

## Движущие силы и направления эволюции вращающихся электрических машин. Ч. 2

МАТВЕЕВ А.В.

Drive Constructor, Норвегия

Статья является продолжением статьи, опубликованной в № 1/2021, с. 44–54. Появление и развитие такого класса технических систем, как электрические машины, – лишь один из множества элементов технического прогресса, который, в свою очередь, является одним из элементов эволюции человеческой цивилизации. Технический прогресс можно представить как переплетение множества «потоков», каждый из которых включает создание, внедрение, работу и исчезновение какой-либо технической системы. Технический прогресс осуществляется посредством практической реализации многочисленных и многообразных усовершенствований. Любая техническая система развивается посредством реализации различных идей, что приводит к изменению данной системы или к созданию новой системы. В статье делается попытка кратко описать все значимые элементы эволюции электрических машин (ЭМ). Показана роль крупных изобретений и небольших усовершенствований, даны примеры Трендов, Паттернов и Линий эволюции, описана эволюция ЭМ в осях «надсистема-система-подсистема», показано, как применения определяют требования к ЭМ. Рассмотрены примеры эволюции материалов, которые используются в ЭМ. Также обсуждена роль личностей, коллективов и организаций. Приведены конкретные примеры направлений эволюции, описаны противодействующие силы и ограничения.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** вращающиеся электрические машины (ЭМ), движущие силы эволюции и ограничения, история развития ЭМ, направления эволюции, надсистемы и подсистемы ЭМ, материалы

### Направления эволюции электрических машин.

Обозначим основные из них:

увеличение максимально достижимых мощности, момента;

повышение управляемости;

повышение максимально достижимой частоты вращения;

повышение эффективности преобразования энергии (увеличение КПД);

увеличение удельных мощности и момента (повышение компактности, снижение массы);

повышение степени механической интеграции с окружающими структурами (интеграция в применение – надсистему).

Проиллюстрируем движение в некоторых из этих направлений. Самые мощные машины – турбогенераторы. За последние 60 лет их мощность увеличилась практически на порядок (рис. 1) [1], сегодня мощность этих машин составляет около 2 ГВт (для 4-полюсных машин). Это близко к пределу возможностей современных технологий. Цитируем [2]: «мощность можно увеличивать только до определенных пределов. Расчеты показывают – перешагнуть верхний предел, ограниченный мощностью турбогенератора 2500 МВт, ротор которого вращается с частотой 3000 об/мин, не удастся,

так как этот предел определяется, в первую очередь, прочностными характеристиками: напряжения в механической конструкции машины более высокой мощности возрастают настолько, что центробежные силы неизбежно вызовут разрушение ротора». Кроме того, немало сложностей возникает при транспортировке таких больших машин (свыше 500 т). И все же есть уверенность, что в будущем с появлением новых материалов, как активных, так и конструкционных, удастся сделать тур-

Мощность, МВ·А

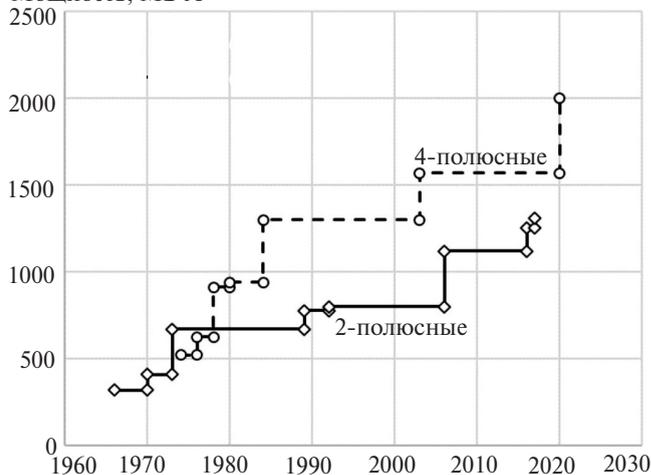


Рис. 1. Увеличение мощности турбогенераторов

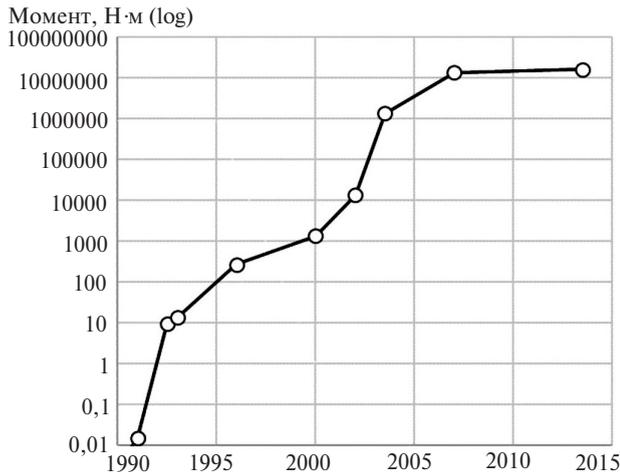


Рис. 2. Увеличение момента машин с ВТСП (данные из [17])

богенераторы значительно компактнее и перешагнуть предел 2,5 ГВт (для 2-полюсных машин); 4-полюсные машины, видимо, перейдут этот рубеж раньше.

В качестве примера увеличения момента возьмем машины с обмотками возбуждения из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). На рис. 2 показано, что практически сразу после появления ВТСП начинается поступательный рост максимально достижимого номинального значения момента таких машин. Сегодня достигнут уровень момента свыше 10 млн Н·м.

Благодаря возможностям силовой электроники в генерации высоких частот питания растет достижимое значение максимальной частоты вращения машин. В машинах малой мощности уже достигнута частота вращения в один миллион оборотов. Важно отметить, что рекордные мощности машин достигнуты на сравнительно низких значениях частоты вращения (1500 об/мин), а рекордные значения частоты вращения – на малых мощностях (менее 1 кВт). На рис. 3,а показаны применения, которые очерчивают границы современных возможностей по мощностям и частотам вращения. Можем представить эволюцию как попытку сдвинуть границу на рис. 3,б вправо и вверх.

Отметим, что силовая электроника в целом значительно улучшает управление машиной. В качестве примера увеличения КПД машин в процессе исторического развития, благодаря инкрементальным улучшениям в материалах и оптимизации, приведем рост КПД традиционных генераторов Siemens мощностью 200–500 МВт с 98% в 1940 г. до 99% в 2020 г. [4].

Удельные значения мощности и момента сильно изменяются с изменением мощности и частоты вращения машин, поэтому не годятся для сравнительной оценки компактности машин в широких диапазонах мощности и частоты вращения. В [5]

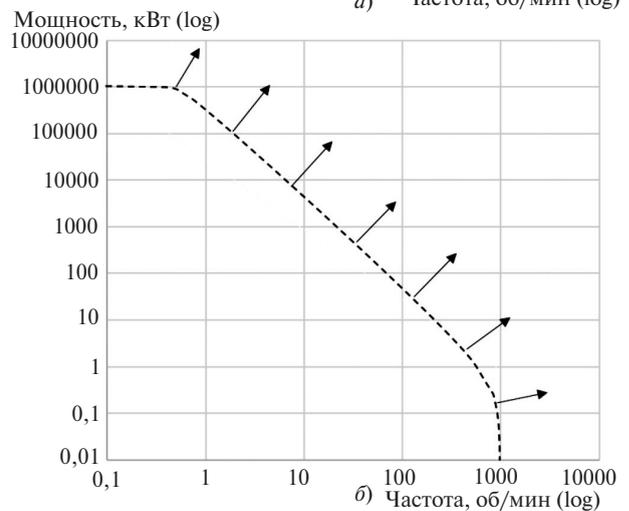
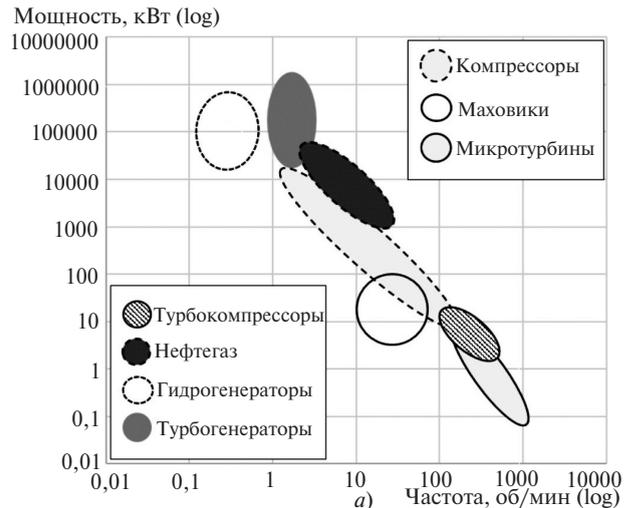


Рис. 3. Применение машин с высокими значениями мощности и частоты вращения (а) и схематическое обозначение «границы возможного» (б)

для сравнительной оценки предложена альтернативная машинная постоянная:

$$C_M = \frac{m}{p C_p n C_n} \tag{1}$$

где  $m$  – в кг;  $p$  – в кВт;  $n$  – в об/мин;  $C_p = 0,69$ ;  $C_n = 0,5$ .

Там же было отмечено, что значения – предварительные и требуют уточнения. В [6] значение  $C_p$  было уточнено ( $C_p = 0,75$ ).

Запишем выражение (1), данное в общей форме, в виде, готовом для практического использования:

$$C_M = \frac{mn^{0,5}}{p0,75}; \tag{2}$$

чем ниже значение  $C_M$ , тем компактнее машина. Компактность (обиходный термин, связанный с объемом), а также и масса машины на практике обычно находятся в прямой зависимости. «Высокая компактность» машины часто справедливо пони-

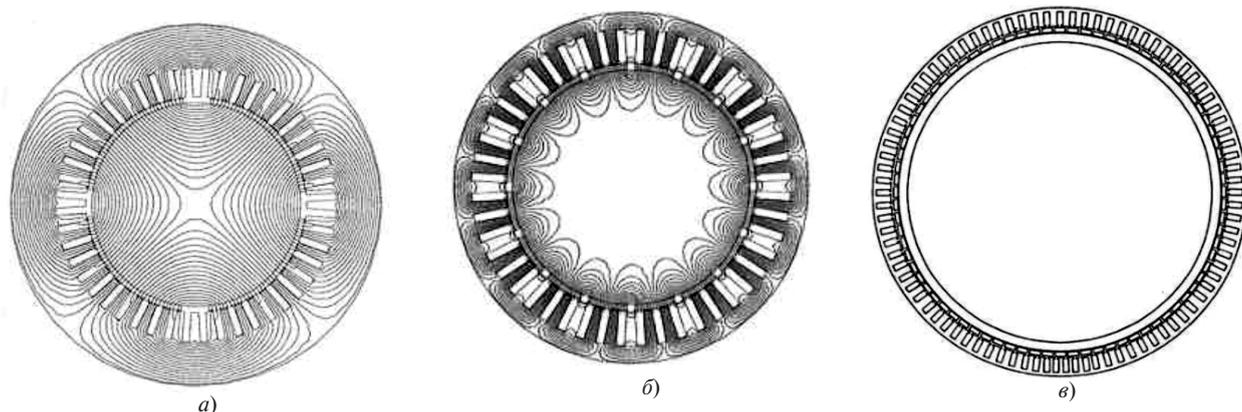


Рис. 4. Машины с различным числом полюсов: а – 4; б – 16; в – 80

мается как «малая масса», именно в таком смысле термин «компактность» будет использован ниже.

С помощью  $C_M$  можно проследить эволюцию компактности отдельных типов машин. Сравним высокочастотные машины с ПМ середины XX в. и машины с ПМ настоящего времени.

Основные параметры и оценка  $C_M$  для генераторов с ПМ из [7] дана в табл. 1. Охлаждение всех генераторов – воздушное. Уровень частоты питания оказывает решающее влияние на компактность машин. В частности, в [7] указывается, что удельный вес генераторов мощностью 7,5 кВА уменьшается вдвое (соответственно, удельная мощность увеличивается вдвое) при увеличении частоты с 400 до 2000 Гц.

Современные высокочастотные синхронные машины с ПМ (ВЧСМПМ) имеют отличную от старых машин топологию – обычно сосредоточенную обмотку и большое число полюсов (от 10 до 40). Комбинация высокой частоты питания и большого

числа полюсов дает значительное уменьшение веса (увеличение компактности). На рис. 4 схематично показаны топологии машин с 4, 16 и 80 полюсами, при этом для машин на рис. 4, а и б показаны силовые линии поля, но структура ротора не показана. Очевидно, в машинах с меньшим числом полюсов требуется большая толщина ярма как статора, так и ротора. С увеличением числа полюсов сердечники становятся тоньше и, соответственно, масса машины снижается. Современные ВЧСМПМ низкого напряжения открытого исполнения с воздушным охлаждением имеют  $C_M$  примерно 15–50 (расчет по данным из [9]), т.е. имеют на порядок более высокую компактность по сравнению с соответствующими машинами середины XX в. из табл. 1.

Для той же номинальной частоты вращения при увеличении числа полюсов приходится принимать увеличение частоты питания; современные производители ВЧСМПМ на это идут. Интересно, что в целом отношение проектировщиков к высокой

Таблица 1

Параметры и оценка  $C_M$  для генераторов с ПМ

Тип машины	Масса, кг	Напряжение, В	Мощность, кВА	Число полюсов	частота вращения, об/мин	Частота, Гц	$C_M$
Генератор с коммутаторной магнитной системой	1,2	нет информации	3	6	50000	5000	126
Генератор со звездообразным ротором и полюсными башмаками	31	нет информации	30	4	12000	400	325
Генератор со звездообразным ротором и полюсными башмаками	81	нет информации	90	6	8000	400	325
ГТ-1А1-фазный генератор с когтеобразным ротором	7	12	0,3	12	4000	нет информации	1016
Генератор с платино-кобальтовыми магнитами	70	нет информации	200	8	30000	2000	313
ДПТ с ПМ	0,4	28	0,02	--	7500	--	515

частоте питания — настороженное, поскольку при увеличении частоты растут потери как в стали, так и в меди. Обычно для высокой частоты вращения стараются использовать варианты с 2 или 4 полюсами [9]. Можно предположить, что первым разработчикам, которые внедрили многополюсные машины с высокой частотой питания, пришлось преодолевать определенную психологическую инерцию.

Рассмотрим эволюцию компактности синхронных машин со сверхпроводящими (СП) обмотками возбуждения (СМОВСП). В 1975–1980 гг. значение  $C_M$  таких машин было на уровне 1500–1700. В табл. 2 приведены данные для машин начала XXI в. Видим значительное увеличение компактности. Отметим, что в случае СМОВСП не рассматриваем машины с высокой частотой питания (обычно униполярного типа) и ограничиваемся машинами с частотой питания 50 Гц.

На рис. 5 показана эволюция компактности ВЧСМПМ и СМОВСП. К кривым этих машин добавим кривую для АД из [5]. Вертикальными стрелками отмечены диапазоны, в которых обычно находятся значения  $C_M$  для данного типа машин. Видим, что ВЧСМПМ значительно компактнее АД и СМОВСП. Это, в первую очередь, эффект применения высоких значений частоты питания, а также эффект использования большого числа полюсов.

В табл. 2 дано сравнение конкретной ВЧ системы с СМПМ с конкретной традиционной системой ПЧ-АД [10]. Разница в компактности очень большая. Система ПЧ-АД в сравнении с ВЧ системой выглядит как система предыдущего поколения. Таким образом, можно сказать, что сегодня на рынке сосуществуют системы разных поколений. Преимущество высокочастотных систем с СМПМ

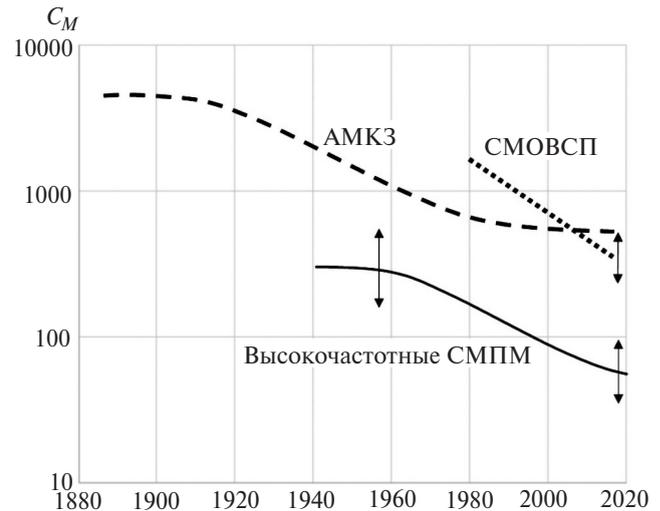


Рис. 5. Тренды снижения машинной постоянной

может привести к новым стандартам в промышленности. Машины, прежде называемые «специальными», могут перейти в категорию «общепромышленных». На рис. 6 предложен прогноз возможного развития систем регулируемого электропривода. На рис. 6,а показана наиболее распространенная топология с ПЧ, расположенным в распределительном устройстве, и двигателем, соединенным с ПЧ длинным кабелем. В последние 20 лет внедряются интегрированные приводы, в которых ПЧ и ЭМ являются единым модулем (рис. 6,б). В будущем, вероятно, будут использоваться преимущества высокочастотных систем, и частота между ПЧ и двигателем (типа СМПМ) будет значительно увеличена (рис. 6,в). Вполне вероятно, что двигатель в такой системе будет иметь несколько гальванически независимых многофазных обмоток.

Таблица 2

Параметры и оценка значений  $C_M$  для машин с СП обмоткой возбуждения

Данные	Производитель								
	AMSC	Siemens	Doosan KERI	AMSC SeaTitan	TECO Westinghouse	МАИ, НИИЭМ, Курчатовский институт	Changwon National University	Kalsi GPS	GE
Год (приблизительно)	2001	около 2004	2011	2012	проект 2014, не построена	2015	проект 2015, не построена	проект 2016, не построена	проект 2019, не построена
Мощность	3,725 МВт	4 МВА	5 МВт	10 МВт, 12 МВА	3,6 МВт	1 МВА	12 МВт	40 МВт	36 МВт
Частота вращения, об/мин	1800	3600	213	10	1800	600	8	120	120
Масса, т	6,81	6,9	22	160	7	4,2	180	81	100
$C_M$	606	823	540	506	620	579	444	312	419

Отметим, что высокая компактность ВЧСМПМ также открывает новые возможности по механической интеграции с механизмом (переход в надсистему).

Эволюция компактности, естественно, затрагивает не только машины с ПМ, но и другие типы машин. Например, в [2] приводятся данные, указывающие, что за счет улучшения конструкции, форсированного охлаждения и применения изоляционных материалов, допускающих более высокое превышение температуры, удалось в течение 50 лет (приблизительно с 1935 по 1985 гг.) увеличить удельную мощность машин постоянного тока в 3 раза. Там же указано, что удельный расход материалов в турбогенераторах с 1950-х по 1990-е годы снизился более чем в 3 раза.

Таблица 3

**Сравнение традиционной и высокочастотной систем**

Параметры	Традиционная система (ABB, Западная Европа), машина M3BP 80 MC	Высокочастотная система (T-motor, Китай), машина P80 kv100
Номинальное напряжение, В	400	40
Номинальная мощность, кВт	1,1	1,1
Номинальная частота вращения, об/мин	2900	2934
Число полюсов	2	42
Частота питания, Гц	50	1050
КПД, %	81,8	~ 85
Защита	IP55	IP55
Диаметр, мм	160	91,6
Длина, мм	225	40
Объем, см <sup>3</sup>	5760	336
Масса, кг	18	0,650
$C_m$	900	33
Параметры	Преобразователь частоты (ПЧ)	
	ACS580-01-04 A0-4	Flame 80 A HV
Номинальное напряжение, В	400	48 (на DC входе инвертора)
Номинальная мощность, кВт	1,5	>2
Номинальный ток	3,8 А	80 А
КПД	~ 98%	~ 97%
Размеры (ширина x высота x глубина), мм	222x303x125	84x35,5x19,5
Объем, см <sup>3</sup>	8408	58
Масса, кг	5,1 кг	0,109 кг
Параметры	Система (машина + ПЧ)	
Объем, см <sup>3</sup>	14168	394
Масса, кг	23,1	0,759

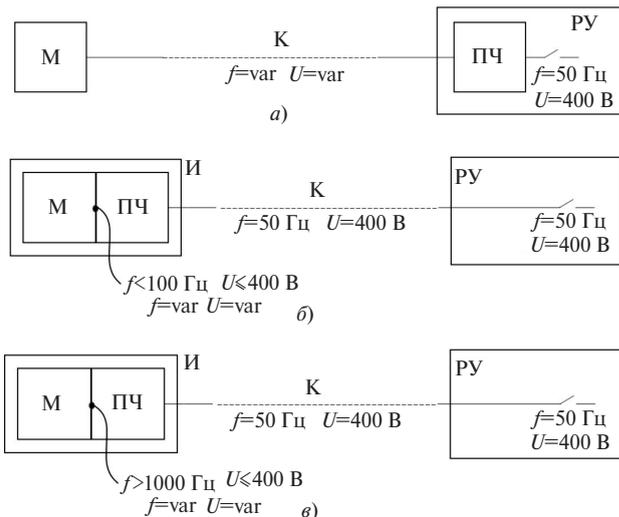


Рис. 6. Эволюция топологий систем: М – машины; ПЧ – преобразователи частоты; РУ – распределительства

Одно из направлений эволюции – повышение степени механической интеграции с окружающими структурами (интеграция в применение – надсистему). В обычных генераторах с ПМ для ВЭУ с

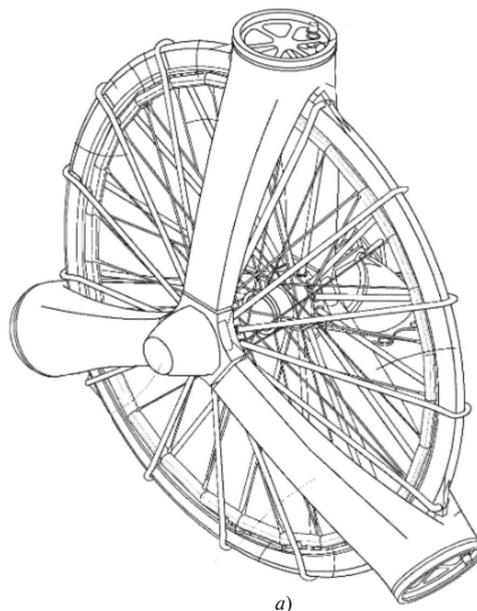


Рис. 7. Иллюстрация ВЭУ Sway из патента CN103987962A2 (а) и рисунок из [12] (б)

прямым приводом масса несущих структур генератора может составлять до 50% его общей массы. За счет механической интеграции массу можно значительно уменьшить. Хорошо иллюстрирует этот принцип генератор для ВЭУ Sway (рис. 7). За счет значительного увеличения диаметра генератора растет окружная скорость, что положительно сказывается на массе генератора – получается как бы «встроенный мультипликатор». Генератор Sway – аксиальная СМПМ без сердечника на статоре (БС-СМПМ), что позволяет облегчить конструктивные элементы, поддерживающие активные части, поскольку отсутствуют аксиальные силы притяжения между статором и ротором. Несущей структурой для ротора являются в значительной степени лопасти ВЭУ.

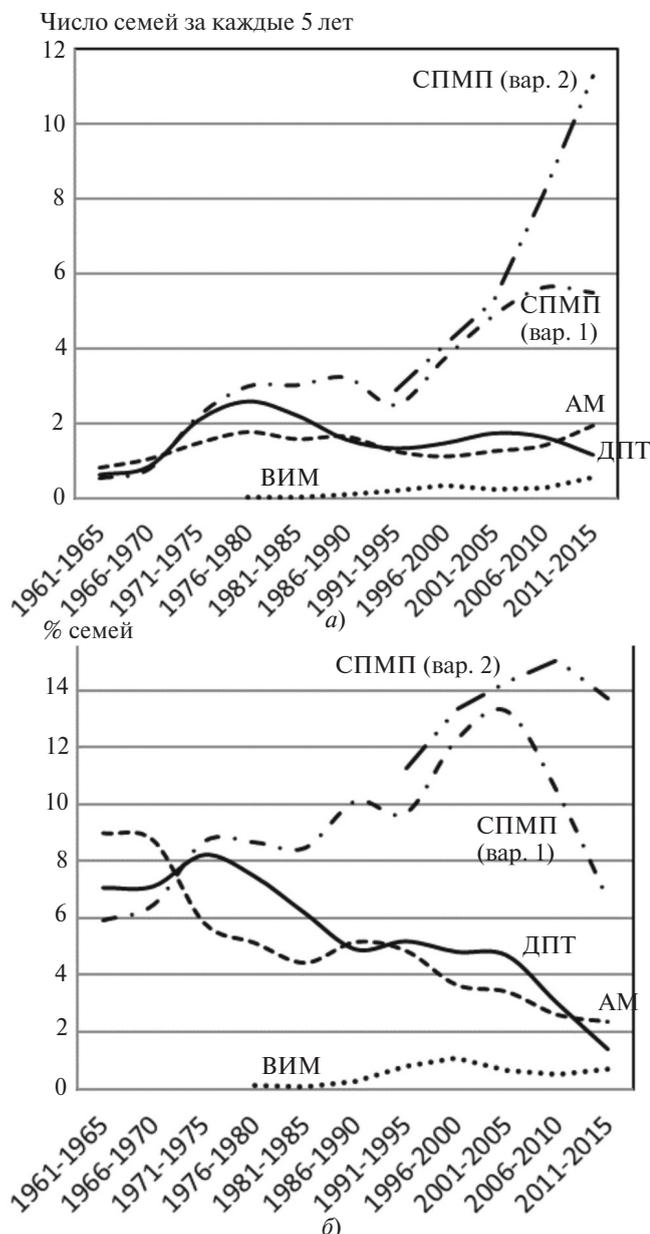


Рис. 8. Динамика подачи патентных заявок

Процесс эволюции характеризуется вытеснением одних типов машин другими. Число патентных заявок по отдельно взятой технологии – косвенный показатель уровня инвестиций и количества разработчиков, вовлеченных в развитие той или иной технологии.

На рис. 8 показана динамика подачи патентных заявок по четырем типам ЭМ в абсолютных (а) и относительных (б) цифрах. Число изобретений по СМПМ растет в последние 20–25 лет, в то время как по асинхронным машинам (АМ) и машинам постоянного тока (ДПТ) – остается на том же уровне. Интерес к вентильно-индукторным машинам (ВИМ) значительно ниже, чем к СМПМ. На рис. 8, б хорошо видно, что в процентном отношении доли АМ и ДПТ падают. Интересно сопоставить кривую изменения для АМ (рис. 5) с падающей долей патентов по этой машине. Становится очевидно, что инвестиции в АМ снижаются по сравнению с другими типами ЭМ и, соответственно, данный тип машин не развивается. На этом фоне очевидно бурное развитие СМПМ. В *Приложении* дана более подробная статистика патентов по различным типам машин с указанием ведущих стран и компаний. Такая статистика может дать некоторое представление о глобальной конкуренции в области ЭМ в историческом контексте.

**Иллюстрация примеров процесса эволюции компактности.** В [5] предложена логарифмическая карта, связывающая удельные мощность и момент с номинальными значениями мощности и частоты вращения. Карта отражает тот факт, что ЭМ – класс устройств, в значительной степени подчиняющийся логарифмическим законам в том, что касается изменения массы в зависимости от мощности и частоты вращения. Можно попытаться проиллюстрировать эволюцию компактности некоторых из рассмотренных выше типов машин с помощью данной карты (рис. 9). Технология ЭМ обычно существует и развивается в определенном диапазоне мощностей и частот вращения и занимает соответствующую область на логарифмической карте. Улучшение компактности, например из-за механической интеграции или использования высокой частоты питания, можно представить как «взламывание» карты и переход области существования технологии в область более высоких удельных показателей.

Так, рассмотренный выше генератор для ВЭУ с БС-СМПМ должен располагаться на карте рис. 9, а в точке, соответствующей его номинальной частоте вращения 10 об/мин и мощности 10 МВт. В действительности за счет механической интеграции генератор имеет массу практически вдвое меньше,

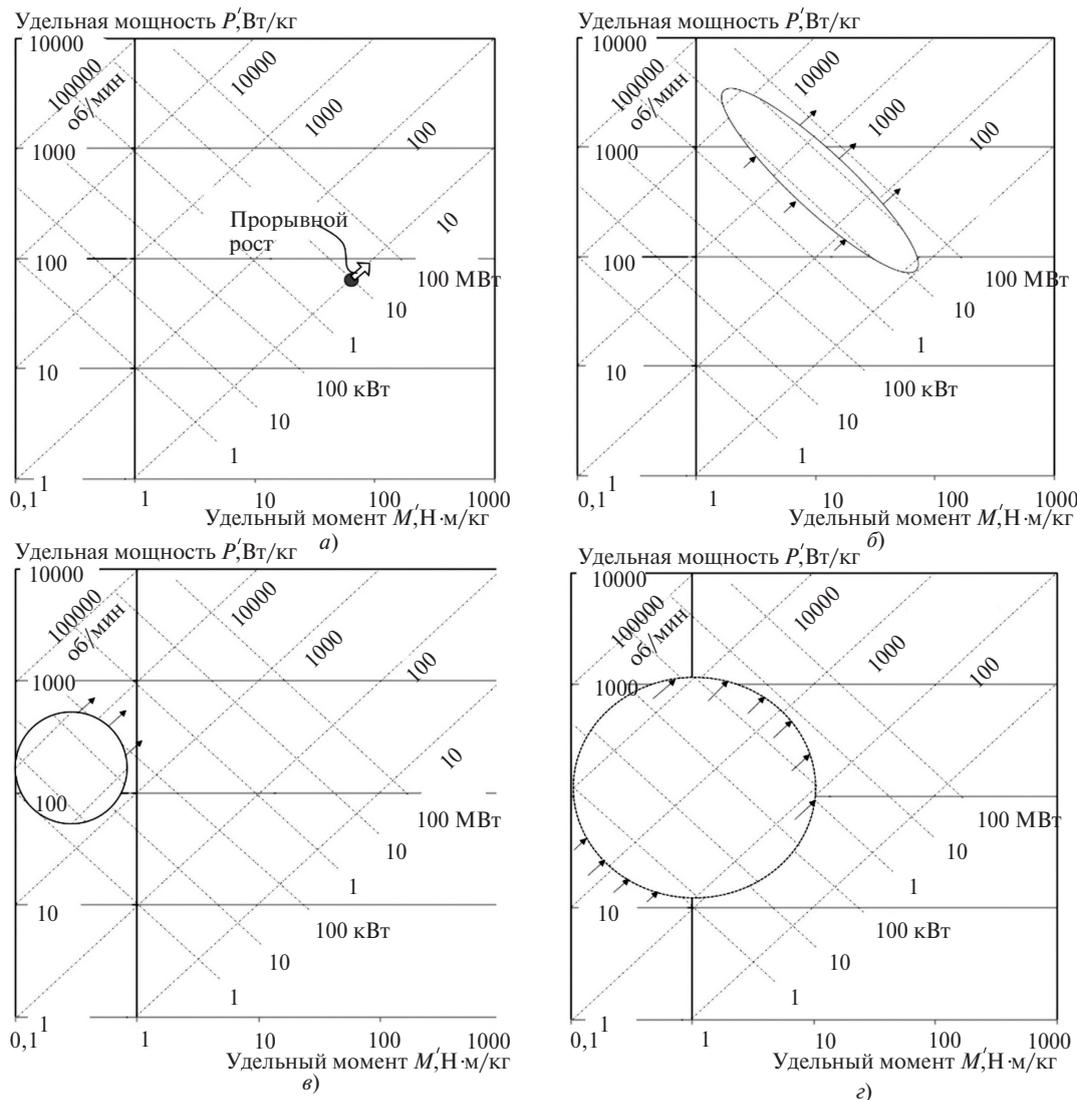


Рис. 9. Примеры эволюции компактности: а – ветрогенератор с БС-СМПМ; б – СМОВСП; в – высокочастотные СМПМ; г – ВИМ

чем его конкуренты, и поэтому стрелкой показан переход в область более высоких удельных значений мощности и момента, т.е. проиллюстрирован локальный «прорывной рост» показателей технологии БС-СМПМ в применении ВЭУ. На рис. 9,б очерчена приблизительная область развития СМОВСП. Как мы видели выше (рис. 5), идет постоянное улучшение компактности СМОВСП, в частности в сравнении с АМ, поэтому стрелками показан «взлом» карты в данной конкретной области и переход в область более высоких удельных показателей. На рис. 9,в показана приблизительная область развития ВЧСМПМ. Здесь наблюдается наиболее радикальный «взлом» карты и соответствующий переход в область более высоких удельных показателей. На рис. 9,г показана приблизительная область развития ВИМ. Во многих работах указывалось, что ВИМ могут быть более компактны, чем АМ, при том же уровне КПД. Разница в компактности приблизительно соответствует разнице меж-

ду соседними корпусами из ряда стандартных корпусов. Отметим, что области развития ВИМ и ВЧСМПМ частично совпадают, при этом компактность ВЧСМПМ значительно выше.

Вероятно, в ближайшем будущем мы станем свидетелями конкуренции между СМСПОВ и ВЧСМПМ за диапазон мощностей и частот вращения 0,1–1 МВт и 1000–30000 об/мин. При снижении цен на СП может стать рентабельным создание СМСПОВ на мощностях ниже 1 МВт. Однако ВЧСМПМ уже начинают занимать ниши в применениях с мощностью выше 100 кВт. В целом видно, что развитие ЭМ как класса систем идет неравномерно и за счет внедрения разных типов ЭМ в различных применениях.

Эволюция характеризуется не только движущими, но и противодействующими силами, а также ограничениями, совместно определяющими направления эволюции (рис. 10).

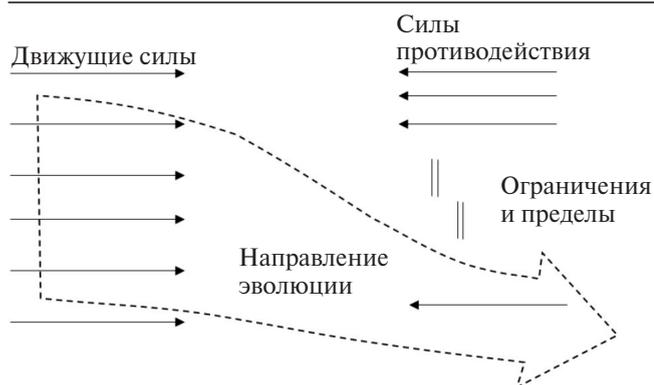


Рис. 10. Иллюстрация движущих сил, сил противодействия, ограничений и направления эволюции

Любая сложная техническая система тем или иным образом «сопротивляется» различным изменениям. Противодействующие силы создаются людьми, которые либо подвержены психологической инерции, либо опасаются ухудшения своего положения в результате внедрения нового. Методы преодоления включают работу по демонстрации преимуществ новой «прорывной» системы в реальном применении и последующую работу по снижению ее стоимости.

Эволюционирующий класс систем время от времени сталкивается с ограничениями и пределами. Некоторые типы ограничений с примерами из области ЭМ приведены в табл. 4.

Ограничение может также трактоваться как отсутствие чего-то, например какого-нибудь компонента. Тогда появление недостающего компонента рассматривается как снятие ограничения. Например, появление силовой электроники оказалось снятием ограничений на создание машин, работающих на ультранизких и ультравысоких частотах вращения. Эволюцию технической системы можно представить как процесс постепенного снятия различных ограничений.

В [2] первой части статьи показано, каким образом может быть ограничен рост мощности турбогенератора. Отношение мощности генератора к мощности системы ограничено простым эмпирическим правилом: мощность одного генератора не должна превышать 10% мощности всей системы, чтобы его можно было при отказе заменить за счет резерва мощности системы, который обычно составляет 15–20%.

В более простых технических системах пределом (непреодолимым ограничением) может стать исчерпание вариантов альтернативного развития. К такому пределу подходят обычно в течение нескольких десятков лет после появления системы. Электрические машины – очень многообразный и разветвленный класс технических систем, поэтому к такому пределу электрические машины подойдут

Таблица 4

#### Примеры ограничений

Ограничения, связанные с	Примеры из области ЭМ
законами физики, химии и биологии	Механические ограничения, связанные с высокой окружной скоростью в машинах с ультравысокой частотой вращения, когда центробежные силы становятся настолько велики, что использовать роторы, состоящие из множества соединенных между собой элементов, становится проблематично
несовершенством других компонентов надсистемы	Недостаточная емкость аккумуляторов электрической энергии в настоящее время является ограничением внедрения полностью электрических самолётов и электродвигателей для них. Примечательно, что та же самая проблема стала препятствием на пути внедрения двигателя Якоби в пассажирских лодках с электроприводом еще в 1830-е годы
несовершенством узлов и компонентов подсистем	Щётки коллекторного узла не могут надежно работать на высоких частотах вращения, что ограничивает применение машин постоянного тока сравнительно невысокими скоростями
чрезмерным увеличением сложности конструкции	Чрезмерное увеличение сложности механической конструкции может стать препятствием для «многослойных» ЭМ, таких как «псевдопрямой привод» (Pseudo Direct Drive, PDD)
конечностью не возобновляемых природных ресурсов	Редкоземельные элементы, из которых изготавливаются постоянные магниты, являются ограниченным ресурсом
окружающей средой, её загрязнением	Современные методы производства редкоземельных постоянных магнитов – не экологичны
негативным воздействием на человека	Шумы, вибрации
конкуренцией с другими похожими системами	Какая-то ниша (насосы коммунального хозяйства) уже занята ЭМ (АДКЗ), лишь незначительно уступающей новой ЭМ (ВИД) по характеристикам, но уже оптимизированной по стоимости

ещё не скоро. В то же время определенные типы ЭМ вполне могут достичь потолка собственного развития и быть вытеснены.

Отметим еще несколько особенностей эволюции технических систем, которые полностью применимы к ЭМ, и приведем соответствующие примеры:

изменения в разных областях технологий могут оказывать взаимное влияние. Одно изобретение может как способствовать, так и тормозить их развитие, и даже предотвращать. Аналогично одна техническая система может как поддерживать появление новых систем в других областях, так и мешать их развитию, и даже предотвращать их появление. Например, повышение надежности и удешевление двигателей внутреннего сгорания (за счет массового производства) является препятствием для внедрения электромобилей и соответствующих ЭМ;

эволюция – процесс многомерный, при этом разные подсистемы могут эволюционировать с разной скоростью, ускорять и заменять ее. Например, усовершенствование щеток машин постоянного тока, увеличение их срока службы замедляет внедрение переменного тока.

при развитии техники присутствуют два интегральных эффекта: дивергенция и конвергенция. Дивергенция – это расхождение систем по специализированным экологическим нишам и развитие каждой системы в своей нише. После дивергенции может наступать конвергенция – схождение, сближение систем, когда начинается перенос локальных достижений между относительно близкими применениями. Например, СМПМ могут использоваться в таких непохожих применениях, как морские суда и самолеты. Требования при этом различны, что приводит к появлению непохожих конструкций СМПМ (дивергенция). В то же время опыт интеграции СМПМ в винторулевую колонку морского судна может использоваться для создания генераторов для приливных турбин (конвергенция);

при эволюции в системе накапливаются изменения, причём не просто накапливаются, а изменяют систему, придавая ей новые свойства; таким образом появляется новая система (происходит «перерождение»). Примером могут быть различные «гибридные» топологии ЭМ, соединяющие в себе принципы работы индукторных (неравномерность зазора), синхронных (использование постоянных магнитов) и асинхронных машин (демпферные обмотки);

критерием качества системы и её конкурентоспособности является успех на рынке. В здоровой

экономике действует принцип позитивного отбора, т.е. выбираются системы с «наибольшей идеальностью». В кризисные годы может включиться механизм негативного отбора: например, могут выбираться системы с самой низкой стоимостью, без должной/адекватной оценки их характеристик и качества. Например, при резком повышении цен (в пять раз) на постоянные магниты в 2011 г. из-за политической конъюнктуры (с достаточно быстрым возвращением к старому уровню цен – к 2013 г.) ряд перспективных проектов ЭМ с прямым приводом был остановлен, предпочтения были отданы машинам без ПМ и соответствующим топологиям систем, несмотря на лучшие характеристики машин с ПМ.

**Заключительный комментарий.** Вероятно, можно сказать, что если в XIX в. основной движущей силой эволюции была изобретательская деятельность, благодаря которой были созданы основные типы ЭМ и отсеяны тупиковые варианты развития, то в XX в. основной движущей силой эволюции стало улучшение свойств материалов и различных подсистем машин. В XXI в., вероятно, эволюция материалов продолжит играть важную роль наряду с внедрением принципиально новых производственных технологий. Во все времена появление и развитие новых применений были важнейшим фактором развития ЭМ. Уже на заре электромеханики ЭМ разрабатывались под конкретные применения, например двигатель Якоби (1838) – привод бота, двигатель Дэвидсона (1842) – привод локомотива. Итак, основные движущие силы эволюции: появление новых применений и эволюция существующих; новые материалы; новые технологии производства.

Электрические машины подчиняются тем же законам эволюции, что и другие технические системы. Эти законы важно знать, при этом электромеханикам будут полезны работы специалистов ТРИЗ.

Инженерное сообщество может отчасти ускорять эволюцию и даже управлять ею. Например, можно находить новые материалы и внедрять их при разработке новых ЭМ и систем электропривода, можно создавать потребность в новых материалах, например обозначать потребность в них с целью ускорения и направления развития. Также можно влиять на эволюцию ЭМ, разрабатывая решения с механической интеграцией машин в применения.

**Приложение. Статистика по патентным заявкам.** Систематизированы результаты поиска числа патентных семей по отдельным типам ЭМ, а также даны цифры по странам и фирмам, в которых было

подано наибольшее число патентных заявок по данным типам ЭМ. Данные собраны с помощью открытой патентной базы [www.espacenet.com](http://www.espacenet.com).

По асинхронным машинам поиск был проведен по классу H02K17 «Asynchronous induction motors/generators» – информация приведена в табл. П-1.

По синхронным машинам с постоянными магнитами поиск был проведен двумя способами:

поиск по классу H02K21 «Synchronous motors/generators having permanent magnets» – информация приведена в табл. П-2;

поиск по более широкому классу H02K и ключевым словам «Permanent magnet» – информация приведена в табл. П-3; исследовался только период с 1991 г.

По машинам постоянного тока поиск был проведен по классу H02K23 «DC commutator motors or generators having mechanical commutator; Universal AC/DC commutator motors» – информация приведена в табл. П-4.

По вентильно-индукторным машинам поиск был проведен по более широкому классу H02K и

Таблица П-1

**H02K17. Asynchronous induction motors/generators**

Годы	1961–1965	1966–1970	1971–1975	1976–1980	1981–1985	1986–1990
Число семей	814	1047	1469	1765	1575	1643
Ведущие страны	США – 262, Германия – 250, Франция – 220	Германия – 419, США – 326, Франция – 316	Япония – 1005, Германия – 285, США – 198	Япония – 1345, Германия – 216, США – 156, СССР – 130	Япония – 1132, СССР – 209, Германия – 161	Япония – 929, СССР – 360, Германия – 189
Ведущие фирмы	Licentia – 55, Siemens – 48, GE – 36	Licentia – 65, Siemens – 62, GE – 33	Hitachi – 55, Siemens – 31, GE – 21	Hitachi – 162, Tokyo Shibaura – 158, Mitsubishi – 68	Hitachi – 85, Tokyo Shibaura – 71, Mitsubishi – 62	Satake – 104, Institut Elektrodinamiki – 98, Toshiba – 59
Годы	1991–1995	1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015	
Число семей	1247	1114	1258	1403	1935	
Ведущие страны	Япония – 738, США – 231, Германия – 220	Япония – 542, США – 349, Германия – 251	США – 511, Япония – 442, Китай – 430	Китай – 819, США – 371, Япония – 271	Китай – 1290, США – 382, Япония – 309	
Ведущие фирмы	Fujitsu – 78, Toshiba – 68, Hitachi – 49	Hitachi – 53, Matsushita – 33, Mitsubishi – 31	LG Electronics – 102, Mitsubishi – 47, Siemens – 26	Mitsubishi – 34, LG Electronics – 29, Siemens – 23	Chongqing Leerja – 89, Mitsubishi – 42, Siemens – 29	

Таблица П-2

**H02K21. Synchronous motors/generators having permanent magnets**

Годы	1961–1965	1966–1970	1971–1975	1976–1980	1981–1985	1986–1990
Число семей	539	781	2197	2985	3018	3222
Ведущие страны	Германия – 170, США – 169, Франция – 145	Япония – 336, США – 275, Германия – 245	Япония – 1881, Германия – 306, США – 282	Япония – 2611, Германия – 306, США – 291	Япония – 2630, США – 384, Германия – 324	Япония – 2694, США – 521, Германия – 413
Ведущие фирмы	Siemens – 36, Bosch – 31, Philips – 22	Siemens – 33, Bosch – 21, Licentia – 14	Bosch – 40, Hitachi – 39, Matsushita – 35	Hitachi – 169, Matsushita – 142, Citizen – 59	Matsushita – 176, Hitachi – 131, Mitsubishi – 64	Matsushita – 86, Mitsubishi – 71, Hitachi – 52
Годы	1991–1995	1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015	
Число семей	2492	3735	4888	5623	5482	
Ведущие страны	Япония – 1865, США – 646, Германия – 502	Япония – 2856, США – 1126, Германия – 781	Япония – 3487, США – 1974, Китай – 1308	Япония – 2758, Китай – 2496, США – 2096	Китай – 3050, Япония – 2250, США – 2050	
Ведущие фирмы	Matsushita – 117, Sony – 81, Nihon – 73	Matsushita – 200, Nihon – 123, Hitachi – 92	Matsushita – 202, LG Electronics – 117, Mitsubishi – 116	Honda – 198, Mitsubishi – 141, Daikin – 135	Mitsubishi – 185, Denso – 149, Daikin – 64	

Таблица П-3

## «Permanent magnet» + H02K

Годы	1991–1995	1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015
Число семей	2898	4068	5279	8121	11254
Ведущие страны	Япония – 1835, США – 894, Германия – 717	Япония – 2535, США – 1297, Китай – 974	Япония – 2875, США – 2013, Китай – 1658	Китай – 4263, Япония – 2749, США – 2413	Китай – 7817, США – 2681, Япония – 2562
Ведущие фирмы	Toshiba – 78, Matsushita – 71, Hitachi – 57	Matsushita – 129, Hitachi – 106, Toshiba – 84	Yaskawa – 177, LG Electronics – 111, Matsushita – 100	Mitsubishi – 188, Honda – 123, Siemens – 120	Mitsubishi – 234, Harbin Inst Technology – 136, Univ Southeast – 132

Таблица П-4

## H02K23. DC commutator motors or generators having mechanical commutator; Universal AC/DC commutator motors

Годы	1961–1965	1966–1970	1971–1975	1976–1980	1981–1985	1986–1990
Число семей	643	859	2080	2578	2206	1570
Ведущие страны	Германия – 212, Франция – 177, США – 171	Япония – 334, Германия – 295, Франция – 258	Япония – 1742, Германия – 268, Франция – 204	Япония – 2258, Германия – 248, США – 233	Япония – 1906, Германия – 248, США – 231	Япония – 1192, Германия – 301, США – 413
Ведущие фирмы	Siemens – 39, Licentia – 32, Electronique & Automatisme – 19	Siemens – 38, GE – 17, Bosch – 15	Hitachi – 73, Matsushita – 52, Siemens – 34	Matsushita – 342, Hitachi – 130, Canon – 36	Matsushita – 212, Hitachi – 115, Mitsubishi – 59	Hitachi – 60, Matsushita – 58, Mitsubishi – 53

Годы	1991–1995	1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015
Число семей	1339	1475	1738	1636	1167
Ведущие страны	Япония – 910, США – 3019, Германия – 304	Япония – 974, США – 527, Германия – 384	Япония – 975, США – 804, Китай – 604	Китай – 743, Япония – 723, США – 619	Китай – 728, Япония – 419, США – 380
Ведущие фирмы	Matsushita – 48, Mabuchi – 35, Tokyo Parts – 32	Asmo – 76, Denso – 58, Matsushita – 50	Asmo – 115, Denso – 98, Mitsuba – 47	Mitsuba – 106, Asmo – 72, Denso – 50	Mitsuba – 59, Asmo – 56, Johnson – 42

Таблица П-5

## «Switched (or variable) reluctance» + H02K

Годы	1986–1990	1991–1995	1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015
Число семей	88	201	332	249	275	558
Ведущие страны	США, Япония, Германия	США, Германия, Япония	США, Япония, Германия	США – 152, Япония – 98	Китай – 142, США – 113, Япония – 71	Китай – 352, США – 199, Япония – 131
Ведущие фирмы	Nidec SR Drives	Nidec SR Drives	Nidec SR Drives	LG Electronics	Mitsuba	Samsung

ключевым словам «Switched (or variable) reluctance» – информация приведена в табл. П-5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yasunori Satake, Kazuhiko Takahashi, Takami Waki, Mitsuru Onoda, Takayasu Tanaka. Development of large capacity turbine generators for thermal power plants. – Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2015, vol. 52 No. 2, pp. 47–54.

2. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для бакалавров, 2-е изд. М.: Юрайт, 2012, 675 с.

3. AMSC presentation, Concepts for high power wind turbines introducing HTS technology, World Green Energy Forum 2010, Gyeongju, Korea, 2010, November, pp. 17–19.

4. Werfel F. Supraleitung und Innovationene in der Energietechnik, Internationale Fachtagung Innovative Glanzlichter fuer das Solarzeitalter aus Sachsen, June 14, 2012,

5. Матвеев А.В. Альтернативная машинная постоянная и оценка массы и габаритов электрических машин. – Электричество, 2019, № 11, с. 45–53.

6. Матвеев А.В. Анализ типов и серий асинхронных машин с помощью альтернативной машинной постоянной. – Электричество, 2020, № 7, с. 41–56.

7. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1964, 480 с.

8. Goss W.R. Evolution of permanent-magnet fractional-horsepower size motors and generators, in transactions of the American institute of electrical engineers. Part III: Power apparatus and systems, vol. 72, No. 2, pp. 81-84, April 1953, doi: 10.1109/AIEEPAS.1953.4498606.

9. Раздел спецификаций электрических машин и преобразователей частоты компании T-motor [Электрон. ресурс] <http://uav-en.tmotor.com/> (дата обращения 19.06.2020).

10. Lahne H.-C., Moros O., Gerling D. Design considerations when developing a 50000 rpm high-speed high-power machine. – 17th European Conference on Power Electronics and Applications

(EPE'15 ECCE-Europe), Geneva, 2015, pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2015.7311716.

11. Раздел спецификаций электрических машин и преобразователей частоты компании АВВ [Электрон. ресурс] [www.abb.com](http://www.abb.com) (дата обращения 19.06.2020).

12. Eize de Vries. Close up – Sway Turbine's ST10 10MW turbine, October 22, 2012, Онлайн-журнал по ветроэнергетике [Электрон. ресурс] <https://www.windpowermonthly.com> (дата обращения 19.06.2020).

[20.06.2020]



Автор: **Матвеев Алексей Вячеславович** – директор Drive Constructor.

*Electrichestvo*, 2021, No. 2, pp. 4–15

DOI:10.24160/0013-5380-2021-2-4-15

## Driving Forces and Lines of the Evolution of Rotating Electrical Machines. Part 2

Matveev Alexey V. (*Drive Constructor, Norway*) – Director

*The advent and development of such class of technical systems as electrical machines is only one element of those composing the technical progress, which, in turn, is one of elements composing the human civilization. Technical progress can be imaged as an entanglement of many «streams», each containing the development, putting in use, operation, and disappearance of a technical system. Technical progress is advanced through practical implementation of a multitude and variety of improvements. Any technical system is developed through embodying various ideas, which results in a change of a given system or development of a new system. An attempt is made to briefly describe all significant elements in the evolution of electrical machines (EMs). The role of large inventions and moderate improvements is shown; examples of evolution trends, patterns and lines are given; the evolution of EMs in the «supersystem-system-subsystem coordinate axes is described, and it is shown how applications determine the requirements for EMs. Examples of the evolution of the materials used in EMs are considered. The role of individuals, teams, and organizations is discussed. Particular examples of evolution lines are given, and the counterforces and limitations are described.*

**Key words:** *rotating electrical machines (EMs), evolution driving forces and limitations, EM development history, evolution lines, EM supersystems and subsystems, materials*

### REFERENCES

1. Yasunori Satake Kazuhiko Takahashi, Takami Waki, Mitsuru Onoda, Takayasu Tanaka, Development of large capacity turbine generators for thermal power plants, – Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2015, vol. 52, No. 2, pp. 47–54.

2. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya bakalavrov, 2-ye izd.* (Electric cars. Textbook for bachelors, 2nd ed.). M.: Yurayt, 2012, 675 p.

3. AMSC presentation. Concepts for high power wind turbines introducing HTS technology, World Green Energy Forum 2010, Gyeongju, Korea, 2010, November, pp. 17–19.

4. Werfel F. Supraleitung und Innovationene in der Energietechnik, Internationale Fachtagung Innovative Glanzlichter fuer das Solarzeitalter aus Sachsen, June 14, 2012,

5. Matveyev A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 11, pp. 45–53.

6. Matveyev A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 7, pp. 41–56.

7. Balagurov V.A., Galteyev F.F., Larionov A.N. *Elektricheskiye mashiny s postoyannymi magnitami* (Electric machines with permanent magnets). M.: Energiya, 1964, 480 p.

8. Goss W.R. Evolution of permanent-magnet fractional-horsepower size motors and generators, in transactions of the American institute of electrical engineers. Part III: Power apparatus and systems, vol. 72, No. 2, pp. 81-84, April 1953, doi: 10.1109/AIEEPAS.1953.4498606.

9. Razdel spetsifikatsiy elektricheskikh mashin i preobrazovateley chastoty kompanii T-motor [Elektron. Resourse] <http://uav-en.tmotor.com/> (Date of appeal 19.06.2020).

10. Lahne H.-C., Moros O., Gerling D. Design considerations when developing a 50000 rpm high-speed high-power machine, 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), Geneva, 2015, pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2015.7311716.

11. Razdel spetsifikatsiy elektricheskikh mashin i preobrazovateley chastoty kompanii ABB [Elektron. Resourse] [www.abb.com](http://www.abb.com) (Date of appeal 19.06.2020).

12. Eize de Vries, Close up – Sway Turbine's ST10 10MW turbine October 22, 2012, Wind Power Online Magazine [Elektron. Resourse] <https://www.windpowermonthly.com> (Data of appeal 19.06.2020).

[20.06.2020]