

Энергосберегающие электрические машины (обзор зарубежных разработок)

ШУМОВ Ю.Н., САФОНОВ А.С.

Приведен обзор зарубежных публикаций по проблеме энергосбережения и энергоэффективности электрических машин для разных сфер применения: общепромышленный привод, частотно-регулируемый привод, сверхскоростные генераторы и электроприводы, специальный электропривод, электромобили и гибридные автомобили. Рассмотрены особенности, тенденции развития, методы снижения потерь для следующих видов бесконтактных (бесщеточных) машин: синхронных с постоянными магнитами, асинхронных, синхронных реактивных, вентильно-индукторных реактивных.

Ключевые слова: электрические машины, энергоэффективность, энергосбережение, методы уменьшения потерь, обзор зарубежных публикаций

Электрические машины являются важной составляющей электропривода производственных механизмов и систем генерирования, потребляя до 40% вырабатываемой в мире электроэнергии. Поэтому задача повышения энергоэффективности производственных процессов не может быть решена без применения соответствующих электрических машин высокого класса энергоэффективности (энергоэффективных электрических машин).

В настоящее время в мире существует и используется много национальных стандартов энергоэффективности (IEC, NEMA, SEMEP, EPACT, CSA, COPANT и др.), что создает трудности для производителей, ориентирующихся на мировой рынок.

Так, до сентября 2008 г. в Европе применялись стандарты SEMEP EN 60034-2:1996 и EN 60034-20-1:2007, в которых установлены три класса энергоэффективности двигателей: EFF3 – низкий КПД, EFF2 – стандартный КПД, EFF1 – повышенный КПД. В сентябре 2008 г. принят стандарт IEC 60034-30:2008, устанавливающий четыре класса энергоэффективности двигателей: IE1 – нормальный (стандартный), IE2 – повышенный, IE3 – премиум, IE4 – супер-премиум. Сравнивая указанные стандарты, можно заметить, что классу энергоэффективности EFF1 в новом стандарте соответствует лишь класс IE2, идентичный классу энергоэффективности EPACT в США для частоты 60 Гц. Класс IE3 превосходит классы энергоэффективности EFF1, IE2 и соответствует классу «NEMA Premium» в США для 60 Гц (стандарт NEMA применяется для рынков США, Канады, Мексики). На основе стандарта IEC 60034-30:2008 в странах Евросоюза разработан стандарт EN 60034-30:2009, также запрещающий производство и использование двигателей класса EFF3. В России на основе IEC 60034-30:2008 разработан и введен в действие с 01.06.2012 ГОСТ Р 54413-2011.

По прогнозам IHS всемирный объем продаж электродвигателей (ЭД) класса IE3 к 2018 г. удвоится по сравнению с 2014 г. и составит 8 млрд долл. США, при этом скорость роста продаж ЭД класса IE3 превышает скорость падения продаж ЭД класса IE2 [1]. Согласно [2] мировой рынок общепромышленных ЭД класса IE4 (Super Premium) оценивается в 165,4 млрд долл. США в 2012 г. и вырастет к концу 2015 г. до 418,2 млрд долл.

Энергоэффективные электрические машины (ЭМ) класса не менее IE2 производят GE Motors, Leroy Somer, Noth American Electric, SEW Eurodrive, Siemens, Toshiba Inc., WEG Electric Motors, Baldor Electric, ABB, Regal Beloit Crompton Greaves, Emerson Electric, AO Smith, Leeson, Rockwell, Sterling Electric, Brook Grompton, Hyosung, Teco, Lafert Electric Motors, Nord, Grundfos, ATB Brook Gromton, Bauer Gear Motor, Mitsubishi Electric, AKM Kollmorgen, Lönne, Marathon Electric, Orbito, Welko Technologies и др.

В РФ энергоэффективные ЭМ внедряются и разрабатываются медленнее, чем в других развитых странах. Это отчасти объясняется избытком, доступностью и относительно дешевой энергоресурсов, поэтому российские компании, в первую очередь, интересуются ценой устанавливаемого оборудования.

Повышение класса энергоэффективности и, значит, уменьшение потерь в ЭМ обеспечивают следующие мероприятия:

уменьшение электромагнитных нагрузок: линейной A , плотности тока в обмотках j , магнитной индукции в воздушном зазоре B_d и, как следствие, увеличение массы активных материалов;

использование для магнитопровода более тонкой электротехнической стали с меньшими удельными потерями и большей магнитной проницаемостью;

оптимизация размеров пазов статора и ротора;

применение в асинхронных двигателях (АД) для обмотки ротора меди вместо алюминия;

уменьшение воздушного зазора и увеличение его равномерности за счет более точной технологической обработки, обеспечивающей сверхточную соосность всех геометрических центров;

усовершенствование вентиляции, способствующей уменьшению вентиляционных потерь и уровня шума;

установка подшипников более высокого класса с меньшими потерями на трение [3].

В мире широко проводятся исследования и разработки новых материалов и технологий, направленных на повышение энергоэффективности ЭМ. Так, в [4] предложено для магнитопровода ЭМ средней мощности использовать анизотропную сталь марок М80-23Р, М-123-35Р, М140-35С, при этом предлагается шихтовать сердечник с поворотом каждого листа на 90° относительно предыдущего в направлении прокатки. Эксперименты на АД с $P=10$ кВт показали, что h увеличивается на 2%, уменьшаются ток и $\cos \phi$ холостого хода, а также шум и вибрация.

Один из способов уменьшения потерь – установка в ЭМ подшипников с уменьшенными потерями, которые выпускает, например, компания SKF (Швеция). Шариковые подшипники серии E2 рассчитаны на диаметр вала 25, 60 мм двигателей мощностью $P=2, 37$ кВт. Трение у этих подшипников на 30, 50% меньше по сравнению с аналогами. Кроме экономии электроэнергии, это способствует также значительному увеличению срока службы подшипникового узла. Утверждается, что для ЭД мощностью $P=7,5$ кВт, $n=3000$ мин⁻¹ годовая экономия составит 94 кВт/ч [10].

NSK Ltd. (Япония) также производит энергоэффективные подшипники, трение которых уменьшено в 2 раза по сравнению с аналогами, это уменьшает потери на трение и нагрев и, следовательно, увеличивает срок службы.

В [6, 7] приведены данные по влиянию материала магнитопровода на показатели сверхскоростного АД ($P=20$ кВт, $n=30 \times 10^3$ мин⁻¹). Для одного варианта использовалась кремнистая сталь с содержанием кремния 4%, для другого – кобальтовая сталь (49% кобальта, 1,9% ванадия, 49,1% железа). Исследования показали, что при использовании кобальтовой стали показатели АД улучшаются, уменьшается нагрев, однако стоимость АД значительно возрастает, к тому же кремнистая сталь более технологична.

Радикальной мерой по снижению потерь является применение для АД литой медной обмотки ротора [3].

Меры по увеличению энергоэффективности ЭМ рассмотрим на примерах изделий отдельных производителей: синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ), асинхронных машин (АМ), синхронных реактивных машин (СРМ), вентильно-индукторных реактивных машин (ВИРМ). При этом будем рассматривать с точки зрения энергоэффективности не только ЭМ общепромышленного исполнения, но и специальные ЭМ, в частности встраиваемые, находящие применение в сверхскоростных газовых турбоагрегатах и турбокомпрессорах, электромеханических накопителях энергии (ЭМН), электромобилях и гибридных автомобилях и др.

Многие исследователи считают СМПМ самыми перспективными с точки зрения энергоэффективности, их можно выполнять с классом энергоэффективности IE4. Преимущества СМПМ: высокий КПД, хороший график зависимости $n=f(M)$ при частотном регулировании и высокие динамические характеристики, менее требовательны эти машины к обслуживанию, имеют длительный срок службы, низкий уровень шума, возможность выполнения сверхскоростными и ультраскоростными, обладают высокими массогабаритными показателями, при частотном регулировании не требуют обязательного применения обратной связи по положению ротора. Недостатки СМПМ: обеспечение энергоэффективности в некоторых случаях возможно только за счет регулирования частоты вращения, высокая стоимость из-за использования в конструкции редкоземельных металлов. Области применения СМПМ: привод насосов, компрессоров и воздуходувок, газовые турбоагрегаты, ветроагрегаты, электромеханические накопители, сверхскоростной привод, электромобили и гибридные автомобили, станки с ЧПУ. СМПМ используются как двигатели (СДПМ), генератор-двигатели (Г/Д) или генераторы (СГПМ).

СДПМ класса энергоэффективности IE4 производят: WEG Electric, Baldor, Marathon Electric, Nova Torque, Grundfos, SEW Eurodrive, WEM Motors, Bauer Gear Motor, Leroy Somer, Infranor, Teco Electric & Machinery, Mitsubishi Electric, Hitachi, Ziehl-Abegg, Lafert Motors, Lonne, Hiosung, Motor Generator Technology, Jinch Motor, SKF, Hannig Electro-Werke. Некоторые из этих производителей с целью максимального удовлетворения запросов рынка одновременно выпускают двигатели как разного принципа действия, так и разного класса энергоэффективности. Так, WEG выпускает АД классов энергоэффективности IE3, IE4 и СДПМ IE4, АВВ выпускает АД класса IE4 и синхронные реактивные двигатели (СРД) также IE4.

Marathon Electric, Baldor выпускают АД класса IE3 и СДПМ класса IE4.

СДПМ можно разделить на две группы: двигатели, предназначенные для работы от сети (с прямым пуском – СДПП) и для работы с преобразователем частоты (ПЧ) в частотно-регулируемом приводе (ЧРП). Некоторые разработчики считают, что СДПМ можно выполнить с классом энергоэффективности IE5 (пока не утвержденным). Основным преимуществом СДПМ является отсутствие основных потерь в роторе. Ввиду отсутствия обмотки возбуждения в роторе выделяются только добавочные потери от высших гармонических как в сердечнике ротора и ПМ, так и в короткозамкнутой пусковой обмотке (при её наличии). Недостатки СДПП – повышенный шум при пуске, наличие, кроме пускового момента, также и тормозного, трудности демонтажа при ремонте из-за одностороннего магнитного притяжения от ПМ. Кроме того, СДПП по сравнению с АД имеют более низкие значения M_{\max} и M_{Π} , больший I_{Π} , более длительный пуск, при котором в обмотке статора наводятся токи частоты скольжения (он может развернуться в противоположном направлении). Другие недостатки СДПП: чувствительность в отличие от АД к провалам напряжения; при несимметрии питающего напряжения рост добавочных потерь от обратноротационного поля. Однако в [8] делается вывод об их большей энергоэффективности, чем АД.

Mitsubishi Electric (Япония) производит СДПМ серии MM-EFS мощностью $P=0,75, 55$ кВт, предназначенные для работы с ПЧ. У этих машин КПД выше, чем требования IE4, причем на 6% выше, чем у IE3 и на 1,3%, чем у двигателей серии MM-EF. Например, для двигателя мощностью $P=3,7$ кВт потери в меди меньше на 54%, в стали на 20%, а общие потери на 43%. Для уменьшения магнитных потерь используется тонколистовая сталь с улучшенными характеристиками. Диапазон частоты вращения $n=600, 2000$ мин⁻¹, назначение – привод насосов и вентиляторов [9].

Один из крупнейших производителей ЭМ фирма Legoу Somer (Франция) выпускает серию СДПМ Duneo мощностью 0,75, 400 кВт, предназначенных для ЧРП. В диапазоне частоты вращения 100, 10x10³ мин⁻¹ КПД этих машин выше, чем у аналогичных АД. Серия 3000 предназначена для работы от сети и отличается малой массой. Так, СДПМ типа LSRPM 280 SC мощностью $P=220$ кВт имеет массу 330 кг, в то время как стандартный АД ($P=220$ кВт, $n=3000$ мин⁻¹) весит 1100 кг. Ввиду низкой температуры ротора интервал пополнения смазки между очередными заполнениями в 2,5 раза больше, чем у стандартных АД; КПД СДПМ Duneo

выше, чем у АД, во всем диапазоне частоты вращения при работе с ПЧ [10, 11].

Некоторые производители в последнее время для увеличения компактности и уменьшения габаритов ЧРП объединяют в один мехатронный модуль двигатель и ПЧ. Такое объединение целесообразно при мощности ЧРП в несколько киловатт. При этом уменьшаются не только габариты, но и длина кабеля между двигателем и ПЧ. Такие интегрированные приводы выпускают Grundfos, Lafert Motors, SEW Eurodrive.

Например, в ЧРП фирмы Lafert Motors (Италия) на СДПМ устанавливается ПЧ. Эта фирма выпускает серию ЧРП HPI мощностью 0,37, 30 кВт и частотой вращения до 6, 10³ мин⁻¹ класса IE4. В состав ЧРП серии HPI входит СДПМ 2,2 кВт, 1500 мин⁻¹, габарита 90, $\eta=88\%$, $G=15$ кг. Аналогично ЧРП с АД 2,2 кВт, 1430 мин⁻¹, габарита 100, $\eta=81\%$, т.е. ЧРП с СДПМ имеет меньшую массу и на 7% больший КПД [12].

Крупный производитель насосов (до 16 млн в год) концерн Grundfos (Германия) в 2013 г. начал выпуск ЧРП, интегрированных с СДПМ серии MGE класса энергоэффективности IE4, мощностью 0,37, 2,2 кВт и предназначенных для насосов. Наряду с СДПМ класса IE4 Grundfos выпускает также АД класса IE3 [13].

В [14] утверждается, что благодаря СДПМ серий MGE и MLE класса IE4, работающих совместно с ПЧ и объединенных с ним в модуль, насосы Grundfos являются самыми «интеллектуальными» и энергоэффективными во всем мире.

Одна из крупнейших корпораций WEG (Бразилия) для расширения рынка наряду с СДПМ серий W Quattro (для питания от сети с прямым пуском) и W Magnet (для ЧРП) выпускает АД серии W21 класса IE3 и серии W22 класса IE4. Серия W Quattro охватывает диапазон мощностей 0,37, 7,5 кВт в габаритах 80, 132, а W Magnet – 11, 160 кВт, $n=180, 3600$ мин⁻¹ в габаритах 132, 250. СДПМ W Magnet не требуют принудительной вентиляции, марка магнитов NdFeB, короткозамкнутая пусковая клетка на роторе. Для унификации эти СДПП выполняются с базовыми размерами и в корпусе АД серии W22, КПД в пределах 84, 93%, что превышает нормы по IE4. Изоляция типа WISE рассчитана на работу с ПЧ [15, 16].

VEM-Motors GmbH (Германия) выпускает СДПМ серии PE1R класса IE4, имеющее вращающие моменты 2,5, 1600 Нм, $n_{\max}=3000$ мин⁻¹, $P=0,75, 375$ кВт, КПД в пределах 84,9, 98,4% и предназначенные для работы с ПЧ без пусковой обмотки на роторе [17, 18].

SEW Eurodrive (Германия) выпускает серию СДПП DRU класса IE4 мощностью 0,18, 2,2 кВт в

габаритах 71, 100, $2p=4$. Эти СД разработаны на базе АД, имеют пусковую обмотку и могут напрямую подключаться к сети; основное назначение – привод насосов. Также разработана мехатронная система привода Movigear (СДПМ типа DRC + ПЧ), причем СДПМ DRC1 мощностью $P=0,55$ кВт ($M=2,6$ Нж), а DRC2 – $P=2$ кВт ($M=7,2$ Нж); ПЧ устанавливается на двигатель, который может сочленяться с редуктором [19, 20].

СДПП выпускают WEG, SEW Eurodrive, Hyosung, а СДПМ для ЧПП – Lafert Motors, VEM-Motors, Hyosung, Motor Generator Technology, Leroy Somer, Marathon Electric, Nova Torque, Hitachi, Infranor, Ziehl-Abegg, Mitsubishi Electric, Grundfos, Jinch Motor, SKF.

Целый ряд организаций разрабатывает СМПМ со структурой ПМ, намагниченных по Халбаху (Halbach array), которые особенно перспективны для ЭМН. При этом ПМ намагничиваются не в радиальном направлении, а в радиально-тангенциальном [21]. Преимущества намагничивания по Халбаху: меньшая искаженность синусоидального поля в немагнитном зазоре; возможность выполнения сердечника статора беспазовым и даже безжелезным, что увеличивает заполнение пространства обмоточной медью и уменьшает магнитные потери в нем; уменьшение добавочных потерь от высших гармонических в роторе. Некоторые параметры исследуемой СМПМ: $P_{\max}=50$ кВт, $n_{\max}=84 \times 10^3$ мин⁻¹, провод многожильный, $\eta=99,64\%$.

В последнее время СМПМ, особенно сверхскоростные, не только вытесняют другие типы ЭМ в общепромышленном электроприводе, но и в ЭМН.

ЭМН с СМПМ производят или разрабатывают: General Electric, ATZ-MM, Calnetix, Vycon Energy, AFS Trinity, Beacon Power, GRC, UT-CEM, LLNL, Boeing, rosseta Technik, Urenco, NEDO, NOVEM, ABB, ALLID Signal Aerospace.

В ЭМН VDC-XE фирмы Vycon Energy встроена СМПМ: $P_{\max}=300$ кВт, $n_{\max}=36 \times 10^3$ мин⁻¹, $\eta_{\max}=99,4\%$ (АМП, вакуум) [22].

Специалисты Vycon Energy предпочитают применение СМПМ по сравнению с вентильно-индукторной реактивной машиной (ВИРМ) благодаря малым потерям в роторе. В ВИРМ же сердечник ротора перемагничивается, поэтому потери выше, чем у СМПМ, а так как внутреннее пространство Г/Д вакуумируется и используются активные магнитные подшипники (АМП), то теплопередача ротора осуществляется только радиацией, а при разряде (торможении) нагрев ротора недопустимо велик.

В [23] рассматривается проект СМПМ для ЭМН ($P=28$ кВт, $n=60 \times 10^3$ мин⁻¹), статор выполнен без стали. Такая конструкция возможна благо-

даря намагничиванию ПМ по Халбаху [21]. Обмотка статора выполнена из многожильных проводников. Если потери холостого хода P_0 для традиционной конструкции составляли 210 Вт, а $\eta=96\%$, одностороннее магнитное притяжение $F=14$ Н у аналога, то у предлагаемой конструкции $P_0=21$ Вт, $\eta=98\%$, $F=0,7$ Н; ротор СМПМ вращается в вакууме, подшипники АМП [23].

В [24] спроектирован СГПМ для ЭМН космического аппарата ($P=7,6$ кВт, $n=50 \times 10^3$ мин⁻¹). Для уменьшения потерь сокращена полюсная дуга, обмотка статора выполнена двухслойной, машина имеет относительно большой немагнитный зазор ($d=2,5$ мм), малый шлиц паза статора; ПМ в аксиальном направлении сформированы из пластин толщиной $D=67$ мм для уменьшения потерь от высших гармонических; для снижения магнитных потерь в режиме холостого хода, что важно для ЭМН при вращении в этом режиме, для сердечника принята кобальтовая сталь толщиной 0,1 мм. Благодаря этим мерам обеспечен $\eta=98\%$.

В качестве энергосберегающих генераторов для сверхскоростных газовых турбоагрегатов при частоте вращения большей, 20×10^3 мин⁻¹, и мощности от 1 до 2×10^3 кВт в основном находят применение СМПМ ($\eta=92,98\%$), реже АМ и ВИРМ [25]. Для сверхвысоких частот вращения (более 40×10^3 мин⁻¹) и для привода, например турбокомпрессоров, чаще используются СМПМ [26].

В [27] исследовались потери в СМПМ, разработанной фирмой Calnetix и предназначенной для газового микроагрегата ($P=120$ кВт, $n=70 \times 10^3$ мин⁻¹). Некоторые данные этой машины: $D_a=101,6$ мм; $D_i=63,8$ мм; $D_2=61,2$ мм; $2p=4$; $z_1=24$; $m=3$; $\eta=97\%$. Потери в роторе (подшипники) составили 15,9 Вт, в ПМ – 206 Вт, вязкого трения (о воздух) – 874 Вт, общие потери – 3666 Вт, т.е. приблизительно $0,03P$. Наибольшее значение η у СГПМ в составе газовых микротурбогенераторов составляет 97% ($P=110$ кВт, $n=70 \times 10^3$ мин⁻¹) – фирма АБВ и 97,5% ($P=2$ МВт, $n=22 \times 10^3$ мин⁻¹) – фирма Calnetix [25].

В [28] исследовался СГПМ, спроектированный МГТ для военно-морского корабля ($P=16$ МВт, $n=13 \times 10^3$ мин⁻¹). Некоторые данные генератора: диаметр ротора $D_2=294$ мм, длина сердечника статора $l_1=838$ мм, число пазов статора $Z_1=36$, число полюсов $2p=6$, воздушный зазор 4 мм при индукции в зазоре 0,8 Тл, плотность тока в обмотке статора $17,6$ А/мм², $\eta=99,2\%$.

В [29] изучались меры по снижению потерь в СГПМ – $P=110$ кВт, $n=70 \times 10^3$ мин⁻¹, $\eta=97\%$. Для уменьшения потерь от высших гармонических тока между инвертором и СГ установлен фильтр, обмотка 6-фазная 2/3, инвертор многоуровневый.

Для уменьшения потерь от высших гармонических применено экранирование ПМ медной гильзой, увеличены воздушный зазор и электрическое сопротивление ПМ, улучшена геометрия подшипников [26].

Уменьшение потерь в роторе СМПП достигается за счет увеличения немагнитного зазора и сопротивления ПМ, установки фильтра между «электроникой» и СМПП, использования для бандажа углеволоконного композита вместо металлической гильзы, применения для сердечника статора беспазовых конструкций, распределенной обмотки. Высокоскоростные СМПП как двигатели устанавливаются в турбокомпрессорах, сверлильных инструментах, как генераторы – в газовых турбинах, как Г/Д – в ЭМН. Для уменьшения потерь на статоре применяется тонколистовая кремнистая сталь с содержанием кремния до 6,5%, обмотка выполняется из многожильных проводников. Для уменьшения потерь трения о воздух в высокоскоростных ЭМН применяется вакуумирование. Для уменьшения потерь в подшипниковых опорах используются активные (управляемые) магнитные подшипники (АМП), а также газовые, ведутся работы по созданию бесподшипниковых конструкций ЭМ [25, 26].

Самая высокая энергоэффективность СМПП может быть обеспечена за счет применения в материале ПМ сплава на основе неодима, относящегося к группе редкоземельных металлов.

Основные месторождения редкоземельных металлов в виде примеси к руде других металлов находятся в Китае (97%). Более 90% экспорта также приходится на Китай. По пессимистическим прогнозам, к 2025 г. всемирная потребность в неодиме составит 70×10^3 т, а на рынок может поступить только 40×10^3 т [30]. По прогнозу (2012 г.) из доклада Конгресса США, потребность в редкоземельных металлах к 2015 г. достигнет максимум 185×10^3 т, что значительно больше объема, предлагаемого рынком. С учетом растущих цен на неодим ряд разработчиков и исследователей ищут возможность замены или уменьшения его содержания в ПМ [31].

В Uni. of Alabama разработана наноструктура ПМ без редкоземельных металлов, на основе железа и марганца. Такие ПМ не размагничиваются при высокой температуре и имеют лучшие характеристики, чем ПМ с редкоземельными металлами [22].

Группа исследователей NIMS (Япония) разработала новую марку ПМ на основе неодима NdFe_{12}N , в котором содержание неодима составляет 17%, в то время как в компаунде NdFe_{12}B – 27%, при этом у нового компаунда магнитные свойства выше, точка Кюри (температура размаг-

ничивания) 200°C , что имеет значение для ЭМ, работающих с температурными перегрузками [32].

Разрабатываются конструкции СМПП на ПМ из дешевых ферритов. Так, для СДПП фирмы Nova с аксиальным магнитным потоком в качестве ПМ используются ферриты. Некоторые данные одного из СДПП: $P = 3,75$ кВт (5 л.с.), $n = 1800$ мин⁻¹, $M = 20$ Нж, $\eta = 93\%$, $D = 179$ мм, $L = 800$ мм, $G = 30$ кг. Значение КПД мало изменяется в широком диапазоне n и M и при частотном регулировании в диапазоне $n = 1200, 2400$ мин⁻¹ составляет $\eta = 87, 92\%$, а аналог – АД класса NEMA Premium (IE3) имеет $\eta = 75, 87\%$ [33].

В [34] сравнивались два опытных образца СГПП со следующими данными: $D_a / D_i = 886/760$ мм, $l_d = 222$ мм, $d = 10$ мм, $q = 4/5$, $n = 127$ мин⁻¹, $2p = 32$, $f = 33,9$ Гц. У СГПП с ПМ из NdFeB индукция в зазоре $B_d = 0,79$ Тл, $\eta = 95,8\%$, у СГПП с ферритовым ПМ $B_d = 0,66$ Тл, $\eta = 95,6\%$.

Фирмой Hitachi разработан СДПП класса IE4 на ферритах с аксиальным магнитным потоком, причем ротор состоит из двух конусообразных частей. Такой двигатель меньше аналогичного стандартного АД; сердечник статора выполнен из шихтованной аморфной стали FeSiB толщиной 0,025 мм с удельными потерями, в 10 раз меньшими, чем у обычной электротехнической стали. Показатели: $P = 11$ кВт, $\eta = 93\%$, что соответствует классу IE4 [35].

Подтверждением того, что в ряде случаев в СДПП редкоземельные ПМ могут быть заменены ферритами, является разработка в Европе мехатронного модуля, объединяющего СДПП, инвертор и редуктор для электромобиля 3-го поколения. Первоначально в проекте «Motor Brain», бюджет которого составляет 36 млн евро, участвовали 4 компании, теперь – 30 компаний и университетов из 9 стран. Опытный образец выставлялся в апреле 2014 г. на Ганноверской ярмарке. При этом масса привода мощностью $P = 60$ кВт уменьшена с 90 до 77 кг. Благодаря энергоэффективности привода пробег электромобиля на одной подзарядке аккумуляторной батареи увеличился со 150 до 180, 190 км. Поскольку вместо редкоземельных ПМ использованы ферриты с гораздо меньшей энергией, чем NdFeB, то для компенсации увеличения габаритов ЭД была принята гораздо большая частота вращения, чем у аналога.

В General Electric (GE) успешно испытан СДПП мощностью $P_{\max} = 55$ кВт, предназначенный для подзаряжаемых гибридных автомобилей; КПД этого СДПП выше на 3,5% по сравнению с аналогом, выше и удельная мощность. Габариты $D_1 = 234$ мм, $l = 130$ мм (включая лобовые части), обмотка кольцевая. Специалисты GE разработали

новую марку ПМ с повышенным электрическим сопротивлением, что уменьшает потери в ПМ от полей высших гармонических. В 2015 г. намечено внедрение электродвигателя в производство, разработка СДПМ без использования в материале ПМ редкоземельных элементов, а также расширение производства энергоэффективных общепромышленных ЭД, высокоскоростных компрессорных ЭД и генераторов для космических аппаратов [36, 37].

Во всём мире наметилась четкая тенденция повышения энергоэффективности асинхронных машин (АМ), что проявляется в переходе к более высокому классу энергоэффективности. С целью снижения потерь, уменьшения нагрева за счет увеличения стоимости АМ производители идут на снижение электромагнитных нагрузок (магнитной индукции, плотности тока, линейной нагрузки), а значит увеличения массы активных материалов и габаритов, использования более дорогой электротехнической стали с уменьшенными магнитными потерями и большей магнитной проницаемостью, усложнения технологии получения прецизионного воздушного (немагнитного) зазора, применения для обмотки ротора меди вместо алюминия, подшипников с меньшими потерями. Все эти меры способствуют также уменьшению шума и вибрации, увеличению интервала между регламентными работами, повышению срока службы и надежности.

Одним из методов снижения потерь является изготовление обмотки ротора путем заливки медью под давлением [3]. Этот метод, разработанный для крупносерийного производства в начале 2000-х годов, внедрили в серийное производство фирмы: Siemens, SEW–Eurodrive, FAFI, Breuckmann GmbH, Yunnan Copper Die-casting Technology Company Ltd., Siemens Energy & Automation Inc.

Филиал Siemens в США – Dietz Electric – производит серию TEFC асинхронных двигателей с медной обмоткой ротора (АДМО) мощностью $P=1, 20$ л.с. Двигатели имеют изоляцию класса F, но рассчитаны по нагреву на класс B, сервис-фактор 1,15. Вал выполнен из прочной углеродистой стали C1045, а сердечник статора – из электротехнической стали высшего (premium) качества. Плотность тока в обмотке статора уменьшена по сравнению с общепринятой, изоляция по характеристикам превышает нормы NEMA MG1-20003, part 31, что делает возможным работу АД с ПЧ. Подшипники с закладываемой на весь срок службы смазкой выполнены на основе полиуретана, с запасом по перегрузочной способности; КПД этих двигателей соответствует Ultra EFF и превышает Premium EFF. Другая фирма Siemens в США – Siemens

Energy & Automation Inc. – выпускает подобную серию АДМО – SE & A. Например, АД этой серии мощностью $P=10$ л.с. (7,5 кВт) имеет $\eta=92,4\%$, при $P=0,75P_n$ – $\eta=90,7\%$, что соответствует IE4 [38, 39].

Международная организация SEAD, с которой сотрудничают 16 государств, на церемонии в Цюрихе наградила медалями за разработку энергоэффективных двигателей фирмы Nanyang Explosion Protection Group Company (Китай, АД мощностью $P=4$ кВт) и Siemens Ltd. (Индия, АД на $P=11$ кВт); в обоих двигателях обмотка литая медная [40].

Примером производителя энергоэффективных АД без использования меди в роторе является Baldor (США), входящая в состав ABB Group. В серии Super-E, $P=1, 500$ л.с., обеспечивается энергоэффективность выше класса IE3 и приближается к IE4. Снижение потерь в этих АД достигнуто за счет увеличения объема меди в статоре, использования электротехнической стали улучшенного качества, уменьшения воздушного зазора, оптимизации вентиляции и снижения вентиляционных потерь и потерь в подшипниках. Baldor устанавливает на двигателях высококачественные подшипники с точной динамической балансировкой и смазкой Polynex EM фирмы Exxon, устойчивой к вытеканию и имеющей в 4 раза больший срок службы, чем другие виды полиуретановых смазок. Изоляция обмотки выполнена по классу F, при нагреве по классу B, что обеспечивает сервис-фактор 1,15. Изоляция рассчитана также для работы АД с ПЧ. Проводники обмотки «magnet wire» ISR (inverter spike resistor) имеют сопротивляемость импульсам напряжения в 100 раз большую, чем обычный обмоточный провод [41].

В энергоэффективных АД, выпускаемых ABB, приняты усовершенствования, снижающие потери, но приводящие к увеличению стоимости. Дополнительные затраты окупаются за счет экономии электроэнергии в течение нескольких месяцев. Утверждается, что установленные ABB приводы в 2011 г. сэкономили 310×10^6 кВт·ч энергии.

Частотно-регулируемый привод насоса ABB ($P=400$ кВт) обеспечил годовую экономию 660×10^3 кВт·ч. На одном из заводов в Италии были заменены 22 электродвигателя мощностью 5,5, 7,5 кВт на энергоэффективные ABB в 15 приводах, что дало годовую экономию 572×10^3 кВт·ч. За счет уменьшения потерь снижена температура подшипников, благодаря чему увеличены интервалы между очередными заменами смазки, уменьшение нагрева обмотки обеспечило увеличение срока службы [42].

Отделение компании Crompton в Индии (Crompton Greaves Ltd) выпускает серию энергоэф-

фактивных АД мощностью 0,37, 450 кВт класса Eff1 (IE2). Для уменьшения потерь, особенно при частичных нагрузках, используется электротехническая сталь с улучшенными характеристиками и более тонкая, чем для АД класса Eff2. Для уменьшения потерь в меди применены проводники обмотки увеличенного сечения, уменьшена магнитная индукция, для чего увеличена длина пакета сердечника, уменьшена неравномерность воздушного зазора с целью уменьшения добавочных потерь, а для уменьшения вентиляционных потерь усовершенствована конструкция вентилятора [43].

Siemens выпускает две серии АД класса IE4, у которых КПД выше на 14%, чем у АД класса IE1 и на 3% выше, чем у АД класса IE3. Эти АД рассчитаны на 2,2, 200 кВт и могут работать с ПЧ [44], для чего используется изоляция DURIGNIT IP2000. Утверждается, что при ежегодной наработке 2000 ч в течение 10 лет стоимость АД составит около 3% общих затрат на эксплуатацию АД. Доля затрат на электроэнергию составит около 95%, а на монтаж и техническое обслуживание АД – около 2% [45].

General Electric производит серию АД GEX\$D Ultra, которая характеризуется низкой температурой нагрева обмотки (нагрев на 40% ниже, чем допускается по классу В), низким уровнем вибрации (подшипники Six Star Biering System), высоким КПД – NEMA Premium (класс IE3) [46].

General Electric производит также несколько серий АД мощностью 1, 50 л.с. ($n=1800 \text{ мин}^{-1}$), $P=1, 300$ л.с. ($2p=2, 4, 6$), соответствующих требованиям NEMA Premium (класс IE3). Класс нагревостойкости F. Изоляция Gegard 180, рассчитана для работы с ПЧ. Сервис-фактор 1,15, расчетное превышение температуры 80 °С (по классу В) [47].

Leeson Canada Inc. выпускает серию энергоэффективных АД Wattsaver класса Premium (IE3) на 1/3, 2000 л.с. для систем кондиционирования и вентиляции. Двигатели рассчитаны для работы с ПЧ в диапазоне изменения n и M 10:1 при векторном управлении. С этой целью обмотка статора имеет изоляцию IRIS для защиты от импульсов напряжения инвертора. Двигатели имеют сервис-фактор 1,15 класса изоляции F при нагреве по классу В [48].

Фирма Marathon выпускает серию АД Blue Chip XP класса NEMA Premium (IE3) на 3/4, 600 л.с. с медной обмоткой ротора, отлитой под давлением. Для дополнительного уменьшения потерь увеличена длина сердечника и используется электротехническая сталь с уменьшенными потерями. Подшипники – шариковые с жидкостной смазкой, изоляция класса F при нагреве по классу В, сервис-фак-

тор 1,15; изоляция MAX Guard рассчитана для работы с ПЧ [49].

WEG (Бразилия) выпускает АД классов IE3 и IE4 на 3, 355 кВт, габаритов 132, 355 мм, КПД 90,9, 97%. При разработке машин увеличено удельное содержание активных материалов, за счет сверхточной соосности всех геометрических центров максимально уменьшен воздушный зазор, применена электротехническая сталь с уменьшенными удельными потерями [50].

Фирма WEG использует в создаваемых ЭМ электротехнические стали марок E230 (потери 5,19 Вт/кг при $B=1,5$ Тл, 60 Гц), E170 (4,33 Вт/кг при $B=1,5$ Тл, 60 Гц). Уменьшение потерь в машинах WEG обеспечивается за счет увеличения массы меди на 20, 60% и электротехнической стали на 35%, применения подшипников с уменьшенными потерями SKF, NSK [51].

Разрабатываемые фирмой WEG АД серии W22 Super Premium (IE4) имеют потери на 20% меньшие, чем предусмотрено NEMA Premium (IE3), и работают с пониженным уровнем шума, сервис-фактор 1,25. Предусмотрен плавный пуск (soft starter), что делает АД более эффективными [52].

Для увеличения энергоэффективности АД в [53] предлагается для снижения магнитных потерь использовать сталь 5350H, которая имеет малые удельные потери (3,5 Вт/кг при $B=1,5$ Тл) и достаточно высокую магнитную проницаемость. Эксперименты показали, что сочетание медной обмотки ротора и стали 5350H для АД 3 кВт обеспечило увеличение КПД на 2,5% и снижение нагрева обмотки на 16 °С. У АД 7,5 кВт значение КПД увеличилось на 3,9%, снизился нагрев обмотки на 24 °С; для АД 15 кВт значение КПД выросло на 1,8%.

Производители разрабатывают и выпускают также реактивные синхронные двигатели (РСД). Так, АВВ (Швейцария), KSB (Германия), REEL (Италия) производят РСД для привода насосов, вентиляторов, компрессоров, конвейеров. Ранее выполнялись РСД мощностью менее 1 кВт и работали от сети, для пуска служила короткозамкнутая обмотка [54]. Они не находили широкого применения из-за ряда недостатков: плохого использования габарита, небольшой перегрузочной способности, низкого $\cos\phi$. Достоинством их было в отсутствии на роторе обмотки возбуждения и ПМ. При работе в составе ЧРП ряд недостатков не имеют решающего значения. Например, низкий $\cos\phi$ только увеличивает ток в инверторе и потери в кабеле между инвертором и РСД. Однако у РСД отсутствуют потери в роторе, что способствует малому нагреву ротора и, следовательно, подшипников. В результате возрастают ресурс подшипников и надежность двигателя. Суммарные потери при прочих равных

условиях меньше, чем в АД. В результате РСД проще и с меньшими затратами можно выполнить по классу энергоэффективности IE4, чем АД. Другое преимущество РСД перед АД при работе с ПЧ – меньшее снижение КПД в области малых нагрузок. Преимущество перед СДПМ: более легкий демонтаж при замене подшипников, поскольку нет одностороннего магнитного притяжения; меньшие потери при холостом ходе.

ABB выпускает РСД серии Syn RM мощностью 11,350 кВт. В сопоставимом АД потери в роторе составляют 20,35% общих потерь. Кроме того, СРД этой серии на два габарита меньше, чем АД. Например, двигатель $P=22$ кВт, $n=1500$ мин⁻¹, габарита 180 имеет $G=174$ кг, $\eta=92,8\%$ в составе ЧРП, а АД класса IE2 той же мощности имеет габарит 180, $G=222$ кг, $\eta=91\%$; РСД 37 кВт, 1500 мин⁻¹ имеет габарит 160, $G=157$ кг, $\eta=93,7\%$, а АД такой же мощности имеет габарит 200, $G=298$ кг, $\eta=92,2\%$.

Примером успешного проекта ABB является замена АД класса IE2 в ЧРП насоса мощностью 86 кВт на СРД серии Syn RM. Отмечено, что этот СД меньше нагревается и шумит, а его КПД на 6% больше, чем у АД, причем температура корпуса меньше, а уровень шума уменьшился с 78 до 72,3 дБА при $n=1500$ мин⁻¹ [55, 56]. Syn RM предназначены в основном для привода насосов и вентиляторов, по стоимости они сопоставимы с АД, а поскольку предназначены для работы только с ПЧ, то это учитывается в каталогах при указании значения КПД. Например, АД класса IE2 45 кВт, $n=3000$ мин⁻¹ при синусоидальном напряжении имеет $\eta=92,92\%$. Добавочные потери при работе от ПЧ составляют 20% общих потерь, т.е. при работе с ПЧ КПД АД составит $\eta=91,5\%$. Аналогичный Syn RM при работе с ПЧ имеет $\eta=94,6\%$. Syn RM может работать с таким же ПЧ, как и АД [57].

Фирма KSB, начиная с 2012 г., выпускает РСД класса IE4 мощностью 0,55, 45 кВт серии Su Prem E, предназначенные для работы с ПЧ. Экономия электроэнергии при этом достигает 60% за счет регулирования частоты вращения и 30% за счет энергоэффективности РСД [58]. Особенно велико преимущество этих двигателей при частичной нагрузке. Так, при нагрузке $P=0,25P_n$ значение КПД двигателя мощностью 7,5 кВт, $n=1500$ мин⁻¹ составляет 63,2%, а у такого же АД класса IE2 только 39,2%.

Двигатели KSB серии Su Prem E получили титул самого впечатляющего изобретения в области энергосбережения на ежегодной конференции межотраслевой ассоциации немецких предприятий DENEFF (2014 г.), а на Ганноверской ярмарке 2012 г. концерн KSB получил награду за достиже-

ния в области промышленности [58]. Эта фирма производит РСД в соответствии с патентом США [59], а также другими патентами. Отмечается, что разработанные ЭД имеют низкий уровень вибрации и шума.

Фирмой Sicme Motori (Италия) выпускаются РСД серии SRC на 15, 250 кВт, $2p=4$ и имеют КПД 92,9, 96% и на 45, 160 кВт, $2p=2$ с КПД 95,5, 97,3%. Машины, очевидно, предназначены для использования в качестве серводвигателей, так как имеют встроенный датчик, водяное охлаждение, малые габариты и момент инерции, рассчитаны на регулирование частоты вращения при $M=\text{const}$ в диапазоне 1:5. Значение КПД этих РСД во всем диапазоне нагрузок выше, чем у электродвигателей класса IE3, лист ротора по конфигурации аналогичен листу KSB, ABB, REEL [60].

Потери холостого хода в РСМ фирмы Socomes Sicon на 95 кВт (в течение 30 с) и $n=(25, 54)\times 10^3$ мин⁻¹ составляют 300 Вт (ЭМН имеет АМП, пространство вакуумируется).

Недостатки РСД – более низкие, чем у АД, значения $\cos\phi$, $M_{\text{пуск}}$.

В [61] изучалось влияние материалов ротора РСД, а также неравномерности воздушного зазора на значения потерь. Параметры опытного РСД: $P=60$ кВт, $n=48\times 10^3$ мин⁻¹. Для ротора использовалась аксиальная анизотропия (общепринятой является радиальная, например фирм KSB, ABB, REEL). Сердечники ротора набирались из чередующихся пластин магнитной стали 4140 и немагнитной Nitronic50, которые спаивались в массив при помощи фольги из аморфного никеля. При оптимизированной обмотке и закрытых пазах статора потери составили 410 Вт, при открытых пазах – 1297 Вт.

Некоторые разработчики и производители считают перспективным использование в качестве энергосберегающих вентильно-индукторные реактивные двигатели (ВИРД) (другие названия этих двигателей в отечественной технической литературе – индукторные, вентильно-индукторные, что неточно) [62]. Эти двигатели серийно, в отличие от СДПМ, выпускают только несколько производителей: Nidec Motor Corp. (США, Япония), Emerson Motor, Rocky Mountain Technologies (RMT) (США) и др. Преимущества ВИРД: простота конструкции и технологии изготовления; несложность монтажа и обслуживания; высокий КПД во всем диапазоне нагрузок при регулировании частоты вращения; хороший график $n=f(M)$, большой пусковой момент, возможность работы при обрыве одной фазы или КЗ; высокие массогабаритные показатели.

Недостатки ВИРД: применение в основном только в качестве специальных электрических ма-

шин; предпочтительная конструкция – встраиваемые. И ВИРД, и механизм, как правило, должны изготавливаться одним производителем. Для обеспечения высокой удельной мощности необходимо увеличивать индукцию и обеспечивать малый воздушный зазор. Это увеличивает шум и повышает затраты на изготовление. Ограничения для сверхскоростного привода – потери на перемагничивание ротора, шихтованный сердечник ротора снижает значение первой критической скорости, велики потери вязкого трения (о воздух) из-за зубчатости ротора. Другие недостатки: пульсация вращающего момента, большой уровень вибрации, акустический шум, меньший, чем у СДПМ, максимальный КПД. Для слежения за углом поворота ротора необходим датчик, в некоторых случаях – обратная связь по потокоцеплению [63]. Области применения: стиральные машины, воздухоудувки, центробежные насосы и компрессоры, электромобили и гибридные автомобили, станки, мощный сверлильный инструмент, привод гребных винтов, ветроагрегаты, электровелосипеды и др.

Nidec SR Drive Ltd. (UK) производит серию ВИРД класса IE4, габаритов 256, 449, которые по сравнению с аналогичными АД допускают большую частоту вращения (до 6750 мин^{-1}), имеют большие M_n и M_{\max} [64].

Nidec Motor Corp. выпускает ВИРД на 22, 250 кВт, причем эти двигатели имеют габариты на 1–2 меньшие, чем сопоставимые АД [65]. Emerson Motor Technologies выпускает ВИРД на 22, 190 кВт, сфера их применения: винтовые компрессоры, центробежные насосы, высокоскоростные centrifуги.

Некоторые производители выпускают ВИРД специального исполнения для авиации, транспорта, ветроэлектростанций. Так, RMT разработала ВИРД на 2,5 кВт для транспортных средств, ВИРД (как генератор) на 7,5 кВт, $h = 5,5\%$ для ветровой электростанции. Nidec Motor Corp. разработала ВИРД на $70 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$; в США разработан ВИРД космического назначения на 90 кВт, $25 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ [66].

NIDEC в 2012 г. на выставке в Токио продемонстрировала опытный образец ВИРД для электромобилей и гибридных автомобилей. Некоторые параметры этого двигателя: $D_{\text{нар}} = 177 \text{ мм}$, $l = 234 \text{ мм}$, $G = 26,5 \text{ кг}$, $P = 16 \text{ кВт}$, $P_{\max} = 44 \text{ кВт}$, $M_{\max} = 86 \text{ Нм}$, $n_{\max} = 12 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$, $h = 95\%$ (в оптимальном режиме), охлаждение – жидкостное [67].

В электромеханическом накопителе, разработанном ADIF совместно с SIEMAT, установлен ВИРД на 350 кВт, 6000 мин^{-1} с соотношением числа зубцов статора и ротора $Z_1/Z_2 = 6/4$. Для уменьшения нагрева обмотки статора принята необычно малая плотность тока $j = 2 \text{ А/мм}^2$. Это объясняется

тем, что из-за частичного вакуума внутри ЭМН затруднено охлаждение ВИРД [68].

В [69] приведены некоторые технические данные опытного образца ВИРД: $P = 100 \text{ кВт}$, $n_{\text{расч}} = 1000 \text{ мин}^{-1}$, электрические потери $P_{\text{эл}} = 3,5 \text{ кВт}$, потери в сердечнике статора $F_{\text{Fe1}} = 0,979 \text{ кВт}$, потери в зубцах статора $P_{z1} = 0,595 \text{ кВт}$, потери в сердечнике и зубцах ротора $0,784 \text{ кВт}$, $Z_1/Z_2 = 12/8$.

В [70] описан опытный образец ВИРД: $P = 0,7 \text{ кВт}$, $Z_1/Z_2 = 6/4$, $D_a = 116 \text{ мм}$, $l_d = 21 \text{ мм}$, $d = 0,5 \text{ мм}$, $h = 90,93\%$ в диапазоне $n = (3, 15) \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$. Разработчики и производители ВИРД часто указывают на его энергоэффективность.

Преимущества ВИРМ перед СМПМ: отсутствие размагничивания, слабое поле при холостом ходе, поэтому потери в этом режиме незначительны.

АМ и ВИРМ сравнимы по значению h , диапазону n , удельной мощности (хотя в ВИРМ могут быть высокими потери на гистерезис и вихревые токи); по стоимости предпочтение чаще отдается ВИРМ.

Структура инвертора ВИРМ обуславливает меньшую надежность машины – более сложное управление, зачастую большой уровень звука и вибрации. Однако простая и прочная конструкция ротора ВИРМ, высокие значения h , $P_{\text{уд}}$ при широком диапазоне частоты вращения обеспечивают ВИРМ хороший потенциал для использования в ЭМН [71].

При разработке встраиваемого ЭД на 21 кВт, $50 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ для коммерческого турбокомпрессора сравнивались по энергоэффективности и стоимости СДПМ, АД, ВИРД. В проекте участвовали General Electric, SatCon и др. При проектировании были заданы предельные габариты и h , СДПМ был спроектирован на базе авиационного генератора. Значение h СДПМ превышало 95%, у АД составляло 94%, у ВИРД – 93,5%. Был выбран АД, так как его стоимость была наименьшей, причем в два раза меньше, чем СДПМ. Стоимость ВИРД на 40% превысила стоимость АД отчасти потому, что из-за более высокой частоты перемагничивания пришлось бы использовать для магнитопровода дорогую и нетехнологичную кобальтовую сталь толщиной 0,36 мм. Для обмотки ротора АД использовался сплав алюминия Gludcor, предел текучести которого превышает таковой у меди почти в три раза [6].

Заключение. Обзор публикаций, посвященных состоянию и последним разработкам в области зарубежных энергосберегающих и энергоэффективных электрических машин, показал, что наметилась тенденция в преимущественном выпуске синхронных машин с постоянными магнитами как в общепромышленного исполнения, так и специального. Непрерывно растет создание электрических

машин классов энергоэффективности IE3 и IE4. В связи с ожидаемым резким ростом цен на редкоземельные металлы, в частности на неодим, ведутся работы по созданию конструкций синхронных машин с постоянными магнитами на основе ферритов, а также разработки материалов и композитов, заменяющих неодим и самарий. Применяются меры по снижению потерь: переход на использование тонколистовой электротехнической стали с уменьшенными удельными потерями, уменьшение электромагнитных нагрузок, установка подшипников с уменьшенными потерями, усовершенствование вентиляции, прецизионная обработка узлов. Расширяется выпуск асинхронных машин с медной обмоткой ротора, отлитой под давлением. Преимущественно используется класс изоляции F, причем осуществляется нагрев по классу B, что обеспечивает сервис-фактор до 1,25. Расширяется выпуск синхронных реактивных двигателей средней мощности. Вентильно-индукторные реактивные машины пока не находят широкого применения и не выпускаются крупными сериями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Global sales of IE3 motors will overtake IE1 by 2018**, 20 August 2014: http://drivescontrols.com/news/fullstory.php/aid/4540/Global_sales_of_IE3_motors_will_overtake_IE1_by_2018.html
2. **China's Stranglehold on Rare-earth minerals changes motor technologies**, 19 March 2013: http://gotocontrol.gkong.com/NEWS/news_detail.asp?id=4188
3. **Шумов Ю.Н., Сафонов А.С.** Энергоэффективные асинхронные двигатели с медной обмоткой ротора, отлитой под давлением (обзор зарубежных публикаций). — *Электричество*, 2014, No. 8, с. 56–61.
4. **Cassored B. et al.** Noll-segmented grain oriented steel in induction machines. — *Progress in electromagnetic research.*, vol. 47, 1-10-2014.
5. **A new SKF contribution to electric motor efficiency**: <http://www.bergab.ru/cataloguespdf/874449.pdf>
6. **Шумов Ю.Н.** Сверхскоростные и ультраскоростные асинхронные машины за рубежом: обзор публикаций. — *Электричество*, 2011, No. 5, с. 36–41.
7. **Center M.** Entwurf und Erprobung schnell drehender Asynchronmaschinen unter besonderer Berücksichtigung der magnetisch aktiven Materialien. Diss. Dr.-Ing. Techn. Univ., Berlin, 2009, Berlin. D83.
8. **Ferreira F. et al.** Voltage unbalance impact on the performance of line-start permanent-magnet synchronous motors: <http://www.icpe-me.ro/images/docs/lucrari/48.pdf>
9. **Tomokazu Kimura, Naoki Kojima.** Premium high-efficiency motor «MM-EFS» and energy-saving inverter «FR-F700P/F-700PJ»: http://www.mitsubishielectric.com/company/rd/advance/pdf/vol136/136_TR4.pdf
10. **LS News 26 UK.pdf** — Leroy Somer 01.07.2011: http://www.leroy-somer.com/pdf/lsnews/LSNews26_UK.pdf
11. **Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами в алюминиевом корпусе, 0,75 to 400kW**: http://www.omatis.ru/img/parametry/Catalog%Dyneo_ru.pdf
12. **High performance motors. Integral drive (HPI range). Stand alone motor (HPS range)**: http://www.lafert.com/_files/allegati/2013/07/c6bcj8.pdf
13. **Grundfos** переходит на электродвигатели сверхвысокого класса энергоэффективности: <http://by.grundfos.com/about-us/news-and-press/news/MGE.html>
14. **Grundfos unveils ultra-efficient pumps**: <http://www.grundfos.com/about-us/news-and-press/news/grundfos-unveils-ultra-efficient-pumps.html>
15. **WEG: Leicht integrierbare IE4 Motor**.29.04.2011: <http://www.electroniknet.de/automation/sonstiges/artikel/78839/>
16. **Motors product lines European market**: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motors-product-lines-european-market-50019075-brochure-english.pdf>
17. **Permanent magnet energy-efficient synchronous motors**, 2011: <http://www.vem-group.com>
18. **Design version super-premium efficiency IE4**: <http://www.vem-group.com>
19. **Energy efficiency class IE4 for decentralized installation**: <http://www.sew-eurodrive.de/download/pdf/19320426.pdf>
20. **SEW-Eurodrive: IE4-Motoren auf Drehstrom-Asynchron-Basis**.13.04.2011: <http://www.electroniknet.de/automation/sonstiges/artikel/78311/>
21. **Merritt B.T., Post R.E., Dreifuerst et. al.** Halbach array motor/generator — a novel generalized electric machine, 1994. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-119050.
22. **Flywheel energy storage**. Electric Power Research Institute (EPRI): http://www.vyconenergy.com/pq/pdfs/VYCON_VDC_XE_HC_Brochure.pdf
23. **Mason P.E. et al.** Hard and soft magnetic composites in high speed flywheels: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap1057.pdf>
24. **Nagorny A.** High speed permanent magnet synchronous motor/generator design for flywheel application: <http://www.free-energy-info.com/p25.pdf>
25. **Шумов Ю.Н., Сафонов А.С.** Состояние и перспективы развития высокоскоростных электрических машин для малой энергетики. — *Энергосбережение и водоподготовка*, 2013, № 5(85), с. 65–68.
26. **Шумов Ю.Н., Сафонов А.С.** Сверхскоростные и ультраскоростные синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов (обзор зарубежных публикаций). — *Электричество*, 2014, No. 3, с. 35–42.
27. **Huynh C., Zheng L., Acharya D.** Losses high speed permanent magnet machines used in microturbine applications. — *Journal of engineering for gas turbines*, 2009, March, 131(2).
28. **Rucker J.E.** Design and analysis of a permanent magnet generator for naval application. — *Electric ship technologies symposium*, 2005 IEEE, pp. 451–458.
29. **Aglen O.** A high-speed generator for microturbines. — *Proc. of the int. conf. (ICEE 01)*, Dares Salaam, 2001.
30. **High-performance, high-efficiency, low-cost electric motors**: [http://www.internetsec.com/www/video/2012.Technology Showcase.Fall/HEVT%20Presentation%20\(Dec.%202012\).pdf](http://www.internetsec.com/www/video/2012.Technology%20Showcase.Fall/HEVT%20Presentation%20(Dec.%202012).pdf)
31. **Are hybrid vehicle manufacturers shifting gears away from rare earth elements?** December, 2012: <http://news.thomasnet.com/imt/2012/12/11/are-hybrid-vehicle-manufacturers-shifting-gears-away-from-rare-earth-elements>
32. **NIMS team develops new magnetic compound with lower neodymium content**. October 2014: <http://www.greencarcongress.com/2014/10/20141020-nims.html>
33. **Conical gap geometry**: www.novatorg.com
34. **Ekland P. et al.** A complete design of a rare earth metal-free permanent magnet generators. — *Machines—2014*, vol. 2—112, pp. 120–133.
35. **High efficiency electric motor freed of rare earth elements**, April 2012: <http://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel/>

com/2012/04/16/high-efficiency-electric-motor-freed-of-rare-earth-elements/

36. **GE** unveils high-efficiency motor for electric cars and hybrids. 30.07.2012, <http://www.treehugger.com/cars/ge-unveils-high-efficiency-motor-electric-cars-and-hybrids.html>

37. **GE** previews new-high-efficiency traction motor for hybrid and electric Vehicle applications. – Gree car congress, 2 Nov. 2014.

38. **GP 100** Brochure – Dietz Electric Co. Inc.: <http://www.dietzelectric.com/index.php?cid=2&pid=1>

39. **Mineral** producer installing copper-rotor motors rising energy costs drive upgrades, rapid payback expected: https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/energy-efficiency/Documents/Copper_Rotor_Motors-Case_Study.pdf

40. **SEAD** awards recognize super efficient electric motors – ECEEE, 07.11.2014: http://www.ecee.org/ae_news/news/news-2014/2014-10-076

41. **Super-E** Premium efficient motor Baldor, Reliancer: <http://www.baldor.com/support/Literature/Load.ashx/BR457?LitNumber=BR457>

42. **ABB** drives and motors for improving energy efficiency: [http://www05.abb.com/global/skot/skot201.nsf/veritydisplay/06089e41600d59b3c1257a130024f543/\\$file/en_abb_drives_and_motors_energy_efficiency_revb.pdf](http://www05.abb.com/global/skot/skot201.nsf/veritydisplay/06089e41600d59b3c1257a130024f543/$file/en_abb_drives_and_motors_energy_efficiency_revb.pdf)

43. **Energy** efficient motors: <http://www.shreenm.com/brochures/crompton/EffLevel1.pdf>

44. **IE4** motors can replace low-efficiency machines directly: http://www.drivesncontrols.com/news/fullstory.php.aud/4589/I_E4_motors_can_replace_low-efficiency_machines_directly.htm

45. **Siemens**: <http://www.strakt.ru/static/electrodrivagateli-siemens-broshura.pdf>

46. **GE** Motors energy saver NEMA premium efficiency: <http://www.joliettech.com/Products>GEACMotors-ODP>

47. **Energy** saver NEMA Premium motors: http://www.turevmuhendelik.com/imagis/urunler/gemotor/ge_nema_premium_motor.pdf

48. **Big** electric motors/lesson: <http://www.bigelectricmotors.com>

49. **Brochure** SB-523. Process duty motors Marathon. Blue chip Motors: <http://www.marathonelectric.com/docs/SB523pdf>

50. **Электропривод**. Энергоэффективные двигатели. – Конструктор. Машиностроитель, 2009, № 3, с. 28–31: <http://www.orionmotor.narod.ru/energy-eff-dvig-prod.pdf>

51. **Энергоэффективность** электрических машин WEG: http://www.fiasamur.ru/weg/wp-content/uploads/sites/5/2013/05/RUS_Energy-efficiency-of-electric-machines-WEG.-Aspects.pdf

52. **WEG** Electric Corp.: Energy-efficient motors, October 4, 2010: <http://www.achmnews.com/articles/115424-weg-electric-corp-energy-efficient-motors>

53. **Parasiliti F. et al.** Three-phase induction motor efficiency improvements with die-cast copper rotor cage and premium steel. – Proc. of SPEEDAM'04 symposium, 2004.

54. **Speed-controlled** synchronous reluctance motors REEL Su Prem E: www.expoclima.net/en/icomponrnts/wlectrical_components/electric_motors/synchronous_reluctance_motors_reel_supreme.html

55. **High** efficiency electric motor freed of rare earth elements, April 2012: <http://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2012/04/16/high-efficiency-electric-motor-freed-of-rare-earth-elements/>

56. **First IE4** synchronous reluctance motor and drive package installed, 2013-08-01: <http://www.abb.ru/cawp/seitp202/e03ddb6214b6ad2c1257aee00378971.aspx>

57. **High** output synchronous reluctance motor and drive package pt pump and fan applications-sizes 160 to 315: <http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/b96b8cb7de>

18c6cdc1257b1300571c36/\$file/Catalog_SynRM_9AKK105671_07-2012_WEB.pdf

58. **KSB** SuPremE – the worlds most efficient magnet-less pump motor. http://www.ksb.com/ksb-en/Products_and_Services/Automation/SuPremE/1418408/SuPremE.html

59. **Патент США** 5818140, кл. 310/85.

60. **Synchronous** reluctance motors with ASR technology: www.sicmemotori.com/index.php?method=section&id=205

61. **Hofmann H., Sanders S.R.** High speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses. – IEEE Tr. on ind. appl., 2000, vol. 36, No. 2, pp. 531–535.

62. **Шумов Ю.Н.** Состояние и тенденции развития сверх-скоростных электрических машин средней и большой мощности. – Приводная техника, 2009, No. 1(77), с. 32–43.

63. **How's** shows off switched reluctance motor for EVs, HEVs, Jan 23, 2012: http://www.techon.nikkeibr.co.jp/english/News_en/20120123/203839

64. **Switched** reluctance motors & controllers – U.S. Motors: <http://www.usmotors.com/Our-Products/Switched-Reluctance.aspx>

65. **Boteler R.** The case for switched reluctance motor, April 2012: <http://powerelectronics.com/content/case-switched-reluctance-motors>

66. **Frank J., Bartos P.E.** Resurgence for SR motors, drives?, Control engineering. 03.01.2010: <http://www.controleng.com/single-article/resurgence-for-sr-motors-drives/f378ae0a342f56f6db8d20ff2e4dffa2.html>

67. **NIDEC** shows off switched reluctance motor for EVs, HEVs, Jan 23, 2012: http://www.techon.nikkeibr.co.jp/english/News_en/20120123/203839

68. **Gacia-Tabares L., Jglesians J., Lafor M. et al.** Development and testing of a 200MJ/350kW kinetic energy storage system for rail ways applications. – 9th World congress on railway research, May 2011, WCRR, Lille, 2011.

69. **Design** of a 100 kW SRM for traction application: <http://www.infolytica.com/en/applications/ex0188/>

70. **Serbian** journal of electrical engineering. Febr. 2013, vol.10, No. 1, pp. 47–57: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/1451-4869/2013/1451-48691301047C.pdf>

71. **Brabandere K.D., Driesen J., Belmans.** The control of switched reluctance drives and their use for flywheel energy storage. – Pr. of IEEE young researchers symposium in electrical power engineering, 2002, KU Leuven, Leuven.

[29.12.14]

Авторы: Шумов Юрий Николаевич окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1960 г. В 1980 г. защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Теоретические и экспериментальные исследования асинхронных генераторов». Профессор кафедры «Электрические системы» Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ).

Сафонов Александр Сергеевич окончил энергетический факультет Московского государственного открытого университета в 1999 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Встроенные электромеханические системы, совмещенные с сельскохозяйственным механизмом». Доцент кафедры «Электрические системы» МАМИ.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 5, pp. 45–57.

Energy-Saving Electrical Machines (a Review of Foreign Developments)

Yu.N. SHUMOV and A.S. SAFONOV

The article presents a review of foreign publications on the problem of energy conservation and energy efficiency of electrical machines intended for different applications: general-industry drives, variable-frequency drives, superhigh-speed generators and electric drives, special electric drives, electric vehicles, and hybrid vehicles. The specific features, development trends, and loss reduction methods for the following contactless (brushless) machines are considered: synchronous with permanent magnets, induction, synchronous reluctance, and converter-fed induction reluctance ones.

Key words: *electrical machines, energy efficiency, energy conservation, loss reduction methods, review of foreign publications*

REFERENCES

1. **Global** sales of IE3 motors will overtake IE1 by 2018, 20 August 2014: http://drivesncontrols.com/news/fullstory.php/aid/4540/Global_sales_of_IE3_motors_will_overtake_IE1_by_2018.html
2. **China's** Stranglehold on Rare-earth minerals changes motor technologies, 19 March 2013: http://gotocontrol.gkong.com/N_EWS/news_detail.asp?id=4188
3. **Shumov Yu.N., Safonov A.S.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2014, No. 8, pp. 56–61.
4. **Cassored B. et. al.** Noll-segmented grain oriented steel in induction machines. – Progress in electromagnetic research., vol. 47, 1-10-2014.
5. **A new SKF** contribution to electric motor efficiency: <http://www.bergab.ru/cataloguespdf/874449.pdf>
6. **Shumov Yu.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 5, c. 36–41.
7. **Center M.** Entwurt und Erprobang schnell drehender Asynchronmaschinen unter besonderer Berücksicherung der magnetisch aktiven Materialien. Diss. Dr-ing. Techn. Univ., Berling, 2009, Berlin. D83.
8. **Fereira F. et. al.** Voltage unbalance impact on the performance of line-start permanent-magnet synchronous motors: <http://www.icpe-me.ro/images/docs/lucrari/48.pdf>
9. **Tomokazu Kimura, Naoki Kojima.** Premium high-efficiency motor «MM-EFS» and energy-saving inverter «FR-F700P/F-700PJ»: http://www.mitsubishielectric.com/company/rd/advance/pdf/vol136/136_TR4.pdf
10. **LS News 26 UK.pdf** – Leroy Somer 01.07.2011: http://www.leroy-somer.com/pdf/lsnews/LSNews26_UK.pdf
11. **Sinkhronnye** elektrodvigateli s postoyannymi magnitami v alyuminiyevom korpuse, 0,75 to 400 kW(Synchronous electric motors with permanent magnets in aluminum frame, 0,75 to 400 kW): http://www.omatis.ru/img/parametry/Catalog%Dyneo_ru.pdf_ru.pdf
12. **High** performance motors. Integral drive (HPI range). Stand alone motor (HPS range): http://www.lafert.com/_files/allegati/2013/07/c6bcj8.pdf
13. **Grundfos** переходит на электродвигатели сверхвысокого класса энергоэффективности: <http://by.grundfos.com/about-us/news-and-press/news/MGE.html>
14. **Grundfos** unveils ultra-efficient pumps: <http://www.grundfos.com/about-us/news-and-press/news/grundfos-unveils-ultra-efficient-pumps.html>
15. **WEG:** Leicht integrierbare IE4 Motor.29.04.2011: <http://www.elektroniknet.de/automation/sonstiges/artikel/78839/>
16. **Motors** product lines European market: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motors-product-lines-european-market-50019075-brochure-english.pdf>
17. **Permanent** magnet energy-efficient synchronous motors, 2011: <http://www.vem-group.com>
18. **Design** version super-premium efficiency IE4: <http://www.vem-group.com>
19. **Energy** efficiency class IE4 for decentralized installation: <http://www.sew-eurodrive.de/download/pdf/19320426.pdf.sew-eurodrive.de/download/pdf/19320426.pdf>
20. **SEW-Eurodrive:** IE4-Motoren auf Drehstrom-Asynchron-Basis.13.04.2011: <http://www.elektroniknet.de/automation/sonstiges/artikel/78311/>
21. **Merritt B.T., Post R.E., Dreifuerst et. al.** Halbach array motor/generator – a novel generalized electric machine, 1994. Lawrence Livermole National Laboratory, UCRL-JC-119050.
22. **Flywheel** energy storage. Electric Power Reeach Institute (EPRI): http://www.vyconenergy.com/pq/pdfs/VYCON_VDC_XE_HC_Brochure.pdf
23. **Mason P.E. et. al.** Hard and soft magnetic composites in high speed flywheels: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap1057.pdf>
24. **Nagorny A.** High speed permanent magnet synchronous motor/generator design for flywheel application: <http://www.free-energy-info.com/p25.pdf>
25. **Shumov Yu.N., Safonov A.S.** *Energoberezheniye i vodopodgotovka – in Russ. (Energy saving and water treatment)*, 2013, No. 5(85), c. 65–68.
26. **Shumov Yu.N., Safonov A.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 3, pp. 35–42.
27. **Huynh C., Zheng L., Acharya D.** Losses high speed permanent magnet machines used in microturbine applications. – Journal of engineering for gas turbines, 2009, March, 131(2).
28. **Rucker J.E.** Design and analysis of a permanent magnet generator for naval application. – Electric ship technologies symposium, 2005 IEEE, pp. 451–458.
29. **Aglen O.** A high-speed generator for microturbines. – Proc. of the int. conf. (ICEE 01), Dares Salaam, 2001.
30. **High-performance**, high-efficiency, low-cost electric motors: [http://www.internetsec.com/www/video/2012.TechnologyShowcase.Fall/HEVT%20Presentation%20\(Dec.%202012\).pdf](http://www.internetsec.com/www/video/2012.TechnologyShowcase.Fall/HEVT%20Presentation%20(Dec.%202012).pdf)
31. **Are hybrid** vehicle manufacturers shifting gears away from rare earth elements? December, 2012: <http://news.thomasnet.com/>

imt/2012/12/11/are-hybrid-vehicle-manufacturers-shifting-gears-away-from-rare-earth-elements

32. **NIMS** team develops new magnetic compound with lower neodymium content. October 2014: <http://www.greencarcongress.com/2014/10/20141020-nims.html>

33. **Conical** gap geometry: www.novatorgou.com

34. **Ekland P. et al.** A complete design of a rare earth metal-free permanent magnet generators. – *Machines*—2014, vol. 2—112, pp. 120–133.

35. **High** efficiency electric motor freed of rare earth elements, April 2012: <http://newenergyandfuel.com/> <http://newenergyandfuel.com/2012/04/16/high-efficiency-electric-motor-freed-of-rare-earth-elements/>

36. **GE** unveils high-efficiency motor for electric cars and hybrids. 30.07.2012, <http://www.treehugger.com/cars/ge-unveils-high-efficiency-motor-electric-cars-and-hybrids.html>

37. **GE** previews new-high-efficiency traction motor for hybrid and electric Vehicle applications. – Gree car congress, 2 Nov. 2014.

38. **GP** 100 Brochure – Dietz Electric Co. Inc.: <http://www.dietzelectric.com/index.php?cid=2&pid=1>

39. **Mineral** producer installing copper-rotor motors rising energy costs drive upgrades, rapid payback expected: https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/energy-efficiency/Documents/Copper_Rotor_Motors-Case_Study.pdf

40. **SEAD** awards recognize super efficient electric motors – ECEEE, 07.11.2014: http://www.ecee.org/ae_news/news/news-2014/2014-10-076

41. **Super-E** Premium efficient motor Baldor, Reliancer: <http://www.baldor.com/support/Literature/Load.aspx/BR457?LitNumber=BR457>

42. **ABB** drives and motors for improving energy efficiency: [http://www05.abb.com/global/skot/skot201.nsf/veritydisplay/06089e41600d59b3c1257a130024f543/\\$file/en_abb_drives_and_motors_energy_efficiency_revb.pdf](http://www05.abb.com/global/skot/skot201.nsf/veritydisplay/06089e41600d59b3c1257a130024f543/$file/en_abb_drives_and_motors_energy_efficiency_revb.pdf)

43. **Energy** efficient motors: <http://www.shreenm.com/brochures/crompton/EffLevel1.pdf>

44. **IE4** motors can replace low-efficiency machines directly: http://www.drivesncontrols.com/news/fullstory.php.aud/4589/IE4_motors_can_replace_low-efficiency_machines_directly.htm

45. **Siemens**: <http://www.strakt.ru/static/electrodvigateli-siemens-broshura.pdf>

46. **GE** Motors energy saver NEMA premium efficiency: <http://www.joliettech.com/Products/GEACMotors-ODP>

47. **Energy** saver NEMA Premium motors: http://www.turevmuhendelik.com/imagis/urunler/gemotor/ge_nema_premium_motor.pdf

48. **Big** electric motors/lesson: <http://www.bigelectricmotors.com>

49. **Brochure** SB-523. Process duty motors Marathon. Blue chip Motors: <http://www.marathonelectric.com/docs/SB523pdf>

50. **Konstruktor**. *Mashinostroitel' (Designer. Machinist)*, 2009, No. 3, pp. 28–31: <http://www.orionmotor.narod.ru/energy-eff-dvig-prod.pdf>

51. **Energoeffektivnost' elektricheskikh mashin WEG** (Energy efficiency of electrical machines WEG): http://www.fiasamur.ru/weg/wp-content/uploads/sites/5/2013/05/RUS_Energy-efficiency-of-electric-machines-WEG-Aspects.pdf

52. **WEG** Electric Corp.: Energy-efficient motors, October 4, 2010: <http://www.achrnews.com/articles/115424-weg-electric-corp-energy-efficient-motors>

53. **Parasiliti F. et al.** Three-phase induction motor efficiency improvements with die-cast copper rotor cage and premium steel. – Proc. of SPEEDAM'04 symposium, 2004.

54. **Speed-controlled** synchronous reluctance motors REEL Su Prem E: www.expoclima.net/en/1component/wlectrical_components/electric_motors/synchronous_reluctance_motors_reel_supreme.html

55. **High** efficiency electric motor freed of rare earth elements, April 2012: <http://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2012/04/16/high-efficiency-electric-motor-freed-of-rare-earth-elements/>

56. **First IE4** synchronous reluctance motor and drive package installed, 2013-08-01: <http://www.abb.ru/cawp/seitp202/e03ddab6214b6ad2c1257aee00378971.aspx>

57. **High** output synchronous reluctance motor and drive package pt pump and fan applications-sizes 160 to 315: [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/b96b8cb7de18c6cdc1257b1300571c36/\\$file/Catalog_SynRM_9AKK105671_07-2012_WEB.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/b96b8cb7de18c6cdc1257b1300571c36/$file/Catalog_SynRM_9AKK105671_07-2012_WEB.pdf)

58. **KSB** SuPremE – the worlds most efficient magnet-less pump motor. http://www.ksb.com/ksb-en/Products_and_Services/Automation/SuPremE/1418408/SuPremE.html

59. **Patent** SSHA 5818140, class 310/85 (Patent USA 5818140m class 310/85).

60. **Synchronous** reluctance motors with ASR technology: www.sicmemotori.com/index.php?method=section&id=205

61. **Hofmann H., Sanders S.R.** High speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses. – *IEEE Tr. on ind. appl.*, 2000, vol. 36, No. 2, pp. 531–535.

62. **Shumov Yu.N.** *Privodnaya tekhnika – in Russ. (Driving technics)*, 2009, No. 1(77), pp. 32–43.

63. **How's** shows off switched reluctance motor for EVs, HEVs, Jan 23, 2012: http://www.techon.nikkeibr.co.jp/english/News_en/20120123/203839

64. **Switched** reluctance motors & controllers – U.S. Motors: <http://www.usmotors.com/Our-Products/Switched-Reluctance.aspx>

65. **Boteler R.** The case for switched reluctance motor, April 2012: <http://powerelectronics.com/content/case-switched-reluctance-motors>

66. **Frank J., Bartos P.E.** Resurgence for SR motors, drives?, *Control engineering*. 03.01.2010: <http://www.controleng.com/single-article/resurgence-for-sr-motors-drives/f378ae0a342f56f6db8d20ff2e4dffa2.html>

67. **NIDEC** shows off switched reluctance motor for EVs, HEVs, Jan 23, 2012: http://www.techon.nikkeibr.co.jp/english/News_en/20120123/203839

68. **Gacia-Tabares L., Jglesians J., Lafor M. et al.** Development and testing of a 200MJ/350kW kinetic energy storage system for rail ways applications. – 9th World congress on railway research, May 2011, WCRR, Lille, 2011.

69. **Design** of a 100 kW SRM for traction application: <http://www.infolytica.com/en/applications/ex0188/>

70. **Serbian** journal of electrical engineering. Febr. 2013, vol.10, No. 1, pp. 47–57: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/1451-4869/2013/1451-48691301047C.pdf>

71. **Brabandere K.D., Driesen J., Belmans.** The control of switched reluctance drives and their use for flywheel energy storage. – Pr. of IEEE young researchers symposium in electrical power engineering, 2002, KU Leuven, Leuven.

Authors: Shumov Yurii Nikolayewich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Professor, Moscow State Machine-building University (MSMU).

Safonov Aleksandr Sergeyeovich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, MSMU.