Ohsaki H., Queval L., Terao Y.** Design and characteristic analysis of 10 MW class superconducting wind turbine generators with different types of stator and rotor configurations. – 4th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2013), Alghero, Italy, June 2013.
14. **Liang Y. et al.** Electromagnetic simulations of a fully superconducting 10-MW-class wind turbine generator. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity 23(6):46–50, December 2013.
15. **Abrahamsen A. et al.** Large Superconducting Wind Turbine Generators. – Energy Procedia 24:60–67, December 2012.
16. **Yunying Pan, Danhzen Gu.** Superconducting wind turbine generators. – Transactions on Environment and Electrical Engineering 1(3):9–15, July 2016.
17. **Umamoto K. et al.** Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system. – Journal of Physics Conference Series 234(3):032060, July 2010.
18. **Fair R. et al.** Next generation drive train superconductivity for large-scale wind turbines. – Applied Superconductivity Conference, Portland, Oregon, 11th, October 2012.
19. **Nick W. et al.** Development and construction of an HTS rotor for ship propulsion application. – Journal of Physics Conference Series 234(3):032040, July 2010.
20. **Wang J. et al.** Comparison study of superconducting generators with multiphase armature windings for large-scale direct-drive wind turbines. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity 23(3):5201005–5201005, June 2013.
21. **Kostopoulos D. et al.** Feasibility study of a 10 MW MgB<sub>2</sub> fully superconducting generator for offshore wind turbines. – EWEA Offshore Conference, November 2013.
22. **Gieras J.F.** Superconducting electrical machines state of the art. – *Przeglad Elektrotechniczny* 85(12):1–19, December 2009.
23. **Kim J.H. et al.** Analysis of the mechanical characteristics of a 17-MW-class high-temperature superconducting synchronous motor. – Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 28 (2):671–679, February 2014.
24. **Kalsi S.** Ship propulsion motor employing Bi-2223 and MgB<sub>2</sub> superconductors. Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires, pp. 427–449, April 2016.
25. **Zou J. et al.** Design and performance analysis of a 2.5 MW-class HTS synchronous motor for ship propulsion. – Article (PDF Available), May 2013 [Электрон. ресурс] [https://www.researchgate.net/publication/236834806\\_Design\\_and\\_Performance\\_Analysis\\_of\\_a\\_2.5\\_MW-Class\\_HTS\\_Synchronous\\_Motor\\_for\\_Ship\\_Propulsion](https://www.researchgate.net/publication/236834806_Design_and_Performance_Analysis_of_a_2.5_MW-Class_HTS_Synchronous_Motor_for_Ship_Propulsion) (дата обращения 13.05.2019).
26. **Moon H. et al.** An introduction to the design and fabrication progress of a megawatt class 2G HTS motor for the ship propulsion application. – Superconductor Science and Technology 29 (3):034009, March 2016.
27. **Umamoto K. et al.** Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system. – Journal of Physics Conference Series 234(3):032060, July 2010.
28. **Nick W. et al.** Test results from Siemens low-speed, high-torque HTS machine and description of further steps towards commercialisation of HTS machines. – IEEE/CSC & ESAS European superconductivity news forum, No. 19, January 2012.
29. **Nick W.** HTS Rotating Machines. – European Summer School, Pori, Finland, 2008 [Electron. resource] <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki11D361.pdf> (Data of appeal 13.05.2019).
30. **Majkic G.** Superconductor manufacturing technology for next-gen electric machines. – NIST/DOE Workshop on Enabling Technologies for Next Generation Electric Machines Gaithersburg, MD. Sep. 8, 2015.
31. **Karmaker H.** Design concepts for a direct drive wind generator using new superconductors. 2015. – IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), October 2015.

### Александр Львович Минц

(К 125-летию со дня рождения)

Ученый в области радиофизики, академик АН СССР Александр Львович Минц родился 8 января 1895 г. (27 декабря 1894 г. по ст. ст.) в Ростове-на-Дону в высокообразованной и обеспеченной семье фабриканта. Окончив с золотой медалью вторую Ростовскую гимназию Н.П. Степанова, юноша поступил на физико-математический факультет Донского государственного университета, затем – на второй курс физико-математического факультета Московского университета. Одновременно стал посещать Народный университет имени А.Л. Шанявского, где курс физики читал П.П. Лазарев (впоследствии академик), предложивший молодому человеку начать научную работу в своей лаборатории. Студент в 1916 г. во время Первой мировой войны разработал, заявил и запа-



тентовал свое первое изобретение «Система парализования работы неприятельской радиостанции», основанное на применении частотной модуляции. Это был радиопередатчик, предназначенный для нейтрализации немецких радиостанций, установленных на неприятельских самолетах и корректировавших артиллерийскую стрельбу противника.

В 1918 г. Минц окончил университет, возвратился в родной город и попытался воспротивиться экспроприации (принудительному лишению собственности) отцовского дома, был признан белым шпионом, арестован и ждал расстрела. Заключенному удалось заинтересовать руководство Первой конной армии идеей использования радиосвязи для управления частями в боевых условиях. Его освободили и после вступления

32. **Advanced** manufacturing of high performance superconductor wires for next generation electric machines. U.S. Department of energy, office of energy efficiency & renewable energy. DOE/EE-1589, October 2017 [Electron. resource] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/12/f46/Advanced%20Manufacturing%20G%20HTS%20Wires%20for%20Next%20Gen%20Electric%20Machines.pdf> (Data of appeal 14.05.2019).

33. **Enhanced** 2G high temperature superconducting (HTS) wire for electric motor applications. U.S. Department of energy, office of energy efficiency & renewable energy. DOE/EE-1588, December 2017 [Electron. resource] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/01/f46/Enhanced%20G%20HTS%20Superconducting%20Wire.pdf> (Data of appeal 14.05.2019).

34. **Cost-effective** conductor, cable, and coils for next generation electric machines. U.S. Department of energy, office of energy efficiency & renewable energy. DOE/EE-1586, January 2018 [Electron. resource] [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/01/f46/Conductor\\_Cable\\_Coils%20for%20Next%20Generation%20Electric%20Machines.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/01/f46/Conductor_Cable_Coils%20for%20Next%20Generation%20Electric%20Machines.pdf) (Data of appeal 25.05.2019).

35. **Fair R. et al.** Development of an HTS hydroelectric power generator for the hirschaid power station. – Journal of Physics: Conference Series 234 (2010) 032008.

36. **Keysan O. et al.** A modular and cost-effective superconducting generator design for offshore wind turbines. – Superconductor Science and Technology 28(3):034004, March 2015.

37. **Lee S.-H. et al.** Study on homopolar superconducting synchronous motors for ship propulsion application. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity 9(2):717 – 720, July 2008.

38. **Durrell J.H. et al.** Bulk superconductors: A roadmap to applications. – Superconductor Science and Technology 31 (10):103501, October 2018.

39. **A New Breakthrough** of Superconducting propulsion Motor. – Tokyo University of Marine Science and Technology (JP), 2018-08-03 [Electron. resource] <https://www.kaiyodai.ac.jp/english/topics/news/201808031559.html> (Data of appeal 15.05.2019).

40. **Samuel By, Moore K.** The troubled quest for the superconducting wind turbine. – IEEE Spectrum, 1 August, 2018 [Electron. resource] <https://spectrum.ieee.org/green-tech/wind/the-troubled-quest-for-the-superconducting-wind-turbine> (Data of appeal 15.05.2019).

41. **Abrahamsen A., Bech A.** New direct drive technologies of INNWIND.EU: Superconducting vs. Pseudo Direct Drive. Conf. Wind Energy Denmark – DOK 5000, Odense, Denmark, 26/10/2016-27/10/2016 [Electron. resource] [http://orbit.dtu.dk/files/127709705/New\\_direct\\_drive\\_technologies.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/127709705/New_direct_drive_technologies.pdf) (Data of appeal 15.05.2019).