

Движущие силы и направления эволюции вращающихся электрических машин. Ч. 1

МАТВЕЕВ А.В.

Drive Constructor, Норвегия

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.

Ключевые слова: вращающиеся электрические машины (ЭМ), движущие силы эволюции и ограничения, история развития ЭМ, направления эволюции, надсистемы и подсистемы ЭМ, материалы

Роль крупных изобретений и небольших усовершенствований. В процессе длительной эволюции технических систем почти всегда происходят интересные события — разработчику удается изменить в нужном направлении, улучшить характеристики системы, которые считались принципиально неизменными и представлялось невозможным их улучшить. Часто это происходит путём совершенно неожиданным, ранее неизвестным или начисто отвергнутым. Идея такого кардинального улучшения называется изобретением. Изобретателю приходится прорываться через реальные или мнимые ограничения, психологическую инерцию, профессиональные стереотипы. Естественно, не все изобретения равнозначны по сложности и ценности. В Теории Решения Изобретательских Задач (ТРИЗ) предложено делить изобретения по сложности на 5 уровней. Приведем описание (от высшего к низшему) с примерами из области электрических машин (ЭМ).

Уровень 5 (наивысший). Создание совершенно новой системы с новой функцией. Изобретению 5-го уровня обычно предшествует великое открытие. Примеры: «Вольтов столб» (Вольта, 1800 г.) — первый гальванический элемент, предшествующее открытие — открытие электричества; электромаг-

нит (Стерджен, 1820 г.), предшествующее открытие (изобретение) — соленоид.

Уровень 4. Создание нового поколения системы, выполняющего ту же основную функцию, но работающую на новом принципе. Решение надо искать в области науки, а не технологий, при этом проблемы зачастую решаются с привлечением других наук, например, «механические» проблемы решаются методами химии. Примеры: двигатель постоянного тока Якоби (1834 г.); многофазные асинхронные машины Теслы (около 1888 г.) и Доливо-Добровольского (1889 г.).

Уровень 3. Кардинальное улучшение существующей системы с применением методов, не известных в данной отрасли, но известных в других отраслях. Методы решения — в рамках того же подраздела науки, например механики (т.е. «механические» проблемы решаются методами механики, «химические» — методами химии). Один из элементов системы меняется полностью. Примеры: новые двигатели, являющиеся развитием машин постоянного тока (прообраз вентильно-индукторной машины, Дэвидсон, 1842 г.) или асинхронных машин (АМ с фазным ротором, Доливо-Добровольский, 1890 г.)

Уровень 2. Проблема решается методами, известными в данной отрасли. Почти любой хоро-

ший инженер обычно способен найти решение, но для этого может потребоваться анализ от 10 до максимум 100 известных специалистам вариантов решения. Примеры: множество современных патентов в области ЭМ.

Уровень 1. Проблема решается методами, хорошо известными в данной отрасли. Практически любой инженер может найти решение, перебрав от 1 до максимум 10 известных вариантов решения. Примеры: большинство современных патентов в области ЭМ, хотя решения, приведенные в таких патентах, изобретениями называть, пожалуй, некорректно, поскольку это, скорее, «инженерные улучшения» систем.

В [1] проанализирована история изобретений в области ЭМ в XIX в. Некоторые результаты этой работы можно обобщить в форме упрощенной картины, показанной на рис. 1, где изобретения уровней 4 и 5 обозначены как «выдающиеся», а уровня 3 – как «другие значительные» изобретения¹.

В целом уровень изобретений уменьшается с ходом истории развития дисциплины. В XX в. также были изобретены новые типы машин, соответствующие уровню 3, например шаговый двигатель (1912, Вудс), двигатель с катящимся ротором (1944, Москвитин), но они либо были «прямыми потомками» машин XIX в., либо не имели большого пространства (и, соответственно, значения).

Существует стереотип, что изобретение – результат «озарения», т.е. изобретательство и сопутствующие инновации – в какой-то степени «случайный» процесс. Это не так, случайность открытий – просто признак очень раннего этапа развития какой-то области науки или инженерной дисциплины. В этот исторический период учёных мало, и исследуют они более-менее случайные вещи (в электромеханике – это период до начала XIX в.). В процессе таких исследований случайно обнаруживаются неизвестные ранее эффекты. Но как только некоторые начальные «раскопки» удались, ситуация достаточно быстро меняется. Приходит множество исследователей (в электромеханике – уже с 1820-х годов), появляются компании (в электромеханике – с середины XIX в.), поэтому следующий уровень открытий становится просто неизбежным (откроет не один, так другой), идёт игра на опережение.

Крупные изобретения порождают вторичные задачи – устранение недостатков, улучшение системы, решение второстепенных проблем, а также проблем адаптации к новым нишам и т.п. Все эти вторичные проблемы группируются вокруг цен-

трального изобретения и его последующей реализации.

Отдавая должное изобретениям, не стоит недооценивать роль мелких улучшений. В попытках улучшить систему разработчики перебирают варианты усовершенствований, делают определенные шаги, каждый из которых прост и логичен, проверен и служит основой для других шагов. Множество мелких усовершенствований, при незначительности каждого из них в отдельности, обладает кумулятивным действием. В [2] технический прогресс представляется как цепная реакция нарастания знаний и умений, как обучение², т.е. накопление опыта, которое идёт очень хорошо в рамках конкретной инновационной деятельности и при этом имеет в значительной степени практический, а не теоретический характер. Накопление опыта приводит к тому, что изменения начинают происходить быстрее. Цепная реакция развития идёт со скоростью, пропорциональной достигнутому уровню (чем больше накопленный опыт, тем быстрее идёт развитие). В какой-то момент, когда накопленный со временем опыт достигает определенного объема, происходит «взрыв», означающий переход на новый уровень (некий «квантовый скачок»). Таким образом, процесс развития техники – нелинейный, проходящий через серию «взрывных» изменений.

«Квантовый скачок» представляет собой одно изобретение или кластер изобретений (обычно уровня 2), которые часто оформляются как патентные заявки. Таким образом, можно сказать, что изобретения порождают вторичные задачи и мелкие улучшения, но и накопление улучшений также приводит к значительным изобретениям. Одно «большое» изобретение может спровоцировать серию малых, и наоборот. Отметим, что даже выдающиеся изобретения Теслы и Доливо-Добровольского основаны на опыте, накопленном по результатам работ Араго, Феррариса и Брэдли.

Сегодня, пожалуй, не стоит ждать революционных изобретений в области электромеханики. Можно сказать, что развитие в области ЭМ в настоящее время определяется в большей степени небольшими полезными усовершенствованиями (изобретениями уровня 1 и 2), т.е. развитие ЭМ представляет собой постепенный и медленный, но непрерывный прогресс. Отметим, что именно такое «нормальное» развитие подчиняется определенным весьма сильным закономерностям, которые следует

² Важной частью упомянутого процесса обучения является математическое моделирование и модельные испытания, которые позволяют значительно снизить риски реализации какой-то идеи сразу в реальном масштабе. Естественно, что успех моделирования не всегда гарантирует успех в реальной эксплуатации машины, поскольку модели ограничены и не могут обнаружить все системные суммарные связи и эффекты.

¹ Уровни изобретений выставлены по субъективному мнению автора данной статьи.

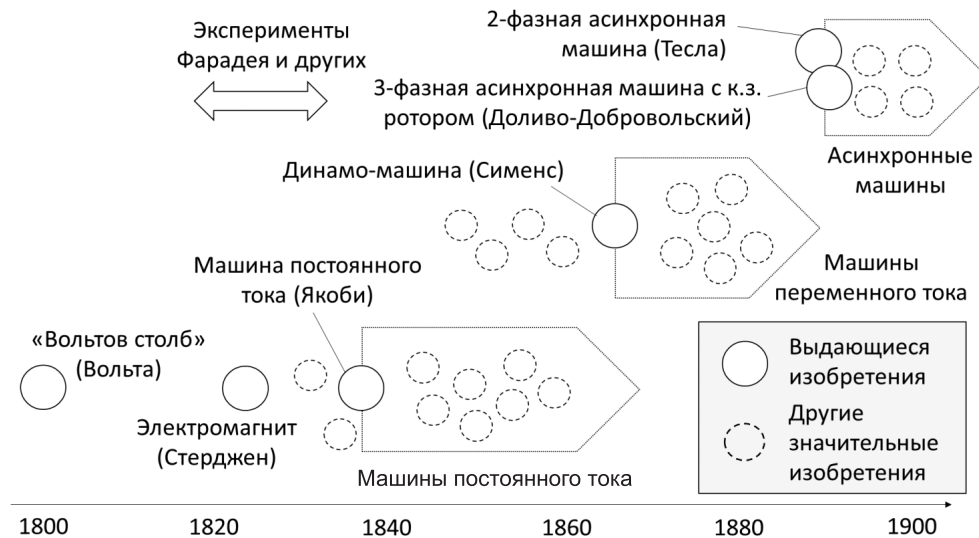


Рис. 1. Основные изобретения в области электрических машин в XIX в.

изучать, чтобы создавать новые более конкурентные технологии и продукты. Наиболее полно соответствующие вопросы исследованы в ТРИЗ [3]. Превратившись из методики решения технических задач в науку об эволюции технических систем, ТРИЗ предложила соответствующий понятийный комплекс и инструменты анализа [4].

Эволюционные Тренды, Паттерны и Линии. Фоном для эволюции электрических машин, а также ее движущими силами являются различные современные Тренды, например, повышение внимания к окружающей среде или увеличение использования полимерных и композитных материалов. Эволюция технических систем (ТС) многообразна, многомерна и подчиняется ряду Паттернов, которые сосуществуют во времени. Паттерны показывают и предсказывают изменения, происходящие с ТС в процессе эволюции. Примеры Паттернов: «Снижения участия человека в жизни ТС», «Увеличение динамизма и управляемости системы». Одни и те же Паттерны могут реализовываться для разных ТС. Паттерны представляют собой устойчивые исторически повторяющиеся тенденции, в то время как Тренды более переменчивы.

Рассмотрим Паттерны, приведённые выше в виде примеров, более детально. Реализация Паттерна «Снижение участия человека в жизни ТС» в случае электрической машины приведет в обозримом будущем к следующему: проектирование машины с помощью искусственного интеллекта; производство без участия человека с использованием роботов; диагностика машины с помощью искусственного интеллекта через информацию, считываемую с датчиков, интегрированных в машину; обслуживание и ремонт машины с помощью роботов. Реализация Паттерна «Увеличение степени дина-

мизма и управляемости электрической машиной» может означать большую роль силовой и управляющей электроники, а также появление большего числа механических степеней свободы благодаря наличию множества активных частей машины или более сложные и гибкие варианты механической интеграции. Приведем еще несколько Паттернов, имеющих отношение к эволюции ЭМ:

увеличение «разумности» систем, созданных человеком;

замена человеческого труда машинным в ситуациях, плохо приспособленных для людей;

рост идеальности³ систем, созданных человеком;

использование ресурсов нетипичных для биологической эволюции, например высокого давления и температуры, мощных источников энергии, опасных веществ и т.д.

Кроме эволюционных Трендов и Паттернов, существуют так называемые Линии эволюции, показывающие последовательность изменений при прохождении ТС в процессе эволюции. Линии эволюции показывают не то, что станет результатом эволюции, а то, каким образом система придёт к этому результату – в этом отличие Линий эволюции от Паттернов эволюции. Один эволюционный Паттерн может включать несколько Линий эволюции. Примером Линии эволюции является последовательность двух переходов: первый – от постоянного поля к пульсирующему полю, и второй – от пульсирующего поля к полю, пульсирующему с согласованной частотой. Уже прошли эту Линию эволюции: униполярная машина Фарадея (постоянное поле) – двигатель возвратно-поступательно-

³ Идеальность – понятие, рассмотренное ниже.

го движения Генри (пульсирующее поле) – 2-фазная машина переменного тока Теслы (согласованное пульсирование поля, создающее вращающееся поле).

Эволюция является продуктом взаимодействия многочисленных Трендов с различными весами и направлениями. Эволюционные Тренды и Паттерны систем более высокого иерархического уровня («надсистем») являются определяющими движущими силами для систем более низких уровней.

Можно также обсуждать эволюцию ЭМ в контексте и терминологии технологических укладов (сейчас идет переход к укладу 6) или промышленных революций (сейчас идет 4-я); ЭМ пришли с третьим технологическим укладом. Они продолжают существовать в последующих укладах. Происходит взаимопроникновение ЭМ и технологий новых укладов 4 и 5. Например, электроника, датчики, искусственный интеллект играют все большую роль в ЭМ, в свою очередь, ЭМ приводят в движение жесткие диски и вентиляторы ПК.

Эволюция в осях «Надсистема-Система-Подсистема». Связанные системы, принадлежащие к различным иерархическим уровням, развиваются совместно и координированно. Имеются в виду система, надсистема и подсистема.

Надсистемами по отношению к ЭМ являются электрическая сеть, системы управления ЭМ на базе силовой электроники, информационная среда (сегодня это АСУТП, различные системы мониторинга, в будущем, вероятно, интернет вещей), производственная среда, а также «применения»⁴ – системы, приводимые в движение ЭМ (например, скважинный насос, электромобиль, лифт) или системы, приводящие в движение ЭМ (например турбина).

Подсистемами ЭМ являются материалы, из которых изготовлены ЭМ, а также их различные узлы и компоненты. Параллельно с развитием новых материалов появляются новые технологии производства. В качестве примера можно привести аддитивные технологии и литографию [5].

Можно дискутировать о том, к чему отнести новые производственные технологии – к надсистеме (вместе с производственной средой) или к подсистеме (к материалам). Например, катушка, напечатанная на 3D принтере, является компонентом ЭМ, т.е. относится к подсистеме. В то же время 3D принтер, очевидно, – часть производственной среды. Компромисс интерпретации предложен на рис. 2, на котором производственная среда и производственные технологии выделены в отдельный

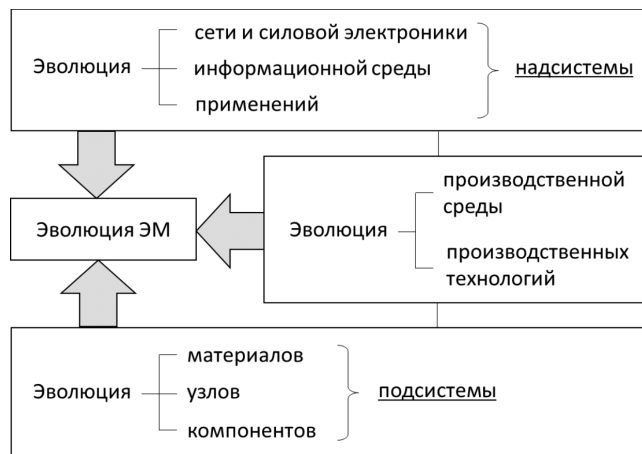


Рис. 2. Надсистемы и подсистемы, определяющие эволюцию ЭМ

блок, влияющий на эволюцию ЭМ и связанный как с надсистемой, так и с подсистемой.

Надсистемы: сеть и силовая электроника, информационная среда и производственная среда. Процесс массового появления в сетях устройств силовой электроники начался еще в 1970-е годы, и к настоящему времени присутствие как в общей сети, так и в автономных сетях электронных преобразователей частоты и напряжения, в том числе мощных, стало обычным явлением. Появление и эволюция преобразователей частоты (ПЧ) оказали и до сих пор оказывают большое влияние на развитие ЭМ.

Во-первых, появился ряд машин, например вентильно-индукторных, синхронно-реактивных или основных типов синхронных машин с постоянными магнитами (СМПМ), которые вообще не могут работать без ПЧ. Во-вторых, сети становятся более «загрязненными» высокочастотными составляющими тока и напряжения, и ЭМ, работающие напрямую от сети, должны иметь соответствующий «иммунитет». В-третьих, при использовании ЭМ с ПЧ требуются изменения в конструкции машин (в системе изоляции и подшипниках). Известно, что многие технические системы развиваются совместно, причем связи между такими системами усиливаются в процессе эволюции. Совместная эволюция электрических машин и силовых электронных ПЧ является хорошим примером, и отдельным вопросом эволюции становится постепенная интеграция ПЧ и ЭМ в единую систему до их полного слияния в единый модуль («интеграция в надсистему» в терминах ТРИЗ).

Эволюцию можно описать с учетом изменения основных параметров системы в течение длительного промежутка времени. Развитие силовых ПЧ можно представить как улучшение со временем таких показателей качества, как КПД, удельная мощность (по массе и объему) и стоимость. Увеличение

⁴ «Применения» – «Applications» в английском языке.

удельной мощности ПЧ с 1970 г. проиллюстрировано на рис. 3, на котором также отражен временной интервал (около 10 лет) между появлением прототипов в лаборатории и выходом продуктов на рынок. Объем и масса ПЧ становятся все более незначительными в сравнении с объемом и массой управляемых ими электрических машин. Стоимость ПЧ также снижается по сравнению со стоимостью машины. Это важный и заметный тренд, который, вероятно, в обозримом будущем закончится интеграцией ПЧ и ЭМ, по крайней мере, в системах небольшой мощности.

Для интеграции ЭМ в информационную среду с целью обеспечения диагностики состояния машин и прогнозирования изменения их состояния машин необходимо наличие датчиков и устройств считывания информации, в т.ч. бесконтактных, интегрированных в ЭМ. Исследования в этом направлении активно ведутся.

В соответствии с рассмотренными выше Паттернами эволюции производственная среда развивается в сторону вытеснения человека из процесса производства. С каждым годом повышается уровень автоматизации и роботизации электромашиностроительных заводов. Широко используются гибкие автоматизированные комплексы. Для сборочных работ применяются роботы. При проектировании машины необходимо учитывать особенности производства, на котором предполагается изготовление машины [6].

Применения ЭМ как одни из основных формирующих факторов или движущих сил. Большинство существующих систем, созданных человеком, появляются, развиваются и изменяются таким образом, чтобы удовлетворить потребности пользователя как высказанные, так и неосознанные. В целом потребители хотят больше функциональности и качества при снижении затрат и с меньшими негативными

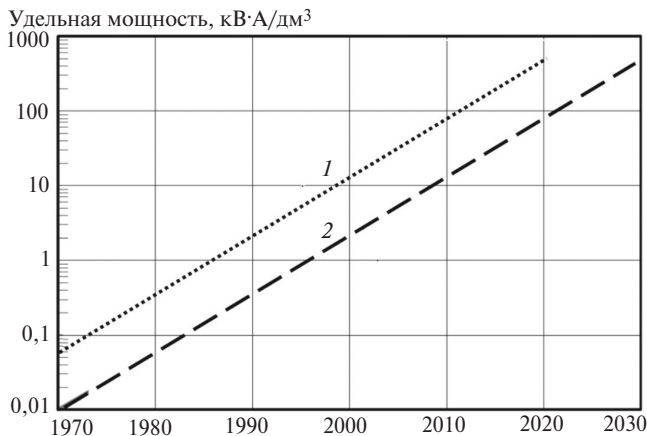


Рис. 3. Увеличение удельной мощности электронных преобразователей с 1970 г. [8]: 1 — системы на стадии НИОКР; 2 — системы на рынке

последствиями. В ТРИЗ существует понятие «идеальности потребностей». В [7] предлагается представить степень идеальности потребностей следующей формулой:

$$I = \alpha \frac{\sum_{i=1, j=1}^{\infty} Q_n; Q_l; j}{\sum_{k=m}^{\infty} C_k + \sum_{l=n}^0 \beta_l H_l}, \tag{1}$$

где I — степень идеальности потребностей; Q_n — количество потребностей; Q_l — качество потребностей; C — затраты времени и средств на удовлетворение потребностей; H — вредные действия («факторы расплаты»); i, j, k, l — порядковые номера переменных; α, β — коэффициенты согласования.

Идеальность — вероятно, самый универсальный критерий качества систем и главная целевая функция. В то же время в промышленности используются различные специфические (более узкие) критерии. Рассмотрим несколько применений и соответствующие критерии.

Приливная турбина. Основным критерием разработки турбин, использующих энергию приливов и морских течений, является нормированная стоимость электроэнергии:

$$C_E = C / E, \tag{2}$$

где C — все затраты; E — вся произведенная электроэнергия;

$$C = \sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}, \tag{3}$$

где I_t — инвестиционные затраты в год t ; M_t — операционные затраты и затраты на содержание в год t ; n — жизненный цикл системы;

$$E = \sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}, \tag{4}$$

где E_t — производство электроэнергии в год t ; r — ставка дисконтирования.

Стоимость генератора входит в инвестиционные затраты. Масса и габариты генератора могут влиять на стоимость других элементов турбины; КПД генератора определяет количество произведенной энергии. Высокая надежность генератора также важна, поскольку ремонт установленных под водой приливных турбин очень дорог. Практика показывает, что по степени влияния на C_E характеристики генератора стоят в следующей последовательности: высокий КПД в широком диапазоне нагрузок, высокая надежность, низкая стоимость, оптимальная механическая интеграция в структуру турбины.

Насос в системе водоснабжения ЖКХ. Для подобных систем обычно главной целевой функцией являются затраты в течение жизненного цикла:

$$C_{\Sigma} = I + C_e + M, \quad (5)$$

где I – инвестиционные затраты; C_e – стоимость потребленной энергии; M – операционные затраты за жизненный цикл насоса; КПД двигателя определяет количество потребленной энергии. Стоимость двигателя входит в инвестиционные затраты. Практика показывает, что для минимизации C_{Σ} высокий КПД имеет гораздо большее значение, чем стоимость двигателя. Таким образом, КПД – основная целевая функция для ЭМ в данном применении.

Полностью электрический самолет (ПЭС). Для малых пассажирских самолетов главная целевая функция – эффективность перевозки пассажиров:

$$C_p = \frac{PL}{C}, \quad (6)$$

где C – стоимость затраченной электроэнергии в год; P – число перевезенных пассажиров; L – расстояние, на которое перевезены пассажиры.

Для перевозки максимального числа пассажиров на максимальное расстояние ПЭС должен обладать минимальной собственной массой, кроме того, безопасность перевозки предъявляет требования к надежности ЭМ. Таким образом, малая масса ЭМ и ее надежность будут главными критериями. Высокая степень механической интеграции ЭМ в структуру ПЭС также может положительно повлиять на массу ПЭС. Высокий КПД снизит стоимость потребляемой электроэнергии, облегчит теплоотвод и увеличит дальность перелетов за счет меньшего расхода заряда аккумулятора.

Информация из рассмотренных примеров сведена в более краткой форме в табл. 1. Видим, что целевые функции для ЭМ значительно меняются в зависимости от применения.

Существует ряд применений, когда электрификация является следствием оптимизации по целе-

вой функции, не связанной с экономикой. Например, замена дизельных двигателей главного движения электрическими на морских паромах в настоящее время определяется в большей степени экологическими соображениями, в частности стремлением снизить выбросы углекислого газа и уменьшить значения $CO_{2y} = CO_2/N$, где CO_2 – число выбросов углекислого газа за год; N – число рейсов в год. При такой замене первичным требованием к ЭМ будет компактность, поскольку место в машинном отделении может быть ограничено. Если ЭМ удовлетворяет данному требованию, т.е. электрификация в принципе возможна, то целевая функция для ЭМ уже электрифицированного парома будет та же, что у ПЭС.

Для прогнозирования эволюции электрических машин необходимо знать и понимать эволюцию надсистем, в первую очередь, – применений. Краткосрочная эволюция системы (ЭМ) определяется динамикой развития, историей и ресурсами самой системы, а более долгосрочная – надсистемой (применением ЭМ), и чем больше срок прогноза, тем более высокий уровень надсистемы, определяющий эволюцию ЭМ, в это вовлечён.

С конца XX в. ветроэнергетические установки и приливные турбины проходили стадию определения оптимальной структуры системы преобразования энергии (электропривода). В лабораториях и на рынках конкурировали системы с мультипликатором (с разным числом ступеней) и прямым приводом. Этот процесс не завершён до сих пор, и на рынке присутствуют все варианты систем, хотя доля систем с прямым приводом неуклонно увеличивается. Очевидно, передаточное число мультипликатора определяет характеристики ЭМ (генератора), а также зачастую его тип. Таким образом, выбор (посредством рыночных механизмов) структуры привода турбины решающим образом влияет на инвестиции в тот или иной тип и топологию электрических генераторов.

Подсистемы. В [2] показано, что мощность электрических турбогенераторов выросла с 0,8 МВт

Таблица 1

Влияние применений и их целевых функций на целевые функции ЭМ

Система верхнего уровня (надсистема)	Основная целевая функция надсистемы	Выражение	Основные целевые функции для ЭМ в порядке приоритета
Приливные турбины	Нормированная стоимость электроэнергии	$C_E = C / E$	Высокий КПД, высокая надежность, низкая стоимость, механическая интеграция
Насос водоснабжения	Затраты в течение жизненного цикла	$C_{\Sigma} = I + C_e + M$	Высокий КПД
ПЭС	Эффективность перевозки пассажиров	$C_p = \frac{PL}{C}$	Малая масса, высокая надежность, высокий КПД, высокая степень механической интеграции

в 1917 г. до 540 МВт в 1972 г., при этом конструкция турбогенераторов почти не изменилась. Такое значительное увеличение мощности стало возможно благодаря появлению лучших материалов и технологий их обработки, а также улучшению вспомогательных систем турбогенераторов, например балансировки, устройств управления, возбуждения, защиты. Прошел процесс эволюции подсистем, к которым, в первую очередь, относятся материалы, из которых изготовлены ЭМ.

Приведем некоторые примеры эволюции магнитных и проводниковых материалов. Среди основных направлений исследований по магнитомягким материалам (электротехническим сталям) можно назвать: улучшение свойств материала; применение ламинированных листов меньшей толщины; возможность создания сердечников более сложной формы (порошковые технологии).

Улучшение свойств сталей приводит к повышению индукции насыщения, механической прочности, максимальной температуры, магнитной проницаемости, а также снижению потерь и температурного коэффициента. В качестве примера приведем тренд снижения потерь в стали (вдвое за 50 лет) в различных сортах сталей компании JFE Steel (рис. 4). Отметим, что улучшение некоторых свойств на практике возможно только за счет ухудшения других свойств.

Среди основных направлений исследований магнитотвердых материалов (постоянных магнитов (ПМ)) – увеличение энергетического произведения (ЭП), улучшение механических свойств, работа при высоких температурах. Для ПМ критическим параметром системы, по которому можно описать эволюцию, является ЭП. Интересно, что исторический рост ЭП (рис. 5) напоминает S-образную кривую, что может указывать на предел развития ПМ на основе редкоземельных элементов. Некоторые материалы, из которых делают ПМ, приближаются

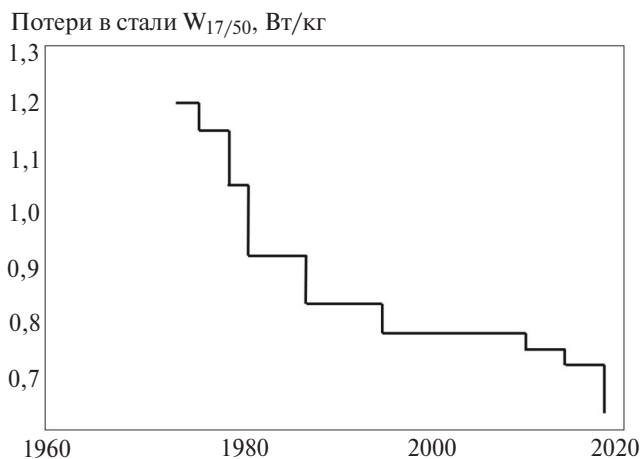


Рис. 4. Снижение потерь в стали при разработке различных сортов сталей JFE Steel [9]

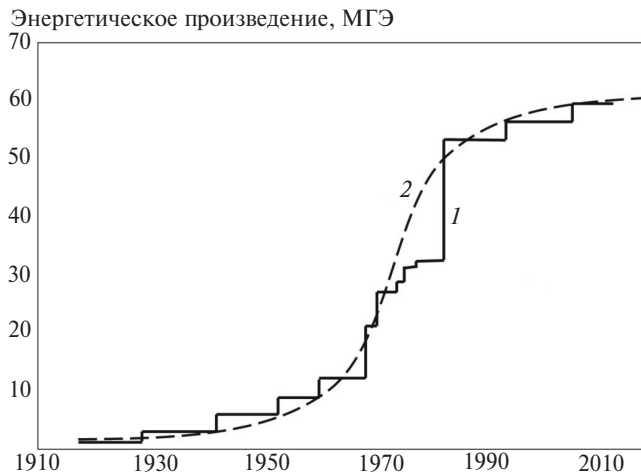


Рис. 5. Улучшение ЭП ПМ материалов: 1 – реальные значения; 2 – огибающая кривая

к своему теоретическому пределу. Тем не менее, уровень ЭП, достигнутый в конце XX в., уже достаточен для широкого внедрения машин с ПМ. В обозримом будущем возможно появление новых «не редкоземельных» типов ПМ, например на основе нанотехнологий.

В области проводниковых материалов особенно пристального внимания заслуживают углеродные нанотрубки (УНТ) и сверхпроводники. Для практического применения УНТ необходимо соединение индивидуальных УНТ в волокна, что представляет сложную проблему. В настоящее время разрабатываются различные способы создания на основе УНТ протяжённых волокон, которые, в свою очередь можно будет сплести в многожильный провод. Свойства полученных многожильных проводов на основе УНТ пока значительно хуже свойств индивидуальных УНТ. К настоящему времени удалось достигнуть уровня электропроводности волокна УНТ 15–20 МСм/м (рис. 6), т.е. уровень электропроводности меди пока не достигнут.

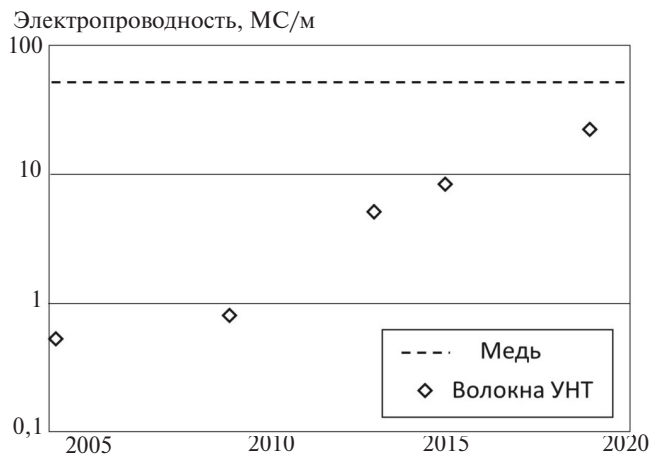


Рис. 6. Увеличение электропроводности волокон УНТ со временем [10]

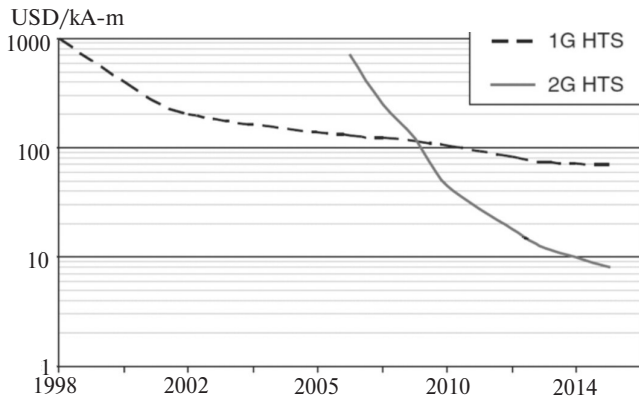


Рис. 7. Ценовые тренды СП двух поколений

Сверхпроводники (СП) BSCCO, YBCO, появившиеся в конце 1980-х годов, и MgB_2 , появившиеся в XXI в., уже используются в электрических машинах, пока в большей степени в прототипах. Эти СП можно использовать с охлаждением жидким азотом, в отличие от СП первых поколений на основе Nb, где было необходимо охлаждение жидким водородом или гелием. Важным фактором, сдерживающим внедрение СП, долгое время была их чрезвычайно высокая цена. В [11] приведены исторические данные и прогноз снижения цены для СП 1-го и 2-го поколений. Темпы и абсолютные значения снижения очень существенны – практически на 1–2 порядка за 5–10 лет (рис. 7). Прогнозируемое снижение цен обычно связывается с развитием рынка СП и наращиванием объемов их производства.

Не будет преувеличением назвать некоторые произошедшие за последние десятилетия улучшения в области активных материалов – радикальными. Параллельно с развитием активных материалов идет развитие изоляционных и конструкционных материалов. В частности, в области изоляционных материалов ведутся работы по повышению электрической прочности, теплопроводности, увеличению срока службы, стойкости к высоким температурам. Тестируются различные добавки, в том числе нанокompозитные. Например, в период с 1995 до 2002 гг. электрическая прочность полиэтилентерефталата (ПЭТ) увеличилась с 300 до 520–600 МВ/м [12].

Авторы процесса эволюции. Конкретные действия, двигающие вперед процесс эволюции, совершают, естественно, люди – отдельные личности (ученые, инженеры, разработчики, конструкторы, изобретатели), коллективы и организации (университеты, НИИ, компании, корпорации, ВПК государства, межгосударственные объединения). Роль отдельных личностей в настоящее время ограничена. Например, роль «изобретателей-одиночек» сводится в основном только к генерированию идей (хотя это и очень важная роль!). Дело в том, что как только становится известно о возникновении новой многообещающей идеи, практически немедленно в разных странах государственные исследовательские центры и частные корпорации начинают выделять средства на разработки по развитию данной идеи. Начинаются соревнования больших коллективов, и в конце концов именно коллектив становится победителем. В любом случае улучшения продукции или концепций начинают следовать практически сразу за первым появлением новой концепции или нового продукта.

Обычно существует не один, а несколько возможных путей эволюции системы от текущего состояния к следующему. Реализуется часто тот путь, по которому начали двигаться раньше и в который вложили наибольшие финансовые и человеческие ресурсы. Также каждый Паттерн эволюции имеет определённый вес, который определяется вовлеченными человеческими и финансовыми ресурсами. Этот вес может меняться со временем или при изменении прочих условий.

Группы людей, имеющих политическое или финансовое влияние, определяют направления исследований и разработок, уровень финансирования и, соответственно, число специалистов, работающих в выбранном направлении. Такие группы создают условия для инноваций (например, через гранты) и контролируют процесс (например, через механизм сертификации). Так, на рис. 8 показан механизм влияния политических приоритетов Евросоюза на развитие гибридных и полностью электрических самолетов при постановке конкретных целей по снижению выбросов углекислого газа и расхода топлива наднациональным органом – Европейским

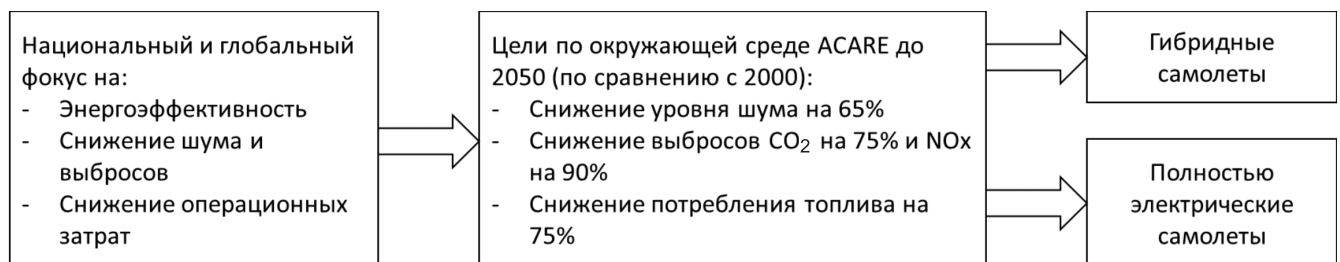


Рис. 8. Влияние выбранных политических приоритетов на электрификацию авиации

Консультативным Советом по исследованиям в области аэронавтики [13].

Одним из элементов инновационного процесса является защита интеллектуальной собственности, т.е. патентование изобретений. Число патентных заявок — косвенный показатель уровня инвестиций, числа вовлеченных разработчиков, а также успешности разработок в какой-либо отрасли, регионе или в какой-то период времени. В табл. 2 даны систематизированные результаты поиска в открытой базе данных www.espacenet.com по классу H02K (dynamo-electric machines, динамоэлектрические машины). Число патентных семей, приведенное в столбцах таблицы, дано за пятилетия. Также указаны ведущие страны и компании по числу патентных заявок и крупнейшие экономики мира (по номинальному ВВП) в соответствующие пятилетия. Важно отметить, что одна и та же патентная заявка может быть подана в нескольких странах (образуя таким образом патентную семью), поэтому общее число патентных семей — меньше суммы патентных заявок в отдельных странах. Отметим, что в период с 1976 до 1990 гг. СССР занимал 4 место в мире по числу патентных заявок. С 1970-х годов видим экономический и технологический подъем Японии, которая сместила Германию и более чем на три десятилетия стала лидером. Это совпадает с периодом входа Японии сначала в тройку лидеров, а затем и в выходе на 2 место (после США) по размеру ВВП. В начале нового столетия

Китай опередил Японию и США и прочно занял ведущую позицию. Интересно, что США, будучи крупнейшей мировой экономикой, в рассмотренный период (последние 60 лет) не были лидером по числу патентных заявок в области ЭМ.

За семь десятилетий число патентных заявок по классу H02K выросло примерно в восемь раз. При сопоставлении доступных данных о продажах ЭМ, которые показывают постоянный рост и сопоставления этих данных с темпами роста патентов на различные изобретения по ЭМ, можно сделать вывод, что гипотеза Шмуклера «о спросе на технологию», в соответствии с которой поток изобретений в отдельно взятой отрасли пропорционален общему объему продаж продукции этой отрасли, работает для индустрии ЭМ.

Зная патентную статистику, можно очень приблизительно оценить число вовлеченных специалистов и инвестиции. В соответствии с [14] в США в 2000-е годы на каждые 100 ученых и инженеров и каждые 10 млн долл. инвестиций в НИОКР приходилось 5 патентов. Примем эти соотношения (1 патент в год на 20 ученых, 1 патент в год на 2 млн долл. инвестиций) за базовые. Сегодня в мире ежегодно подается около 20 тыс. новых патентных заявок по ЭМ. При расчете с использованием упомянутых выше соотношений приходим к цифре в 400 тыс. ученых и инженеров, работающих по тематике, связанной с ЭМ, по всему миру, и объему

Таблица 2

Результаты поиска по классу H02K

	1961–1965	1966–1970	1971–1975	1976–1980	1981–1985	1986–1990
Число семей	9070	12025	25230	34430	35610	31880
Ведущие страны	Германия – 3130, США – 2580, Франция – 2400	Германия – 4235, Япония – 4070, США – 3316	Япония – 17900, Германия – 4120, США – 3310, Франция – 3020	Япония – 26200, Германия – 3730, США – 3230, СССР – 2970	Япония – 27900, Германия – 3440, США – 3270, СССР – 2980	Япония – 22900, США – 3830, Германия – 3570, СССР – 3370
Ведущие фирмы	Siemens – 700, Licentia – 640, GE – 270	Siemens – 550, Licentia – 470, GE – 280	Hitachi – 930, Siemens – 390, GE – 270	Hitachi – 2280, Tokyo Shibaura – 1120, Mitsubishi – 840	Hitachi – 1710, Matsushita – 1260, Mitsubishi – 1150	Toshiba – 981, Mitsubishi – 965, Hitachi – 870
Крупнейшие экономики	США, СССР, Германия	США, СССР, Германия	США, СССР, Япония	США, СССР, Япония	США, СССР, Япония	США, Япония, СССР

	1991–1995	1996–2000	2001–2005	2006–2010	2011–2015
Число семей	25710	30490	36880	53910	82100
Ведущие страны	Япония – 17050, США – 4600, Германия – 4290	Япония – 18100, США – 7500, Германия – 6300	Япония – 19260, США – 11470, Китай – 9160	Китай – 26640, Япония – 18640, США – 13280	Китай – 54200, Япония – 19100, США – 17200
Ведущие фирмы	Toshiba – 965, Matsushita – 900, Mitsubishi – 582	Matsushita – 1010, Denso – 640, Hitachi – 630	LG Electronics – 860, Denso – 810, Matsushita – 770	Matsushita – 1000, Denso – 860, Toyota – 830	Mitsubishi – 1350, Toyota – 890, Siemens – 850
Крупнейшие экономики	США, Япония, Германия	США, Япония, Германия	США, Япония, Германия	США, Китай, Япония	США, Китай, Япония

инвестиции в НИОКР по той же тематике – около 40 млрд долл. С учетом того, что население России составляет около 2% мирового, можно говорить о том, что по тематике ЭМ в России работают несколько тысяч специалистов. С учетом того, что только около 5% всех патентов имеют реальный эффект, т.е. представляют реальные инновации, можем предположить, что ежегодное число полезных усовершенствований по тематике ЭМ в мире – около тысячи в год, в России, соответственно, счет будет идти на десятки. Итак, можно сформулировать: **результатом работы сотен тысяч специалистов по всему миру ежегодно являются сотни усовершенствований ЭМ и непосредственно связанных с ними систем.**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yan der Kooij B.J.G. The Invention of the Electromotive Engine, 2015, ISBN: 1503095878.
2. Sahal D. Patterns of Technological innovation, Addison-Wesley, 1981, 381 p.
3. Орлов М.А. Основы классической ТРИЗ, изд. 2-е, испр. и доп. М.: Солон-Пресс, 2006, 432 с.
4. Zlotin B., Zusman A. Patterns of Evolution: recent findings on structure and origin, TRIZCON'2006, April 2006, Milwaukee, WI, USA.
5. Dehez B., Boudart F., Perriard Y. Analysis of a new topology of flexible PCB winding for slotless BLDC machines. – 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, 2017, pp. 1–8, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002019.
6. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин, 4-е изд. М.: Юрайт, 2018, 766 с.
7. Петров В.М. Технология инноваций, ISBN 965-7127-01-7, Тель-Авив, 2007, 90 с.
8. Kolar J.W., Drofenik U., Biela J., Heldwein M.L., Ertl H, Friedli T., Round S.D. PWM converter power density barriers. – IEEJ Transactions on Industry Applications, May 2007, 128 (4), pp. 9–29.
9. Takamiya T., Hanazawa K., Suzuki T. Recent development of grain-oriented electrical steel in JFE Steel, JFE, Technical report, March 2016, No. 21.
10. Carbon conductors for lightweight motors and generators, DE-EE0007865, Rice University, University of Maryland, DexMat, Irvin Global Industries, April 2017 – Oct. 2019.
11. Wei Tong, Wind power generation and wind Turbine design, WIT Press, 2010, 741 p. Ch. 9 «Direct drive superconducting wind generators» by Clive Lewis
12. Shengtao Li., Shihu Yu., Yang Feng. Progreaa in and prospects for electrical insulating materials, IET Journals, High Volt., 2016, vol. 1, iss. 2, pp. 122–129, doi: 10.1049/hve. 2016.0034.
13. Вебсайт Европейского Консультативного Совета по Исследованиям в Области Аэронавтики (ACARE) [Электрон. ресурс] www.acare4europa.org (дата обращения 19.06.2020).
14. McKern B. Managing the glonal network carporation, 2003, Routledge, 304 p.

[20.06.2020]



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

DOI:10.24160/0013-5380-2021-1-44-54

Driving Forces and Lines of the Evolution of Rotating Electrical Machines. Part 1

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. Yan der Kooij B.J.G. The Invention of the Electromotive Engine, 2015, ISBN: 1503095878.
2. Sahal D. Patterns of Technological innovation, Addison-Wesley, 1981, 381 p.

3. **Orlov M.A.** *Osnovy klassicheskoy TRIZb izdyu 2-ye, ispr. i dop.* (Fundamentals of classical TRIZb edition 2, rev. And add.) M.: Solon-Press, 2006, 432 p.
4. **Zlotin B., Zusman A.** Patterns of Evolution: recent findings on structure and origin, TRIZCON'2006, April 2006, Milwaukee, WI, USA.
5. **Dehez B., Boudart F., Perriard Y.** Analysis of a new topology of flexible PCB winding for slotless BLDC machines. – 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, 2017, pp. 1–8, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002019.
6. **Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F.** *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin, 4-ye izd. (Electrical Machine Design, 4th ed.). M.: Yurayt, 2018, 766 p.*
7. **Petrov V.M.** *Tekhnologiya innovatsiy, ISBN 965-7127-01-7, Tel'-Aviv* (Technology Innovation, ISBN 965-7127-01-7, Tel Aviv), 2007, 90 p.
8. **Kolar J.W., Drofenik U., Biela J., Heldwein M.L., Ertl H, Friedli T., Round S.D.** PWM converter power density barriers. – IEEJ Transactions on Industry Applications, May 2007, 128 (4), pp. 9–29.
9. **Takamiya T., Hanazawa K., Suzuki T.** Recent development of grain-oriented electrical steel in JFE Steel, JFE, Technical report, March 2016, No. 21.
10. **Carbon** conductors for lightweight motors and generators, DE-EE0007865, Rice University, University of Maryland, DexMat, Irvin Global Industries, April 2017 – Oct. 2019.
11. **Wei Tong,** Wind power generation and wind Turbine design, WIT Press, 2010, 741 p. Ch. 9 «Direct drive superconducting wind generators» by Clive Lewis.
12. **Shengtao Li., Shihu Yu., Yang Feng.** Progreaa in and prospects for electrical insulating materials, IET Journals, High Volt., 2016, vol. 1, iss. 2, pp. 122–129, doi: 10.1049/hve. 2016.0034.
13. **Vebsayt** Yevropeyskogo Konsul'tativnogo Soveta po Issledovaniyam v Oblasti Aeronavtiki (ACARE) (Website of the European Advisory Council for Aeronautical Research (ACARE)) [Elektron. resurs] www.acare4europe.org (data obrashcheniya 19.06.2020).
14. **McKern B.** Managing the glonal network carporation, 2003, Routledge, 304 p.

[20.06.2020]